

ISSN 2949-1185



Российская Академия Наук
ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

2/2025(4)

**СЕРИЯ: ЕСТЕСТВЕННЫЕ
И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ**

0+

Российская Академия Наук
ТРУДЫ

2/2025(4)

Научно-информационный журнал
Основан в 2010 году
Выходит 4 раза в год

Кольского научного центра. Серия: Естественные и гуманитарные науки

**КОЛЬСКИЙ
НАУЧНЫЙ
ЦЕНТР**

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр РАН» (ФИЦ КНЦ РАН)

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-83506 от 24 июня 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.

Научное издание

Технический редактор В. Ю. Жиганов
Редактор С. В. Тимофеева

Подписано к печати 23.07.2025.
Дата выхода в свет 23.07.2025.
Формат бумаги 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 15,22. Заказ № 56. Тираж 300 экз.
Свободная цена.

Адрес учредителя, издателя, редакции и типографии:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр РАН» (ФИЦ КНЦ РАН)
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14
Тел.: 8 (81555) 7-53-50; 7-95-95, факс: 8 (81555) 7-64-25
Электронная почта: ksc@ksc.ru
Сайт: www.ksc.ru

Главный редактор
акад. РАН, д. г.-м. н. С. В. Кривовичев

Заместитель главного редактора
к. б. н. Е. А. Боровичев

Редакционный совет:
акад. РАН, д. г. н. Г. Г. Матишов,
чл.-корр. РАН д. б. н. В. К. Жиров,
чл.-корр. РАН д. т. н. А. И. Николаев,
акад. РАН, д. х. н. И. Г. Тананаев,
д. э. н. Ф. Д. Ларичкин,
к. т. н. А. С. Карпов (отв. секретарь)

Редколлегия серии:
акад. РАН, д. г. н. Г. Г. Матишов,
чл.-корр. РАН, д. б. н. В. К. Жиров,
д. г.-м. н. В. В. Балаганский,
д. г.-м. н. Т. Б. Баянова,
д. и. н. С. Г. Веригин,
д. и. н. И. Ю. Винокурова,
д. г. н. В. А. Даувальтер,
д. и. н. В. В. Ефимова,
д. ф.-м. н. Б. В. Козелов,
д. г.-м. н. Н. Е. Козлов,
д. б. н. Н. А. Константинова,
д. б. н. П. Р. Макаревич,
д. т. н. Д. В. Макаров,
д. и. н. Е. П. Мартынова,
д. т. н. В. А. Маслобоев,
д. ф.-м. н. И. В. Мингалев,
д. ф.-м. н. О. В. Мингалев,
д. и. н. С. А. Никонов,
д. и. н. И. А. Разумова,
д. и. н. А. А. Селин,
д. и. н. Ю. П. Шабаев,
д. б. н. Н. Ю. Шамова,
к. ф.-м. н. В. Б. Белаховский,
к. б. н. Е. А. Боровичев,
к. б. н. Д. А. Давыдов,
к. б. н. Д. Б. Денисов,
к. б. н. И. В. Зенкова,
к. и. н. К. С. Казакова,
к. г. н. Д. В. Моисеев,
к. г.-м. н. С. В. Мудрук,
к. ф.-м. н. К. Г. Орлов,
к. и. н. Е. А. Пивнева,
к. ф.-м. н. Ю. В. Федоренко

Ответственный редактор номера
к. г. н. Д. В. Моисеев

СОДЕРЖАНИЕ

Булавина А. С.	Автоматизированный алгоритм поиска струй атлантических течений в Баренцевом море и расчета их основных характеристик в условиях дефицита данных.....	5
Герасимова М. В., Митяев М. В.	Изменение водного стока малых водотоков Мурманского берега.....	15
Даурцева А. В., Горшенина Е. В., Облучинская Е. Д.	Видовые особенности в накоплении элементов, полисахаридов и полифенолов у бурых водорослей <i>Ascophyllum nodosum</i> (L.) Le Jolis и <i>Fucus distichus</i> (L.) Арктики.....	19
Дружкова Е. И., Берченко И. В., Ващенко А. В., Венгер М. П., Водопьянова В. В., Дворецкий В. Г., Ишкулова Т. Г., Ларионов В. В., Макаревич П. Р., Намятов А. А., Олейник А. А., Пастухов И. А., Широколобов Д. В., Широколобова Т. И.	Актуальные аспекты изучения арктической пелагиали.....	35
Иванова Н. С., Усягина И. С.	Датирование осадочной толщи южной части залива Грэн-фьорд, август 2023 г.....	56
Ильин Г. В., Усягина И. С.	Динамика накоплений техногенных радионуклидов в морском побережье Мурмана.....	63
Кудрявцева О. Ю.	Структура и биоразнообразие прибрежной ихтиофауны губ Восточного Мурмана в летний период 2022 года.....	75
Куклин В. В., Куклина М. М.	Паразитологические исследования ММБИ РАН в 2020–2024 годах.....	83
Макаревич П. Р.	Морские экспедиционные исследования ММБИ РАН в 2020–2024 годах.....	101
Митяев М. В.	Вертикальная расчлененность рельефа и линеаменты полуостровов Рыбачий и Средний (Кольский полуостров).....	106
Пахомов М. В., Зайцев А. А., Яковлев А. П., Трошичев А. Р., Литвинов Ю. В.	Результаты летней тональной аудиометрии серых тюленей.....	124

2/2025(4)

Scientific journal
Published since 2010
Publication frequency — four times a year

Russian Academy of Sciences
TRANSACTIONS

Kola Science Centre. Series: Natural Sciences and Humanities

Editor-in-Chief

S. V. Krivovichev, Academician of RAS,
Dr. Sc. (Geology & Mineralogy)

Deputy Editor-in-Chief

E. A. Borovichev, PhD (Biology)

Editorial Council:

G. G. Matishov, Academician of RAS, Dr. Sc. (Geography),
V. K. Zhiron, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Biology),
A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Engineering),
I. G. Tananaev, Academician of RAS, Dr. Sc. (Chemistry),
F. D. Larichkin, Dr. Sc. (Economics),
A. S. Karpov, PhD (Engineering) — Executive Secretary

Editorial Board:

G. G. Matishov, Academician of RAS, Dr. Sc. (Geography),
V. K. Zhiron, Cor. Member of RAS, Dr. Sc. (Biology),
V. V. Balaganskiy, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy),
T. B. Bayanova, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy),
S. G. Verigin, Dr. Sc. (History),
I. Yu. Vinokurova, Dr. Sc. (History),
V. A. Dauvalter, Dr. Sc. (Geography),
V. V. Efimova, Dr. Sc. (History),
B. V. Kozelov, Dr. Sc. (Physics & Mathematics),
N. E. Kozlov, Dr. Sc. (Geology & Mineralogy),
N. A. Konstantinova, Dr. Sc. (Biology),
P. R. Makarevich, Dr. Sc. (Biology),
D. V. Makarov, Dr. Sc. (Engineering),
E. P. Martynova, Dr. Sc. (History),
V. A. Masloboev, Dr. Sc. (Engineering),
I. V. Mingalev, Dr. Sc. (Physics & Mathematics),
O. V. Mingalev, Dr. Sc. (Physics & Mathematics),
S. A. Nikonov, Dr. Sc. (History),
I. A. Razumova, Dr. Sc. (History),
A. A. Selin, Dr. Sc. (History),
Yu. P. Shabaev, Dr. Sc. (History),
N. Yu. Shmakova, Dr. Sc. (Biology),
V. B. Belakhovskiy, PhD (Physics & Mathematics),
E. A. Borovichev, PhD (Biology),
D. A. Davidov, PhD (Biology),
D. B. Denisov, PhD (Biology),
I. V. Zenkova, PhD (Biology),
K. S. Kazakova, PhD (History),
D. V. Moiseev, PhD (Geography),
S. V. Mudruk, PhD (Geology & Mineralogy),
K. G. Orlov, PhD (Physics & Mathematics),
E. A. Pivneva, PhD (History),
Yu. V. Fedorenko, PhD (Physics & Mathematics)

Executive Editor

D. V. Moiseev, PhD (Geography)

Founder — Federal State Budget Institution of Science
Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian
Academy of Sciences”

Mass Media Registration Certificate

ПИ No. ФС77-83506 issued by the Federal Service for
Supervision
of Communications, Information Technology and Mass Media
on June, 24 2022

Scientific publication

Technical Editor V. Yu. Zhiganov
Editor S. V. Timofeeva

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia
Tel.: 8 (81555) 7-93-80. Fax: 8 (81555) 7-64-25
E-mail: ksc@ksc.ru, www.ksc.ru

CONTENTS

Bulavina A. S.	An automated algorithm for searching for atlantic current jets in the Barents Sea and calculating their main characteristics in conditions of data scarcity.....	5
Gerasimova M. V., Mityaev M. V.	Changes in the water flow of small watercourses of the Murmansk coast.....	15
Daurtseva A. V., Gorshenina E. V., Obluchinskaya E. D.	Specific features of accumulation of elements, polysaccharides and polyphenols in brown algae of <i>Ascophyllum nodosum</i> (L.) Le Jolis and <i>Fucus disticus</i> (L.) of the Arctic.....	19
Druzhkova E. I., Berchenko I. V., Vashchenko A. V., Venger M. P., Vodopianova V. V., Dvoretzky V. G., Ishkulova T. G., Larionov V. V., Makarevich P. R., Namyatov A. A., Oleinik A. A., Pastuhov I. A., Shirokolobov D. V., Shirokolobova T. I.	Actual aspects of the arctic pelagic zone investigations.....	35
Ivanova N. S., Usyagina I. S.	Dating of sedimentary strata in the southern part of the Grøn fjord, August 2023.....	56
Ilyin G. V., Usyagina I. S.	Dynamics of accumulation of technogenic radionuclides in the sea coast of Murmansk.....	63
Kudryavtseva O. Yu.	Structure and biodiversity of coastal fish in the bays of Eastern Murman during summer 2022.....	75
Kuklin V. V., Kuklina M. M.	Parasitological researches of MMBI RAS in 2020–2024.....	83
Makarevich P. R.	Results of marine expedition research of MMBI RAS in 2020–2024.....	101
Mityaev M. V.	Vertical disdiction of the relief and lineaments of the Rybachy and Sredny peninsulas (Kola Peninsula).....	106
Pakhomov M. V., Zaytsev A. A., Yakovlev A. P., Troshichev A. R., Litvinov Yu. V.	Results of summer tonal audiometry of gray seals.....	124

Научная статья
УДК 551.465.4 (268.45)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.001

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА СТРУЙ АТЛАНТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ И РАСЧЕТА ИХ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ДАННЫХ

Александра Сергеевна Булавина

*Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
bulavina@mmbi.info*

Аннотация

По результатам многолетних наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» определен диапазон колебаний температуры и солености, а также глубина распространения струй атлантических вод. На основании полученных данных разработан алгоритм поиска осевых частей струй атлантических течений на разрезе, записанный на языке R и приводимый в исполнение в программе R-Studio. Вводными для запуска алгоритма являются данные измерений температуры и солености воды на станциях стандартного разреза, полученные в рамках одной или нескольких экспедиций. Результат работы алгоритма содержит диапазон глубин распространения струй атлантической воды, их среднюю температуру и соленость.

Ключевые слова:

Баренцево море, разрез «Кольский меридиан», атлантическая вода

Original article

AN AUTOMATED ALGORITHM FOR SEARCHING FOR ATLANTIC CURRENT JETS IN THE BARENTS SEA AND CALCULATING THEIR MAIN CHARACTERISTICS IN CONDITIONS OF DATA SCARCITY

Aleksandra S. Bulavina

*Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
bulavina@mmbi.info*

Abstract

Based on the results of long-term observations at the «Kola Meridian» section, the range of temperature and salinity fluctuations, as well as the depth of propagation of Atlantic water jets, were determined. Based on this, an algorithm has been developed to search for the axial parts of Atlantic current jets in the «Kola Meridian» section. The algorithm is written in the R language and executed in the R-Studio program. The input data for launching the algorithm is data from measurements of water temperature and salinity at the stations of the section, obtained as part of one or more expeditions. The result of the algorithm contains the depth range of Atlantic water jets, their average temperature and salinity.

Keywords:

Barents Sea, «Kola Meridian» section, Atlantic water

Введение

Баренцево море – шельфовое окраинное море Северного Ледовитого океана. Оно занимает пограничное положение между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном и играет важную роль в водообмене между ними (Никифоров, Шпайхер, 1980; On climatological ..., 2004; Махотин, Иванов, 2016). Изменения температуры, солености и объема атлантических вод, входящих в Баренцево море, оказывают влияние на океанографические условия моря (Boitsov et al., 2012; Воды ..., 2016). Увеличение притока атлантических вод в Баренцево море способствует росту температуры и солености в центральной части моря и в прибрежье Кольского полуострова (Воды ..., 2016).

На пути движения атлантических вод расположен вековой разрез «Кольский меридиан». Он является самым длинным из временных рядов наблюдений за состоянием вод Баренцева моря и удобен для наблюдения за изменениями характеристик атлантических вод и интенсивностью их проникновения в Баренцево море.

Изменения температуры и солености воды на разрезе «Кольский меридиан» используют в качестве индикатора поступления атлантических вод через западную границу Баренцева моря. Рост температуры и солености вод на разрезе, рассчитанных для условно заданного интервала глубин от поверхности до 200 м (реже до 50 или 100 м), часто рассматривается как показатель увеличения притока атлантических вод. В таком случае в интервал глубин попадает не только атлантическая вода. При таком подходе сложно определить стало ли изменение температуры и солености воды следствием изменения объема и характеристик поступающих атлантических вод или это результат влияния других факторов. Решают эту проблему подходы, основанные на оценке скоростей течений и прямого расчета объема атлантической воды, проходящей через определенный створ (Ingvaldsen et al., 2002; Соколов, Гордеева, 2018; Калавиччи, Башмачников, 2019), а также нестандартные подходы, учитывающие точное положение струй атлантической воды (Zaporozhtsev, Moiseev, 2018). При существующих методах расчета, чтобы избежать влияния сезонной изменчивости и получить сравнимые между собой средние годовые значения, необходимо иметь ежегодно данные экспедиций в каждый из сезонов года. Несмотря на регулярные наблюдения на разрезе, для проведения расчетов данных часто оказывается недостаточно, так как большая их часть относится к летнему сезону.

При изучении характеристик вод атлантических течений важно учитывать, что изменения интенсивности их отдельных струй могут происходить несинхронно, перенаправляя соль и тепло в разные районы моря. Была поставлена задача разработать и записать на языке R алгоритм, который позволил бы получить многолетние ряды изменений температуры и солености отдельных струй теплых атлантических течений на разрезе «Кольский меридиан» в условиях дефицита ежегодных всесезонных данных.

Материал и методы

В работе использованы материалы открытой базы океанографических данных (Атлас ..., 2014). Также были привлечены современные данные, полученные в ходе экспедиций Мурманского морского биологического института РАН в 2012–2023 гг.

Стандартный океанографический разрез «Кольский меридиан» расположен к северу от Кольского залива вдоль меридиана 33°30' в. д. от 69°30' до 77°00' с. ш. и включает в себя 16 станций. Этот разрез атлантические воды пересекают четырьмя крупными изолированными относительно друг друга струями теплых течений: Мурманского прибрежного, Мурманского, центральной и северной ветвями Нордкапского течения. Станции 1–3 соответствуют прибрежной ветви Мурманского течения, 4–7 – основной ветви Мурманского течения, 8–11 – центральной ветви Нордкапского течения, 12–16 – северной ветви Нордкапского течения (рис. 1).

Разработка и настройка алгоритма поиска атлантической воды на разрезе «Кольский меридиан» состояла из следующих этапов: 1) выбор теоретических основ алгоритма; 2) разработка программного кода, первичная настройка и отработка ошибок; 3) итоговая настройка алгоритма и оптимизация программного кода.

Ключевым теоретическим основанием при разработке алгоритма стало представление о водных массах океана. Осевые части струй теплых атлантических течений рассматривались как «ядро» атлантической водной массы Баренцева моря. Исходя из этого, был определен ряд частных теоретических оснований:

1. Соотношение температуры и солености является ключевым диагностическим признаком водных масс океана (Штокман, 1943; Мамаев, 1987);
2. Наиболее точно состояние водной массы может быть показано через изменение термохалинных характеристик воды в ее ядре (Штокман, 1943);
3. Ядро водной массы – это объем воды с однородными свойствами, характеризующийся минимальными градиентами основных физических характеристик (Агеноров, 1944);
4. В областях взаимодействия водных масс наблюдается увеличение плотности воды (уплотнение при смешении, вызванное нелинейностью уравнения состояния морской воды) (Зубов, Сабинин, 1958).

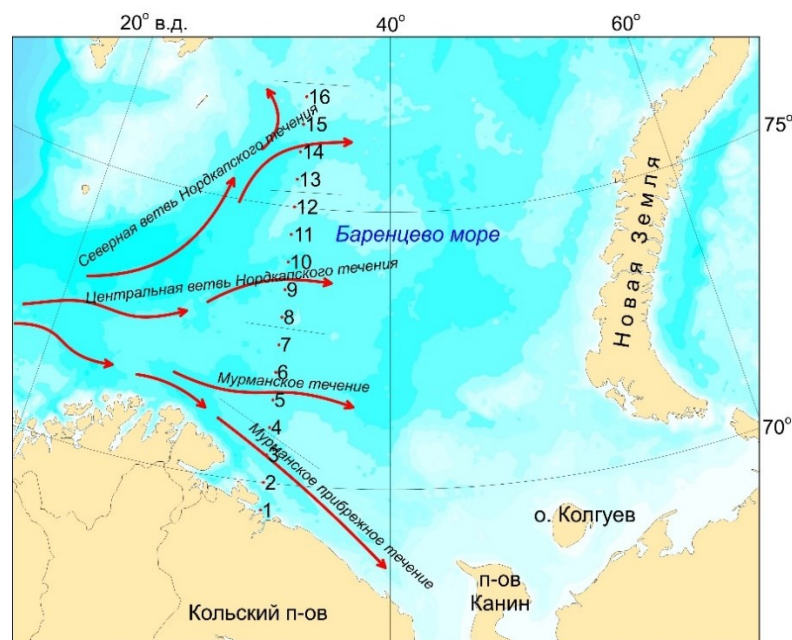


Рис. 1. Стандартный океанографический разрез «Кольский меридиан»

Fig. 1. Standard oceanographic section «Kola Meridian»

Первичный программный код был написан для работы с наиболее простым массивом натуральных данных (однородная дискретность по глубине, отсутствие пропусков). Усложнение кода для возможности работы с неоднородными и неполными данными было проведено после первичной настройки. В качестве входных данных алгоритм принимал данные о температуре и солёности воды с дискретностью по глубине 1 м, полученные для разреза «Кольский меридиан» в рамках одной или нескольких экспедиций. Результат выдачи представлял собой рассчитанные диапазоны глубин распространения атлантических вод и средние значения температуры и солёности воды для осевых частей ветвей атлантических течений в каждой из экспедиций. Алгоритм поиска учитывал такие параметры как температура, солёность и градиент плотности воды. Для «ядра» атлантической водной массы в арктических морях в работе Е. Г. Никифорова и А. О. Шпайхера (1980) приводятся следующие характеристики: температура – 2.25 °C, солёность – 34.98 ‰. Авторы также заключали слово «ядро» в кавычки, указывая на условность этого определения применительно к атлантической воде арктических морей. Разреза «Кольский меридиан» атлантическая вода достигает уже трансформированной относительно ее исходных характеристик, приводимых авторами. Кроме того, могут быть значительные межгодовые колебания с экстремальными значениями температуры и солёности. Исходя из этого, границы поиска были несколько расширены по сравнению с приведенными значениями. Алгоритм был запрограммирован искать значения температуры $T \geq 2$ °C, солёности $S \geq 34.8$ ‰. Учитывая, что ядро водной массы – это объем воды с однородными свойствами, характеризующийся минимальными градиентами основных физических характеристик (Агеноров, 1944), в качестве критерия принадлежности измерения к ядру атлантической водной массы выступали локальные минимумы вертикальных градиентов плотности. Однородным по вертикали признавался объем воды, в котором вертикальные градиенты плотности не превышали 0.0005 ед. усл. плотности/м.

При заданных условиях алгоритм выдавал ошибки, связанные с сезонным прогревом поверхности и интенсивным конвективным или ветровым перемешиванием. Кроме этого, алгоритм не мог обнаружить атлантическую воду северной ветви Нордкапского течения, так как северной части разреза атлантическая вода достигает уже значительно охлажденной. Необходимо было уточнить глубину поиска «ядра» атлантической водной массы, чтобы избежать захвата верхнего перемешанного слоя, а также дифференцировать критерии поиска для каждой из струй атлантических течений.

Согласно определению, приведенному А. Д. Добровольским (1961), водная масса должна иметь в течение длительного времени стабильные физические характеристики. Таким образом, критерием присутствия атлантической воды можно считать постоянство температурных и соленостных характеристик в течение всего года независимо от сезонных процессов. Для каждой станции разреза были рассчитаны средние сезонные значения температуры и солености по глубине с дискретностью 1 м за 2012–2023 гг. Проведено сравнение сезонных профилей указанных характеристик и найдены участки, где сезонные различия температуры воды не превышали 0.5°C , а солености – 0.05 psu. Это позволило выделить три изолированных области проникновения атлантических вод в Баренцево море, соответствующие северной и центральной ветвям Нордкапского течения, а также Мурманскому течению. В районе Мурманского прибрежного течения сезонная изменчивость оказалась слишком велика, чтобы поступающие атлантические воды сохраняли свою идентичность в течение всего года (рис. 2).

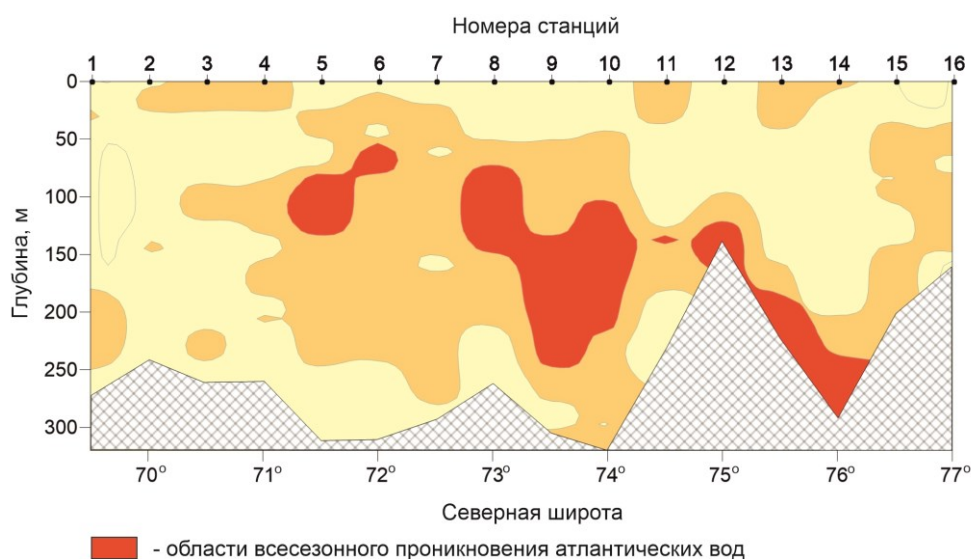


Рис. 2. Области постоянного проникновения атлантических вод в Баренцево море на разрезе «Кольский меридиан» (2012–2023 гг.)

Fig. 2. All-season areas of Atlantic water penetration into the Barents Sea in the «Kola Meridian» section (2012–2023)

Были определены участки и глубины, на которых струи атлантической воды сохраняют стабильные характеристики в течение всех сезонов года. Для каждой из областей проникновения атлантических вод были рассчитаны средние значения температуры и солености (табл. 1). Полученные глубины совпадают с диапазоном таковых расположения ядер атлантической воды, указанным для разреза «Кольский меридиан» в работе М. С. Махотина и В. В. Иванова (2016).

В алгоритм идентификации был добавлен дифференцированный по станциям учет глубины, температуры и солености воды. С учетом возможных межгодовых колебаний температуры и солености границы поиска по температуре и солености были расширены по сравнению с минимальными и максимальными значениями, приведенными в табл. 1. Требования к градиенту плотности остались без изменений – ≤ 0.0005 ед. усл. плотности/м. Итоговые настройки алгоритма приведены в табл. 2.

После уточнения критериев поиска в алгоритм была добавлена возможность работы с данными различной дискретности по глубине. При отсутствии дискретности данных в 1 м алгоритм интерполировал температуру и соленость по глубине между имеющимися значениями и только после этого выполнял поиск осевых частей струй атлантической воды. В случае необходимости интерполяции в результате выдачи присутствовало указание, что данные были интерполированы.

Таблица 1

**Средние характеристики осевых частей струй атлантических течений
на разрезе «Кольский меридиан» (2012–2023 гг.)**

Table 1

Average characteristics of the axial parts of Atlantic current jets in the «Kola Meridian» section (2012–2023)

Течение	Температура, °C	Соленость, psu	Глубина, м
Мурманское	4.59 ± 0.19 4.04 – 5.38	34.81 ± 0.11 34.63 – 34.93	55–135
Нордкапское центральная ветвь	2.98 ± 0.34 1.46 – 3.95	34.99 ± 0.01 34.95 – 35.01	75–250
северная ветвь	1.34 ± 0.29 0.23 – 2.05	34.98 ± 0.10 34.95 – 35.00	120–240

ПРИМЕЧАНИЕ. Числитель – среднее значение±стандартное отклонение, знаменатель – минимальное и максимальное значения.

Таблица 2

Требования к поиску осевых частей струй атлантических течений на разрезе «Кольский меридиан»

Table 2

Requirements for the search of axial parts of Atlantic current jets in the «Kola Meridian» section

Течение	Станции разреза	Температура, °C	Соленость, psu	Глубина, м	Градиент плотности, ед. усл. плотности/м
Мурманское	4–7	≥ 3.5	≥ 34.6	55–135	≤ 0.0005
Нордкапское центральная ветвь	8–11	≥ 1	≥ 34.9	75–250	≤ 0.0005
северная ветвь	12–16	≥ 0	≥ 34.9	120–240	≤ 0.0005

Результаты и обсуждение

При помощи алгоритма были рассчитаны глубины прохождения струй Мурманского и Нордкапского течений с 1980 по 2023 гг., а также средние годовые значения температуры и солености воды в их осевых частях. Была выполнена проверка того, как после итоговой настройки алгоритм справляется с определением глубины залегания «ядра» атлантической воды. В пределах найденного диапазона глубин алгоритм рассчитывает остальные параметры, и ошибка в глубине может сказаться на результатах расчета температуры и солености. Согласно настройкам, алгоритм не может вести поиск «ядра» за пределами диапазона глубин, для которых эмпирически было установлено отсутствие сезонных колебаний температуры и солености (табл. 2). Результат выдачи никогда не выйдет за пределы заложенного в настройках диапазона глубин, но может быть сужен по итогам проверки остальных параметров поиска. Ограничение было введено, чтобы получать характеристики струй атлантических вод очищенными от сезонной составляющей. Это дает возможность характеризовать межгодовые изменения при отсутствии ежегодных всесезонных данных. Вместе с тем, подобного рода ограничение может приводить к тому, что алгоритм выведет из расчета часть данных, относящихся к «ядру» атлантической водной массы только по причине несоответствия глубины.

Для проверки работы алгоритма были использованы данные 48 экспедиций, полученные на разрезе «Кольский меридиан». В 24 массивах экспедиционных данных дискретность измерения температуры и солености составила 1 м, параметры не требовали интерполяции, в 24 массивах параметры были определены только на стандартных горизонтах и алгоритм заполнил пробелы посредством интерполяции. По данным каждой экспедиции вертикальные границы атлантической водной массы были определены при помощи классического *TS*-анализа, а затем внутри этих границ

выделены осевые части струй атлантической воды по критерию минимального градиента плотности. Результаты ручного расчета и работы алгоритма были сопоставлены. Аналогично терминологии, используемой при проверке статистических гипотез, ошибкой второго рода считались ситуации, когда алгоритм ошибочно пропускал наличие атлантической воды на некоторых глубинах. Ситуации, когда алгоритм находил атлантическую воду при ее отсутствии, считались ошибкой первого рода. Ошибки первого рода не были выявлены. Вероятно, их отсутствие стало возможным благодаря очень жестким требованиям к физическим характеристикам атлантической воды. Ошибки второго рода составляли 13 % от общего числа случаев определения и связаны с ограничением глубин поиска атлантической воды. Алгоритм определял факт наличия атлантической воды, но не брал в расчет часть данных из-за установленных ограничений по глубине поиска. При возникновении ошибки второго рода в 89 % случаев она была связана с определением верхней границы «ядра» атлантической водной массы и в 11 % случаев – нижней ее границы. При возникновении ошибки расхождение в глубине с результатом классического *TS*-анализа не превышало 20 м (табл. 3). Ошибочный вывод из расчета части данных не оказывал значимого влияния на получаемые расчетные величины температуры и солёности, так как искомые области – это участки с минимальными градиентами физических характеристик.

Таблица 3

Усредненные величины расхождения результатов работы алгоритма и классического *TS*-анализа

Table 3

The average values of the discrepancy between the results of the algorithm and the classical *TS*-analysis

Параметр	Мурманское течение	Нордкапское течение	
		центральная ветвь	северная ветвь
Верхняя граница «ядра» атлантической водной массы, м	14.77	11.24	7.47
Нижняя граница «ядра» атлантической водной массы, м	5.34	5.21	0.74
Средняя температура воды в «ядре», °C	0.002	0.001	0.001
Средняя солёность воды в «ядре», psu	0.0001	0.0001	0.0001

Современных исследований, в которых были выполнены расчеты температуры и солёности для отдельных струй атлантических течений, крайне мало. В работе А. Г. Трофимова (2021) приведены аномалии температуры и солёности воды на разрезе «Кольский меридиан» (основная ветвь Мурманского течения), рассчитанные для слоя 0–200 м. Полученные нами ряды температуры и солёности осевой части струи Мурманского течения были использованы для составления рядов аномалий.

Аномалии были рассчитаны аналогично работе А. Г. Трофимова (2021) относительно 1981–2010 гг. и сопоставлены с представленными. Эти данные не могут подлежать прямому сравнению, так как слой от 0 до 200 м захватывает струю атлантических вод, но также он захватывает поверхностный слой и иногда придонные воды. Значимой корреляции между рядами аномалий температур не было обнаружено, однако долгосрочные тенденции были схожи. Принятые к сопоставлению ряды аномалий температуры воды имели тенденцию к увеличению, а с начала XXI века положительные аномалии температуры воды стали преобладать над отрицательными. В многолетнем ходе аномалий солёности атлантических вод А. Г. Трофимов (2021) выделил три периода: 1981–2011 гг. – увеличение солёности, 2011–2016 гг. – снижение солёности, 2016–2020 гг. – фиксация солёности на низком уровне. В ряду аномалий, рассчитанном по результатам работы алгоритма, указанные периоды не могут быть выделены. В работе А. Г. Трофимова (2021) средние характеристики атлантических вод испытывали влияние изменчивости характеристик включенного в расчеты поверхностного слоя, в то время как результат работы алгоритма исключает такое влияние. Таким образом, причиной несоответствия полученных нами и опубликованных данных (Трофимов, 2021) могут быть значительные колебания солёности поверхностного слоя, связанные с колебаниями речного стока и испарения.

Средняя годовая температура воды ветвей атлантических течений в слоях 0–50 и 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» используется в Полярном филиале ФГБУН «ВНИРО» (ПИНРО) для анализа колебаний температуры атлантической воды Баренцева моря. Данные о температуре воды в районах прохождения Мурманского прибрежного, Мурманского и центральной ветви Нордкапского течений, рассчитанные для слоев 0–50 и 0–200 м, представлены на сайте (<http://www.pinro.vniro.ru/ru/>, 15.07.2021). Температура воды в районах прохождения вышеуказанных течений в 1980–2020 гг. имела статистически значимый положительный тренд как в слое 0–50 м, так и в слое 0–200 м. Рост температуры в этих слоях происходил с почти одинаковой интенсивностью, но большей, чем повышение температуры осевых частей струй атлантических вод, рассчитанное по данным алгоритма. Это может свидетельствовать о том, что значительную роль в повышении температуры вод Баренцева моря, наряду с прямым влиянием увеличения адвективного потока тепла атлантических течений, играют и другие факторы. Вероятно, важным в повышении температуры вод Баренцева моря по всей толще является реализация обратных связей в системе океан–атмосфера. В последние десятилетия наблюдается существенный рост температуры воздуха и сокращение площади льдов в Баренцевом море (Ingvaldsen et al., 2002; Boitsov et al., 2012; Трофимов и др., 2018).

В работе А. А. Соколова и С. М. Гордеевой (2018) был рассчитан адвективный поток тепла, поступающий с атлантической водой через меридиональный разрез по 16.5° в. д. в бассейн Баренцева моря за 1980–2015 гг. В расчетах учитывалась как температура воды, так и объем воды, прошедший через исследуемый створ. Было выделено три струи атлантических вод и рассчитан поток тепла, поступающий в Баренцево море с каждой из них. Южная струя находится у побережья Норвегии на 69.5–71.5° с. ш. Второй (центральный) поток расположен в зоне 72–74° с. ш. и распространяется вдоль Медвежинского желоба. Самая северная струя располагается на 74.5–76° с. ш. в Зюйдкапском желобе. Авторы показали, что на меридиональном разрезе положительные тренды теплового потока присутствуют во всех трех струях. Положительные тренды потока тепла в центральной и северной струях в период наблюдений были обусловлены увеличением как скорости течений, так и ростом температуры воды. Поток воды, проходящий через южную часть разреза, напротив, ослабел с 1980 по 2015 гг. Поток тепла с южной струей при этом не снизился за счет повышения температуры воды. Авторы приводят величины трендов температуры для каждой из струй. Южная струя, двигаясь на восток, образует прибрежное Мурманское и Мурманское течения, а центральная разделяется на центральную и северную ветви Нордкапского течения. Тренды температуры воды, полученные по данным работы алгоритма на разрезе «Кольский меридиан» для Мурманского и центральной ветви Нордкапского течения, значимы и близки к приведенным для южной и центральной струй на разрезе по 16.5° в. д. Тренд температуры воды северной ветви Нордкапского течения незначим. Причиной этого могло стать влияние сложного взаимодействия различных типов вод в этой области.

Заключение

Разработан специальный алгоритм поиска струй атлантических течений на разрезе «Кольский меридиан», записанный на языке R и приводимый в исполнение в программе R-Studio. Результаты выдачи не имеют значимых расхождений с таковыми, получаемыми вручную при помощи классического *TS*-анализа. Достоинством алгоритма является возможность рассчитывать средние годовые значения температуры и солёности осевых частей струй атлантических течений при наличии данных всего одной экспедиции в году.

Были определены средние годовые температура и солёность осевых частей струй Мурманского и Нордкапского течений в 1980–2023 гг. Полученные данные не подлежат прямому сравнению с традиционно рассчитываемыми температурой и солёностью слоя 0–200 м, а также с данными о колебаниях адвективного теплового потока струй атлантических течений. Однако, основные тенденции в изменении температуры и солёности струй атлантических течений, полученные по результатам работы алгоритма, соответствуют тенденциям, установленным другими методами.

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ госрегистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Агеноров В. К. Об основных водных массах в гидросфере // Изв. АН СССР. Сер. географическая и геофизическая. 1944. Т. 8, № 6. С. 359–380.
2. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013) / Г. Г. Матишов, С. В. Бердников, А. П. Жичкин и др. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.
3. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В. К. Ожигин, В. А. Ившин, А. Г. Трофимов, А. Л. Карсаков, М. Ю. Анциферов. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2016. 260 с.
4. Добровольский А. Д. Об определении водных масс // Океанология. 1961. Т. 1, № 1. С. 12–24.
5. Zubov N. N., Sabinin K. D. Вычисление уплотнения при смешении морских вод. М.: Гидрометеиздат, 1958. 37 с.
6. Калавиччи К. А., Баимачников И. Л. К механизму положительной обратной связи долгосрочной изменчивости конвергенции океанических и атмосферных потоков тепла и площади ледяного покрова в Баренцевом море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55(6). С. 640–649. URL: <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556171-181>
7. Мамаев О. И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 296 с.
8. Махотин М. С., Иванов В. В. Распространение атлантических водных масс в Баренцевом море по данным наблюдений и численного моделирования // Тр. Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 361. С. 169–191.
9. Никифоров Е. Г., Шнайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
10. Соколов А. А., Гордеева С. М. Изменение адвекции тепла в Баренцево море // Российская Арктика. 2018. № 4. С. 34–45. URL: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00004>
11. Трофимов А. Г. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря // Тр. ВНИРО. 2021. Т. 186, № 4. С. 101–118. URL: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-101-118>
12. Трофимов А. Г., Карсаков А. Л., Ившин В. А. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Тр. ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 79–91. URL: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2018-173-79-91>
13. Штокман В. Б. Основы теории TS-кривых как метода изучения перемешивания и трансформации водных масс моря // Проблемы Арктики. 1943. № 1. С. 32–71.
14. Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. Mar. Sci. 2012. Vol. 69, № 5. P. 833–840. URL: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss075>
15. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s / R. Ingvaldsen, H. Loeng, G. Ottersen, B. Adlandsvik // ICES Mar. Sci. Symp. 2003. Vol. 219. P. 160–168.
16. Ingvaldsen R., Loeng H., Asplin L. Variability in the Atlantic inflow to the Barents Sea based on a one-year time series from moored current meters // Cont. Shelf Res. 2002. Vol. 22. P. 505–519. URL: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00070-X)
17. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation / W. Maslowski, D. Marble, W. Walczowski, U. Schauer, J. L. Clement, A. J. Semtner // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109, Article: C03032. URL: <https://doi.org/10.1029/2001JC001039>
18. Zaporozhtsev I., Moiseev D. Calculation of atlantic waters inflow and polar front position in the Barents Sea with long-term data on Kola Transect: 2018 4th International Symposium on Geoinformatics (Malang, 10–12 November 2018). Malang, Indonesia, 2018. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/ISYG.2018.8611861>

References

1. Agenorov V. K. Ob osnovnykh vodnykh massakh v gidrosfere [About the main water masses in the hydrosphere]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya* [Izvestiya of the USSR Academy of Sciences. Geographical and geophysical series], 1944, Vol. 8, No. 6, pp. 359–380 (In Russ.).
2. Matishov G. G., Berdnikov S. V., Zhichkin A. P. et al. *Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bol'shikh morskikh ekosistemakh Severnogo polushariya (1878–2013)* [Atlas of climate change in large marine ecosystems of the Northern Hemisphere (1878–2013)]. Rostov-on-Don, Publ. SSC RAS, 2014, 256 p. (In Russ.).
3. Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G., Karsakov A. L., Antsiferov M. Yu. *Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost'* [Waters of the Barents Sea: structure, circulation, variability]. Murmansk, Publ. PINRO, 2016, 260 p. (In Russ.).
4. Dobrovol'skiy A. D. Ob opredelenii vodnykh mass [On the determination of water masses]. *Okeanologiya* [Oceanology], 1961, Vol. 1, No. 1, pp. 12–24 (In Russ.).
5. Zubov N. N., Sabinin K. D. *Vychislenie uplotneniya pri smeshenii morskikh vod* [Calculation of compaction during mixing of seawater]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1958, 37 p. (In Russ.).
6. Kalavichchi K. A., Bashmachnikov I. L. K mekhanizmu polozhitel'noy obratnoy svyazi dolgosrochnoy izmenchivosti konvergentsii okeanicheskikh i atmosferykh potokov tepla i ploshchadi ledyanogo pokrova v Barentsevom more [On the mechanism of a positive feedback in long-term variations of the convergence of oceanic and atmospheric heat fluxes, and the ice cover in the Barents Sea]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya RAS. Atmospheric and ocean physics], 2019, Vol. 55(6), pp. 640–649 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556171-181>
7. Mamaev O. I. *Termokhalinnyy analiz vod Mirovogo okeana* [Thermohaline analysis of the waters of the World Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 296 p. (In Russ.).
8. Makhotin M. S., Ivanov V. V. Rasprostranenie atlanticheskikh vodnykh mass v Barentsevom more po dannym nablyudeniya i chislennogo modelirovaniya [Distribution of atlantic water masses in the Barents Sea according to observations and numerical modeling]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii* [Transactions of the Hydrometeorological Research Center of Russian Federation], 2016, No. 361, pp. 169–191 (In Russ.).
9. Nikiforov E. G., Shpaykher A. O. *Zakonomernosti formirovaniya krupnomasshtabnykh kolebaniy gidrologicheskogo rezhima Severnogo Ledovitogo okeana* [Patterns of formation of large-scale fluctuations in the hydrological regime of the Arctic Ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 269 p. (In Russ.).
10. Sokolov A. A., Gordeeva S. M. Izmenenie adveksii tepla v Barentsevo more [Change of heat advection to the Barents Sea]. *Rossiyskaya Arktika* [The Russian Arctic], 2018, No. 4, pp. 34–45 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00004>
11. Trofimov A. G. Sovremennye tendentsii izmeneniya okeanograficheskikh usloviy Barentseva morya [The current trends in oceanographic conditions of the Barents Sea]. *Trudy VNIRO* [Transactions of VNIRO], 2021, Vol. 186, No. 4, pp. 101–118 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-101-118>
12. Trofimov A. G., Karsakov A. L., Ivshin V. A. Izmeneniya klimata v Barentsevom more na protyazhenii poslednego poluveka [Climate changes in the Barents Sea over the last half century]. *Trudy VNIRO* [Transactions of VNIRO], 2018, Vol. 173, pp. 79–91 (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2018-173-79-91>
13. Shtokman V. B. Osnovy teorii TS-krivyykh kak metoda izucheniya peremeshivaniya i transformatsii vodnykh mass morya [Fundamentals of the theory of TS-curves as a method for studying mixing and transformation of sea water masses]. *Problemy Arktiki* [Problems of the Arctic], 1943, No. 1, pp. 32–71 (In Russ.).

14. Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009. ICES J. Mar. Sci., 2012, Vol. 69, No. 5, pp. 833–840. Available at: <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss075>
15. Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Adlandsvik B. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s. ICES Mar. Sci. Symp., 2003, Vol. 219, pp. 160–168.
16. Ingvaldsen R., Loeng H., Asplin L. Variability in the Atlantic inflow to the Barents Sea based on a one-year time series from moored current meters. Cont. Shelf Res., 2002, Vol. 22, pp. 505–519. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00070-X)
17. Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J. L., Semtner A. J. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation. J. Geophys. Res., 2004, Vol. 109, Article: C03032. Available at: <https://doi.org/10.1029/2001JC001039>
18. Zaporozhtsev I., Moiseev D. Calculation of atlantic waters inflow and polar front position in the Barents Sea with long-term data on Kola Transect: 2018 4th International Symposium on Geoinformatics (Malang, 10–12 November 2018). Malang, Indonesia, 2018, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/ISYG.2018.8611861>

Информация об авторе

Александра Сергеевна Булавина – кандидат географических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-1173-9324>

Information about the author

Aleksandra S. Bulavina – PhD (Geography), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1173-9324>

Статья поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.
The article was submitted 09.04.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 05.05.2025.

Научная статья
УДК 556.12; 556.532 (268.45)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.002

ИЗМЕНЕНИЕ ВОДНОГО СТОКА МАЛЫХ ВОДОТОКОВ МУРМАНСКОГО БЕРЕГА

Марина Васильевна Герасимова, Максим Валентинович Митяев

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
gerasimova@mmbi.info

Аннотация

За 25 лет годовой сток восьми малых водотоков в центральном районе Мурманского берега уменьшился на 20 %, его зимняя составляющая снизилась на 10%. Наибольшие изменения водного стока произошли в меженные периоды: в зимнюю межень (февраль–апрель) сток уменьшился на 14 %, а в летнюю межень (июнь–июль) снизился на 7 %.

Ключевые слова:

водный сток, зимний водный сток, малые водотоки, Мурманский берег

Original article

CHANGES IN THE WATER FLOW OF SMALL WATERCOURSES OF THE MURMANSK COAST

Marina V. Gerasimova, Maxim V. Mityaev

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
gerasimova@mmbi.info

Abstract

Over twenty-five years, the annual flow of eight small streams in the central region of the Murmansk coast has decreased by 20 %, and its winter component has decreased by 10 %. The greatest changes in water flow occurred during low-water periods: in the winter low-water period (February–April) the flow decreased by 14 %, and in the summer low-water period (June–July) it decreased by 7 %.

Keywords:

water runoff, winter water runoff, small streams, Murmansk coast

Введение

Изменение водного стока с континентов оказывает влияние не только на климат, но и на мощность ледового покрова арктических морей (Шикломанов, Шикломанов, 2003). В последние пятьдесят лет на большей части арктической и субарктической зоны России годовой материковый сток постоянно увеличивается, особенно зимняя его составляющая (Симонов, Христофоров, 2005). Наблюдения за стоком малых водотоков в центральной части Мурманского берега выявили принципиальные отличия от глобальной закономерности – материковый сток малых водотоков уменьшается, в том числе снижается сток за холодный период года.

Материал и методы

Расчет количества атмосферных осадков осуществлялся по данным стационарной метеостанции в н. п. Дальние Зеленцы (Мурманская область). Водный сток определяли через скорость течения воды и площадь сечения русла в замыкающем створе выше сизигийного прилива. Скорость течения воды измерялась поплавковым методом (не менее трех замеров), а площадь сечения русла – прямым замером через ширину и глубину водотока. Замеры водного стока в меженные периоды проводили не реже 1 раза в месяц (с октября по апрель и с июня по август), в паводковые периоды – не реже 4 раз в месяц (в 1998, 2001, 2005 и 2007 гг. замеры стока в весенний паводок выполняли 1 раз в два дня, а в осенний паводок – 1 раз в сутки).

Исследовали водный сток малых водотоков (ручьев) от р. Воронья на западе до р. Зарубиха на востоке (рис. 1).



Рис. 1. Схема района исследований малых водотоков:

1 – Хохрячий, 2 – Столбовой, 3 – Ярнышный, 4 – Евтюковский, 5 – Зеленецкий, 6 – Порчнихский, 7 – Собачий ручьи; 8 – р. Зарубиха

Fig. 1. Scheme of the study area:

1 – Khokhryachiy, 2 – Stolbovoy, 3 – Yarnyshny, 4 – Evtyukovsky, 5 – Zelenetsky, 6 – Porchnikhsky, 7 – Sobachy streams; 8 – Zarubikha River

Результаты

По результатам 25-летнего мониторинга среднемноголетний годовой сток восьми малых водотоков Мурманского берега составляет $(89 \pm 2) \cdot 10^{-2}$ км³/год, изменяясь от $70 \cdot 10^{-2}$ до $110 \cdot 10^{-2}$ км³/год (рис. 2А). Наибольший водный сток наблюдался в 1997–2000 гг. – в среднем $(104 \pm 3) \cdot 10^{-2}$ км³/год. Наименьший расход воды отмечается в последние годы (2018–2022) – в среднем $(82 \pm 3) \cdot 10^{-2}$ км³/год. Таким образом, в течение 25 лет водный сток постоянно уменьшался (рис. 2Б), и в последние годы он не превышает 80 % от среднегодового стока, наблюдавшегося в конце прошлого века.

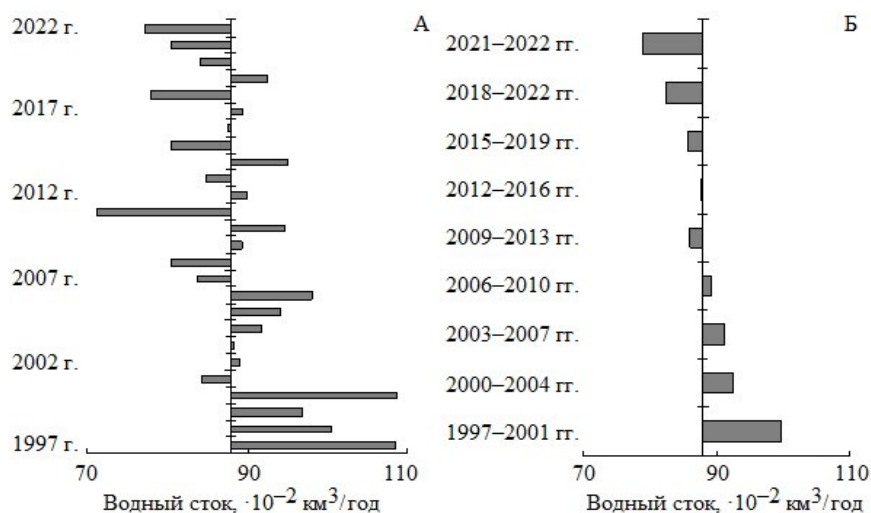


Рис. 2. Годовой водный сток:

А – годовой расход воды, Б – осредненный по 5 годам водный сток (шаг – 3 года)

Fig. 2. Annual water flow:

А – annual water consumption, Б – water flow averaged over 5 years (step three years)

Из года в год происходили резкие изменения зимней составляющей годового водного стока (рис. 3А). В настоящее время среднееголетняя зимняя часть годового стока в районе исследований составляет $(28 \pm 0.5) \cdot 10^{-2} \text{ км}^3$ за холодный сезон (от $24 \cdot 10^{-2}$ до $34 \cdot 10^{-2} \text{ км}^3$), но в конце прошлого века зимний сток был больше $30 \cdot 10^{-2} \text{ км}^3$, а за последние 5 лет он уменьшился до $(27 \pm 0.6) \cdot 10^{-2} \text{ км}^3$. Необходимо отметить, что за предыдущие 15 лет зимний водный сток интенсивно снижается, в последние годы он не превышает 90 % от среднего сезонного стока, наблюдавшегося в конце первого десятилетия XXI века (рис. 3Б).

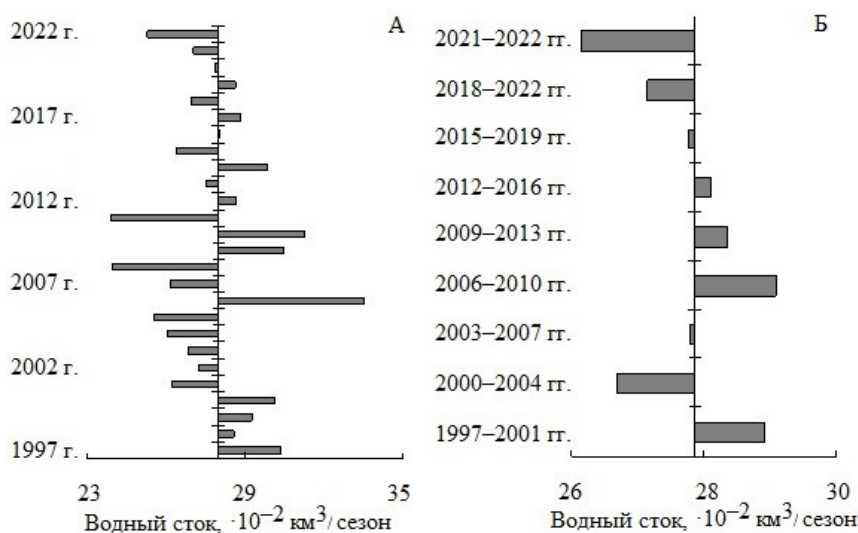


Рис. 3. Зимний водный сток:

А – расход воды, Б – осредненный по 5 годам водный сток (шаг – 3 года)

Fig. 3. Winter water flow:

А – winter water flow, Б – winter water flow averaged over 5 years (step three years)

Выявлено, что годовой водный сток малых водотоков с Мурманского берега не зависит от его зимней составляющей (коэффициент корреляции $r = 0.158$), а во многом определяется объемом стока в весенний паводок. При этом годовой водный сток сильно зависит от годовой суммы атмосферных осадков ($r = 0.754$, $k = 23$).

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ госрегистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Симонов Ю. А., Христофоров А. В. Анализ многолетних изменений колебаний стока рек бассейна Северного Ледовитого океана // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. С. 645–652.
2. Шикломанов И. А., Шикломанов А. И. Изменения климата и динамика притока речных вод в Северный Ледовитый океан // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, № 6. С. 645–654.

References

1. Simonov Yu. A., Khristoforov A. V. Analiz mnogoletnikh izmeneniy kolebaniy stoka rek basseyna Severnogo Ledovitogo okeana [Analysis of long-term fluctuations in the flow of rivers in the Arctic Ocean basin]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2005, Vol. 32, No. 6, pp. 645–652 (In Russ.).

2. Shiklomanov I. A., Shiklomanov A. I. *Izmeneniya klimata i dinamika pritoka rechnykh vod v Severnyy Ledovityy okean* [Climate change and dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2003, Vol. 30, No. 6, pp. 645–654 (In Russ.).

Информация об авторах

Марина Васильевна Герасимова – кандидат географических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-2273-617X>

Максим Валентинович Митяев – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0003-3059-6469>

Information about the authors

Marina V. Gerasimova – PhD (Geography), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2273-617X>

Maxim V. Mityaev – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3059-6469>

Статья поступила в редакцию 06.03.2025; одобрена после рецензирования 17.04.2025; принята к публикации 29.04.2025.
The article was submitted 06.03.2025; approved after reviewing 17.04.2025; accepted for publication 29.04.2025.

Научная статья
УДК 57.044
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.003

ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ В НАКОПЛЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОЛИСАХАРИДОВ И ПОЛИФЕНОЛОВ У БУРЫХ ВОДОРОСЛЕЙ *ASCOPHYLLUM NODOSUM* (L.) LE JOLIS И *FUCUS DISTICHUS* (L.) АРКТИКИ

**Анна Васильевна Даурцева^{1,2}, Елена Вячеславовна Горшенина^{1,2},
Екатерина Дмитриевна Облучинская^{1,2}**

¹Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия

²Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия

tav.mmbi@yandex.ru, gev1811@yandex.ru, okaterine@yandex.ru

Аннотация

Представлены результаты сравнительного анализа содержания полисахаридов, полифенолов и элементов у близкородственных видов бурых водорослей *Ascophyllum nodosum* и *Fucus distichus* из Норвежского и Баренцева морей. Показаны различия в содержании этих компонентов в водорослях из разных мест обитания. Отмечена сильная корреляционная связь содержания Ва с Ас как у *A. nodosum* ($r = -0.84$, $p < 0.05$), так и у *F. distichus* ($r = 0.99$, $p < 0.05$) и обнаружены видоспецифичные взаимосвязи накопления биологически активных веществ и элементов.

Ключевые слова:

Ascophyllum nodosum, *Fucus distichus*, альгинат, фукоидан, полифенолы, элементы

Original article

SPECIFIC FEATURES OF ACCUMULATION OF ELEMENTS, POLYSACCHARIDES AND POLYPHENOLS IN BROWN ALGAE OF *ASCOPHYLLUM NODOSUM* (L.) LE JOLIS AND *FUCUS DISTICUS* (L.) OF THE ARCTIC

Anna V. Daurtseva^{1,2}, Elena V. Gorshenina^{1,2}, Ekaterina D. Obluchinskaya^{1,2}

¹Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia

²Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

tav.mmbi@yandex.ru, gev1811@yandex.ru, okaterine@yandex.ru

Abstract

Ascophyllum nodosum and *Fucus distichus* are closely related species of brown algae that inhabit similar conditions. Their chemical composition depends on their habitat and physiological characteristics. The aim of the work is to compare the content of polysaccharides, polyphenols and elements in these species from the Norwegian and Barents seas. The article describes the differences in the content of the above components in the studied algae from different habitats. For the first time, a strong correlation was found between the content of Ba and As for both species ($r = -0.84$ for *A. nodosum* and 0.99 for *F. distichus* at $p < 0.05$), and species-specific relationships between the accumulation of biologically active substances and elements were revealed.

Keywords:

Ascophyllum nodosum, *Fucus distichus*, alginate, fucoidan, polyphenols, elements

Введение

Ascophyllum nodosum (L.) Le Jolis и *Fucus distichus* (L.) – близкородственные виды бурых водорослей из семейства Fucaceae, они широко распространены в сублиторальной и литоральной зонах северных морей и характеризуются высокой способностью накапливать полисахариды (альгинаты, фукоидан), полифенолы и связывать металлы. Однако их химический состав и способность поглощать элементы варьируют в зависимости от экологических условий и физиологических особенностей вида.

Данные фукоиды (рис. 1) отличаются в первую очередь своей морфологией. Так фукус двухрядный (двусторонний) имеет среднюю жилку и не имеет воздушных пузырей, однако иногда встречаются воздушные полости (вздутия), расположенные часто попарно по обе стороны срединной жилки. Кусты *F. distichus* в длину обычно до 50 см, ветви узкие или широкие, плоские (Шошина, Капков, 2014).

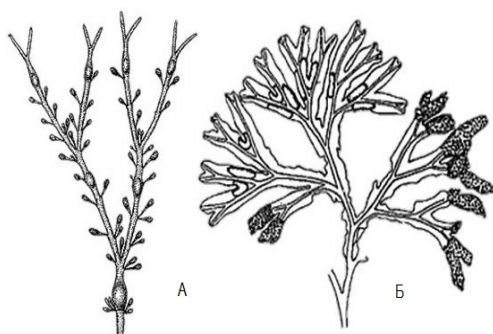


Рис. 1. *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (А) и *Fucus distichus* (L.) (Б) (Кузнецов, 1960)

Fig. 1. *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (A) and *Fucus distichus* (L.) (B) (Kuznetsov, 1960)

Аскофиллум узловатый – раздельнополый двудомный фукоид, имеющий крупное слоевище, до 1.5 м в длину, со сдавленно цилиндрическими, дихотомически и неправильно разветвленными мясистыми ветвями, без срединной жилки, с крупными одиночными пузырями.

Развитие воздушных полостей у *F. distichus* происходит как метаморфоз кончиков ранее недифференцированных ветвей. Возможно, не случайно воздушные полости у *F. distichus* парные по обе стороны от срединной жилки, так что транспорт питательных веществ, нарастающий в направлении от вершины к основанию, не затрудняется. Отсутствие средней жилки и равномерно расположенные воздушные пузыри у *A. nodosum* предполагают, что передвижение веществ происходит медленнее, каждый сегмент таллома должен быть фотосинтетически самостоятельным. Допускают, что транспорт веществ у *A. nodosum* апопластический (Penot, Penot, 1977) и не осуществляется на большие расстояния по таллосу (Kim, Garbary, 2009).

У рассматриваемых видов водорослей присутствуют две существенно отличающиеся физиологические стратегии. Для *A. nodosum* характерны медленный рост и размножение, жизненный цикл составляет 10–15 лет (Кузнецов, 1960; Eckersley, Garbary 2007), ткани остаются фотосинтетически активными в течение многих лет (Kim, Garbary, 2009). Этот вид формирует густые заросли, которые служат убежищем для множества морских организмов. *Fucus distichus* растет и размножается быстрее, средняя продолжительность жизни 3 года (Кашутин, 2021), устойчив к сильным волнам благодаря плоской и жесткой структуре. Рецептакулы аскофиллума развиваются по бокам ветвей на специальных коротких веточках, у фукуса они вытянутые, уплощенные, развиваются на концах ветвей.

Бурые водоросли являются продуцентами биологически активных веществ (БАВ), качественные и количественные характеристики которых изменяются в зависимости от видовой принадлежности, условий произрастания (таблица).

Содержание БАВ в водорослях из различных местообитаний, % от а.с.м.
Content of biologically active substances in *Ascophyllum nodosum* and *Fucus distichus*
from different habitats, % dry weight (DW)

Вещество	<i>Ascophyllum nodosum</i>	<i>Fucus distichus</i>	Литературный источник
Фукоидан	10.0–14.8	14.6–21.5	Клиндух, Облучинская, 2013; Облучинская, Рыжик, 2014; Catarino et al., 2018
Альгинат	11.2–33.0	9.6–23.6	Репина, 2005; Облучинская, Рыжик, 2014; Catarino et al., 2018
Полифенолы	1.3–14.8	1.6–7.1	Клиндух, Облучинская, 2013; Ткач, Облучинская, 2017
Общая зола	15.6–25.0	15.0–25.0	Облучинская, Рыжик, 2014; Лобус, Удалов, 2021
Йод	0.03–0.11	0.06–0.16	Репина, 2005; Облучинская, 2005; Облучинская, Рыжик, 2014
Маннит	5.0–12.0	8.7–11.6	Клиндух, Облучинская, 2013; Облучинская, Рыжик, 2014; Arctic ..., 2023
Азотсодержащие вещества	4.7–9.0	5.9–9.8	Клиндух, Облучинская, 2013; Лобус, Удалов, 2021
Липиды	0.4–2.9	1.6–3.2	Репина, 2005; Khotimchenko et al., 2002; Лобус, Удалов, 2021

Минеральный состав бурых водорослей зависит от экологических, географических и физиологических факторов. Кроме йода, водоросли содержат Se, Zn, Mn и Cu, которые являются компонентами некоторых антиоксидантных ферментов и могут усиливать их действие (Moenne et al., 2016), т. е. играют эссенциальную роль. Помимо этого, водоросли аккумулируют и токсичные элементы, такие как Pb, Cd, Hg, As, длительное воздействие которых может привести к метаболическим повреждениям, особенно в темпах роста и эффективности фотосинтеза водорослей. Эти изменения можно объяснить перенаправлением энергии на защитные пути, уменьшением органелл и синтеза структурных веществ, а также окислением фотосинтетических пигментов (Heavy ..., 2003; Photoacclimation ..., 2014; Marine ..., 2017).

На клеточном уровне морские водоросли обладают множеством механизмов для удержания потенциально токсичных ионов металлов загрязняющих веществ из морской воды. Общеизвестно, что первой линией защиты от токсичности металлов служит клеточная стенка (Salgado et al., 2005). Основными компонентами клеточных стенок бурых водорослей являются альгинат и фукоидан. Эти полисахариды, благодаря своим уникальным свойствам, широко используются в промышленности (Облучинская, 2005). Морские водоросли с большим количеством отрицательно заряженных групп (сульфатные группы фукоидана и карбоксильные группы альгината) в клеточной стенке накапливают больше металлов (Andrade et al., 2010). В ответ на токсичность элементов морские водоросли могут увеличивать количество биомолекул с отрицательным зарядом, что является выгодным свойством для промышленности при условии отсутствия превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) элементов. Также было показано, что альгинат возможно использовать для удаления из потоков сточных вод загрязняющих веществ, связанных с металлами, включая Pb, Cu²⁺, Cd²⁺. Кроме этого, данные металлы могут быть извлечены из получаемого альгинатного геля путем прокалывания при повышенных температурах, в результате чего образуется нанопорошок оксида металла (Quantitative ..., 2024). Особую группу составляют комплексы полисахаридов и металлов, которые используются в медицине в качестве лекарственных веществ, нашли применение в рентгенологии, а также применяются для создания мембран (Сибикина и др., 2009).

Известно, что фукоиды для защиты от повреждающего действия токсичных элементов выделяют полифенольные соединения, которые хелатируют металлы, тем самым уменьшая накопление и поглощение их клетками. Установлено, что природные полифенольные соединения обладают противовоспалительным действием, которое в значительной степени обусловлено их антиоксидантными свойствами. Комплексование с ионами металлов водорослевых полисахаридов существенно усиливает противовоспалительную активность полифенолов. Металлокомплексы полифенолов являются перспективными соединениями для создания новых средств профилактики и терапии свободнорадикальных патологий разной этиологии и локализации (Комплексы ..., 2016).

Следует отметить, что в настоящее время во многих исследовательских работах обсуждается мультиметаллическая биосорбция, описывающая механизм одновременного связывания широкого набора элементов с клеточной стенкой водорослей. Предложено много моделей оценки способности водорослей к биосорбции, но универсальная модель до сих пор не разработана (Особенности ..., 2023).

Ранее нами были обнаружены взаимосвязи накопления некоторых БАВ с аккумуляцией 12 элементов в талломах бурых водорослей *F. distichus* из морей Баффина, Норвежского и Баренцева (Облучинская и др., 2023) и *A. nodosum* из морей Ирмингера, Норвежского и Баренцева (Даурцева и др., 2024).

Цель данной работы – определение и сравнение содержания полисахаридов (альгината и фукоидана), полифенолов и элементов у *A. nodosum* и *F. distichus* из Норвежского и Баренцева морей.

Материал и методы

Образцы бурых водорослей *F. distichus* и *A. nodosum* были собраны в прибрежных зонах Норвежского и Баренцева морей.

Содержание альгината определяли путем проведения реакции с 3,5-диметилфенолом и серной кислотой, оптическая плотность измерялась при 400 и 450 нм (Usov et al., 1995). В качестве стандартного образца применяли альгинат натрия (Sigma-Aldrich, Китай).

Для обнаружения фукоидана образцы морских водорослей обрабатывали по методике (Usov et al., 2001) с использованием цистеин-серноокислотного метода (Dische, Shettles, 1948); стандартом служила L-фукоза (Sigma-Aldrich, США).

Полифенолы в экстрактах водорослей определяли спектрофотометрически при 750 нм с применением реагента Фолина-Чокальтеу согласно общепринятой методике (Van Alstyne, 1995). В качестве стандарта использовали флороглюцин (Sigma-Aldrich, Германия).

Для проведения элементного анализа образцы бурых водорослей были обработаны по методу (Phytochemical ..., 2018). Элементы анализировали на оптико-эмиссионном спектрофотометре с индуктивно связанной плазмой PerkinElmer® Optima™8000 (ICP-OES) (PerkinElmer, Inc., Шелтон, Коннектикут, США). Подробности методики описаны ранее (The biochemical ..., 2022; Ascophyllum ..., 2024).

Все измерения проведены в трехкратной повторности, а результаты выражены в миллиграммах на 1 г абсолютного сухого вещества водорослей (а.с.м.).

Данные были логарифмически преобразованы и проверены с использованием теста нормальности Шапиро-Уилка. О наличии связей между содержанием соединений судили при критическом уровне достоверности $p < 0.05$. Статистический анализ и линейный коэффициент корреляции Пирсона r вычисляли с использованием программного обеспечения Statistica. Для расчетов и построения графиков использовали программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Сведения о количестве в *A. nodosum* альгината, фукоидана и полифенолов, а также корреляции различных элементов с этими БАВ в *F. distichus* и *A. nodosum* представлены в работах (Облучинская и др., 2023; Ascophyllum ..., 2024; Даурцева и др., 2024). Среднее содержание БАВ в *F. distichus* и *A. nodosum* из двух арктических морей показано на диаграммах (рис. 2).

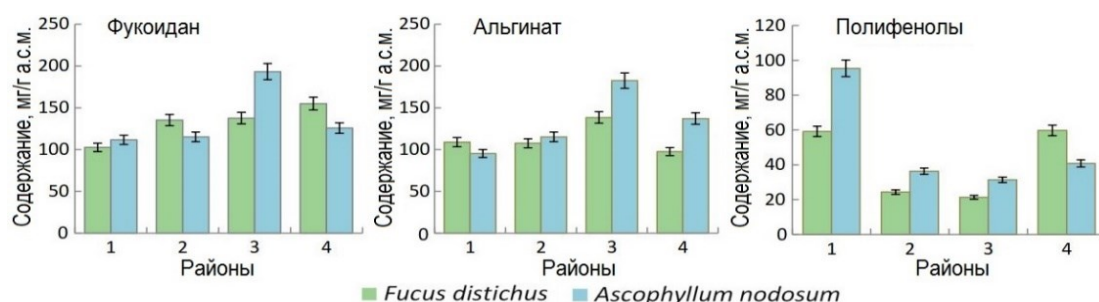


Рис. 2. Среднее содержание БАВ в образцах *A. nodosum* и *F. distichus* из разных районов Арктики:

1 – о. Рингвайсёйя (Норвежское море), 2 – бухта Корабельная (Баренцево море), 3 – бухта Завалишина (Баренцево море), 4 – губа Зеленецкая (Баренцево море)

Fig. 2. Average content of biologically active substances in *A. nodosum* and *F. distichus* samples from different regions of the Arctic:

1 – Ringvaysøya Island (Norwegian Sea), 2 – Korabelnaya Bay (Barents Sea), 3 – Zavalishina Bay (Barents Sea), 4 – Zelenetskaya Bay (Barents Sea)

Полученные данные показывают, что по содержанию фукоидана оба представителя бурых водорослей отличаются незначительно, исключением являются образцы из бухты Завалишина, где *A. nodosum* содержит в 1.4 раза больше данного соединения, чем *F. distichus*. В образцах водорослей из Норвежского моря содержание фукоидана ниже (100–110 мг/г а.с.м.), чем из Баренцева моря (110–190 мг/г а.с.м.).

Количество альгината у *A. nodosum*, обитающего в районах Баренцева моря в среднем в 1.5 раза выше, чем у *F. distichus* из тех же местообитаний. Фукоиды Норвежского моря содержат меньше альгинатов (95–108 мг/г а.с.м.), чем из бухт Корабельная и Завалишина (107–182 мг/г а.с.м.).

Общее содержание полифенолов в *A. nodosum* выше в среднем в 1.4 раза, за исключением водорослей из губы Зеленецкая – там полифенолов больше в 1.7 раза у *F. distichus*. В водорослях Норвежского моря отмечено более высокое содержание полифенолов (59–95 мг/г а.с.м.), чем у фукоидов Баренцева моря (21–59 мг/г а.с.м.). Относительно накопления элементов отметим, что *F. distichus* в среднем содержит больше Sr (в 1.3 раза), Fe (в 2.2 раза), Ba (в 1.5 раза) и Mn (в 3.4 раза), чем *A. nodosum* (рис. 3).

Полученные результаты показывают, что для исследуемых водорослей доминирующими элементами являются Ca и Mg – эссенциальные металлы. Магний входит в состав хлорофилла, участвует в фотосинтезе, активации ферментов и стабилизации мембран. Кальций важен для структуры клеточных стенок, является неотъемлемым звеном молекул альгинатов.

Содержание токсичных элементов, таких как As, Ba и Al, в талломах исследуемых водорослей не превышало нормативные требования к токсикологическому профилю водорослей.

При построении корреляционных матриц для двух видов макрофитов (рис. 4) и отдельным данным для каждого вида (рисунки 5 и 6) выявлены статистически значимые корреляции.

Можно отметить, что для всех образцов единым является наличие значимой корреляции между As и Ba ($r = 0.61$ для двух видов, $r = 0.99$ для *F. distichus*, $r = -0.84$ для *A. nodosum* при $p < 0.05$). Эти два элемента могут одновременно присутствовать в морской воде и водорослях, но данных об их специфическом взаимодействии и механизмах накопления мало. В водорослях механизмы их поглощения различны: мышьяк чаще усваивается в виде анионов, а барий – в виде катионов, поэтому конкуренции между ними, вероятно, нет.

Мышьяк обычно поглощается аналогично фосфору и может преобразовываться в различные химические соединения (Speciation ..., 2024; Sadee et al., 2024). Бурые водоросли легко поглощают арсенат, принимая его за структурный аналог фосфата, особенно в морской воде, где фосфата мало (Taş, Ak, 2024).

Барий в малых количествах присутствует практически во всех организмах, причем в разных тканях его содержание может быть различным (Леин, Кравчишина, 2020). Поглощение этого элемента связано как с конвективным переносом, так и с обменной диффузией. Его потребление во многом зависит от реакции среды: с подкислением этот процесс возрастает, а подщелачивание, наоборот, ограничивает его. В процессах метаболизма барий ведет себя подобно кальцию (Агрохимии ..., 2020).

Различия в вариациях корреляций могут быть вызваны физиологическими различиями у видов макроводорослей, которые включают фотосинтез, скорость роста и усвоение питательных веществ (Villares et al., 2017).

Для *F. distichus* видоспецифичными оказались корреляции содержания фукоидана с Mg ($r = -0.98$), альгината с Ca ($r = 0.99$), полифенолов с Zn ($r = -0.99$ при $p < 0.05$), Mg с Cu ($r = 0.98$ при $p < 0.05$), Fe с Al ($r = 0.99$ при $p < 0.05$), Co с Zn ($r = 0.95$ при $p < 0.05$). Для *A. nodosum* выявлены корреляции содержания полифенолов с альгинатом, фукоиданом, Ca, Al, As ($r = -0.87$, $r = -0.72$, $r = 0.75$, $r = 0.92$, $r = 0.84$ соответственно при $p < 0.05$); альгината с фукоиданом, Al, As, Ba, Co ($r = 0.92$, $r = -0.82$, $r = -0.93$, $r = 0.91$, $r = -0.79$ соответственно при $p < 0.05$); фукоидана с As, Ba, Sr ($r = -0.85$, $r = 0.97$, $r = 0.75$ соответственно при $p < 0.05$); Ba, Co и Rb коррелируют друг с другом попарно ($r = 0.76$ для Ba и Rb, $r = -0.75$ для Ba и Co, $r = -0.87$ для Rb и Co при $p < 0.05$).

Обеспеченность растений тем или иным элементом зависит не только от его содержания в окружающей среде, но и от взаимоотношений с другими элементами (Спицына и др., 2014). В литературе есть данные, свидетельствующие о взаимосвязи элементов друг с другом и с БАВ (Seasonal ..., 2021; Todorov et al., 2022; Wegeberg et al., 2023; Особенности ..., 2023). Одновременное воздействие нескольких металлов может изменять сорбцию и накопление определенных элементов (Variation ..., 2012). Причины различных моделей накопления до конца не ясны, но, вероятно, связаны с некоторыми физико-химическими и биологическими факторами.

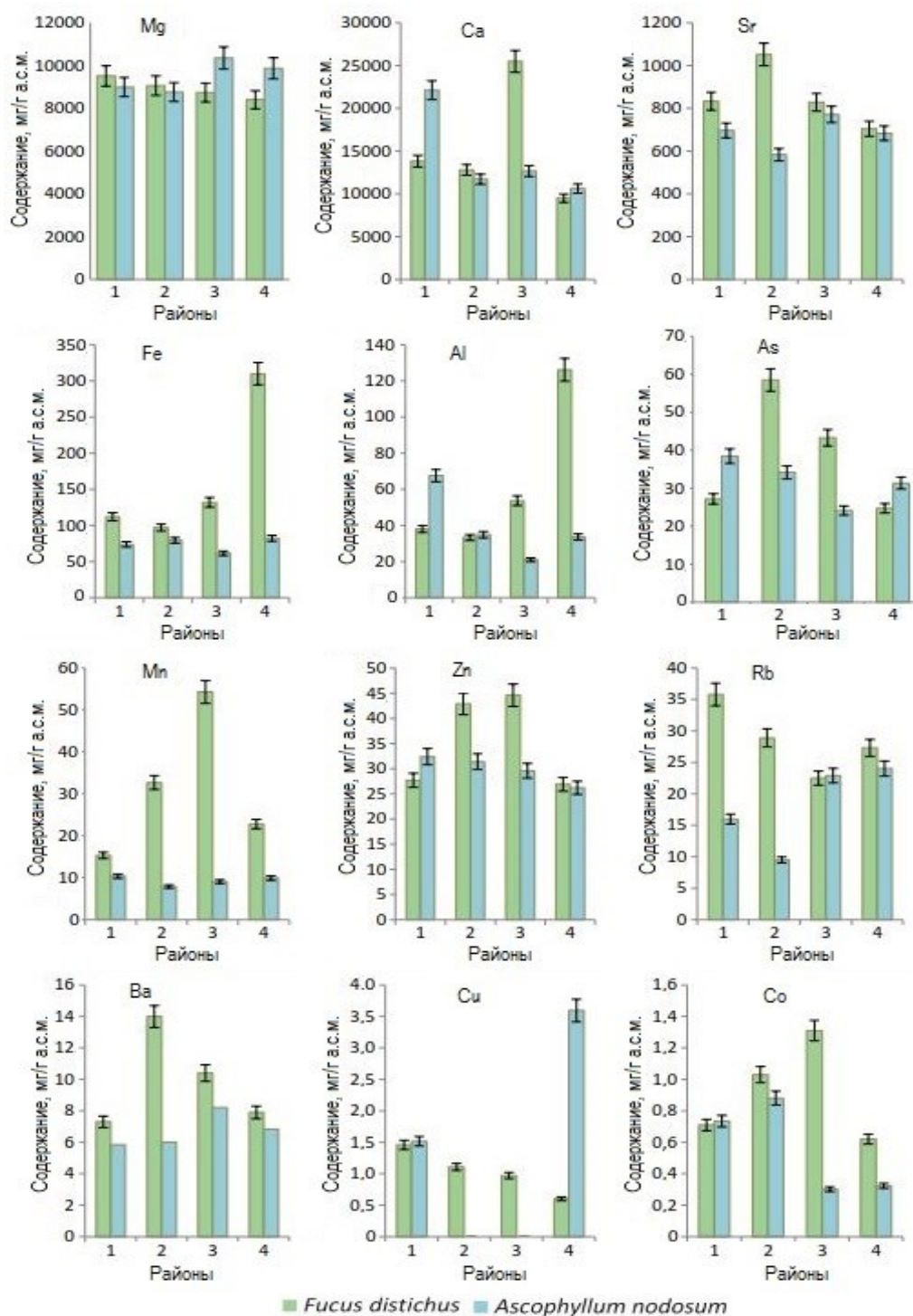


Рис. 3. Среднее содержание элементов в образцах *A. nodosum* и *F. distichus* из разных районов Арктики: 1 – о. Рингвайсёйя (Норвежское море), 2 – бухта Корабельная (Баренцево море), 3 – бухта Завалишина (Баренцево море), 4 – губа Зеленецкая (Баренцево море)
Fig. 3. Average content of elements in *A. nodosum* and *F. distichus* samples from different regions of the Arctic: 1 – Ringvaysøya Island (Norwegian Sea), 2 – Korabelnaya Bay (Barents Sea), 3 – Zavalishina Bay (Barents Sea), 4 – Zelenetskaya Bay (Barents Sea)

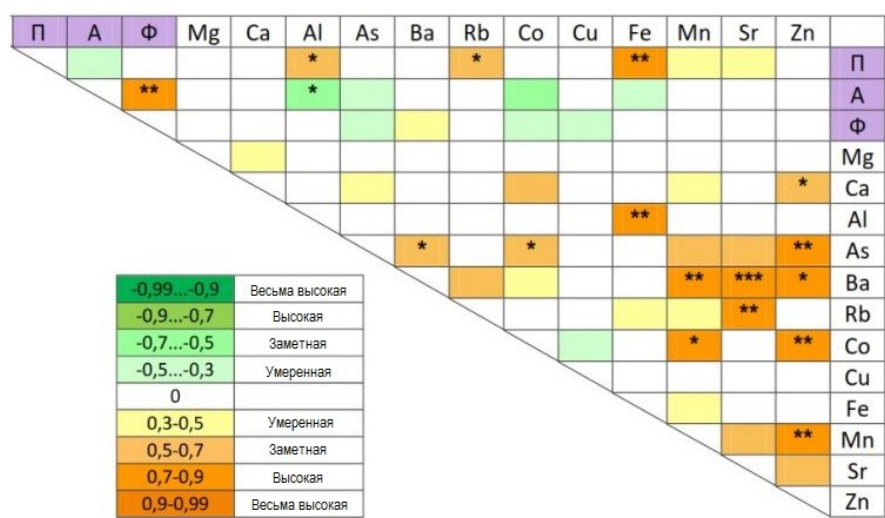


Рис. 4. Матрица, показывающая коэффициенты корреляции Пирсона между элементами и БАВ (П – полифенолы, А – альгинат, Ф – фукоидан) во всех образцах *F. distichus* и *A. nodosum*
Fig. 4. Correlation matrix showing the Pearson correlation coefficients between elements and biologically active substances (П – polyphenols, А – alginate, Ф – fucoidan) in all samples of *F. distichus* and *A. nodosum*

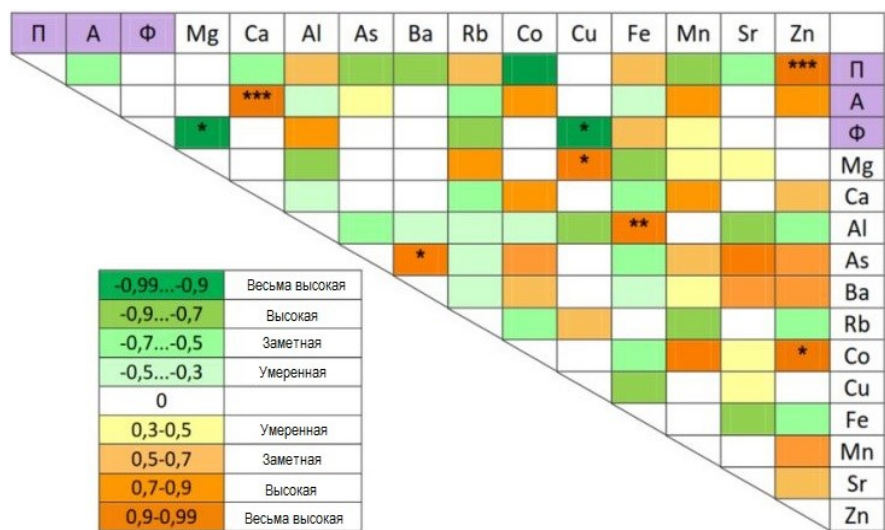


Рис. 5. Матрица, показывающая коэффициенты корреляции Пирсона между элементами и БАВ (П – полифенолы, А – альгинат, Ф – фукоидан) во всех образцах *F. distichus*
Fig. 5. Correlation matrix showing the Pearson correlation coefficients between elements and biologically active substances (П – polyphenols, А – alginate, Ф – fucoidan) in all *F. distichus* samples

Как видно из данных рис. 3, *F. distichus* в среднем накапливает больше металлов и элементов. Не исключено, что межвидовые различия в аккумуляции элементов связаны с относительной скоростью роста рассматриваемых фукоидов (Villares et al., 2017). *Fucus distichus* характеризуется более быстрым ростом, что может приводить к более интенсивному поглощению элементов из воды за короткий период (Лобус, Удалов, 2021). Продолжительность жизни *A. nodosum* составляет до 10–15 лет, что способствует длительному накоплению элементов в его тканях. Так, в сравнительном исследовании разных видов бурых водорослей Баренцева моря (Rapova et al., 2024) установлено, что *A. nodosum* является лидером среди других фукоидов по накоплению редкоземельных металлов.

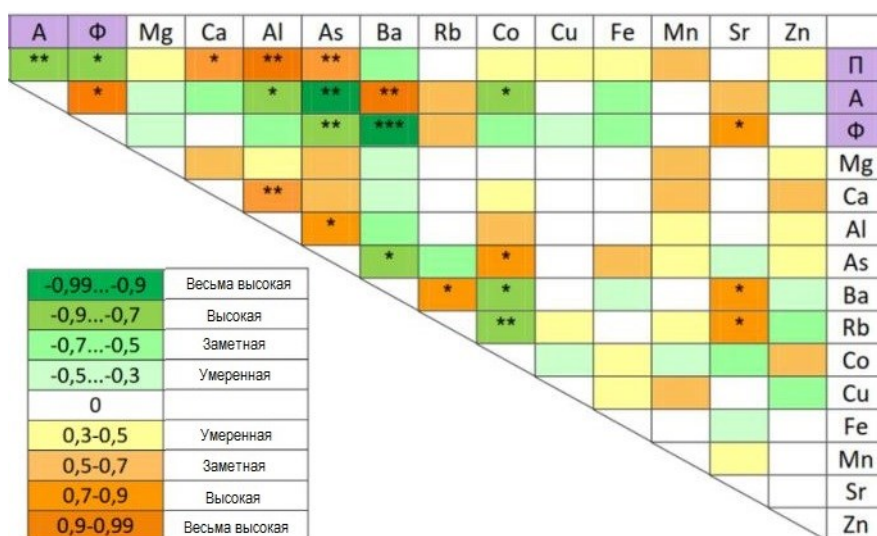


Рис. 6. Матрица, показывающая коэффициенты корреляции Пирсона между элементами и БАВ (П – полифенолы, А – альгинат, Ф – фукоидан) во всех образцах *A. nodosum*

Fig. 6. Correlation matrix showing the Pearson correlation coefficients between elements and biologically active substances (П – polyphenols, А – alginate, Ф – fucoidan) in all *A. nodosum* samples

Бурые водоросли способны избирательно накапливать металлы и микроэлементы, которые необходимы для их метаболизма (например, железо, цинк), но также пассивно адсорбировать токсичные элементы (Щукин, 2024). Одним из наиболее токсичных элементов является мышьяк (Таş, Ак, 2024). Бурые водоросли поглощают мышьяк из морской воды за счет эффективных механизмов абсорбции, что приводит к более высоким его концентрациям, чем в наземных растениях и других классах водорослей (Total ..., 2018). Эта способность в первую очередь связана с такими соединениями как альгинаты (Muñoz, Díaz, 2022), а также со схожестью ионов арсената и фосфата, в результате чего накопление мышьяка происходит по тому же механизму, как и усвоение соединений фосфора (Особенности ..., 2023). При этом известно, что *A. nodosum* очень часто живет в постоянном симбиозе с эндофитным грибом *Mycophycias ascophyllii* (Deckert, Garbary, 2005). Предполагается, что микобионт стимулирует поглощение минеральных элементов, в частности фосфора (Тараховская, Маслов, 2010).

Учитывая корреляционные связи элементов с другими компонентами в бурых водорослях, можно предположить местоположение металлов в клетке. Знание о том, связаны ли металлы внеклеточно (обратимо) или иммобилизованы внутри клеток, может быть важно, например, при биомониторинге с применением водорослей (Do we know ..., 2023). Известно, что внеклеточная фракция состоит из элементов, связанных с отрицательно заряженными функциональными группами в клеточной стенке и/или на внешней поверхности плазматической мембраны. Эти группы можно найти в полисахаридах, которые преобладают на поверхности клеток водорослей, таких как альгинаты и фукоиданы (Salgado et al., 2005). Внутри клетки металл может быть прикреплен к внутренней стороне плазматической мембраны, растворен в цитоплазме или находиться в органеллах. В бурых водорослях металлы часто обнаруживаются в физодах, в определенном типе вакуолей, где также накапливаются фенольные соединения (Salgado et al., 2005).

Есть исследования, доказывающие соответствие разницы содержания полифенолов и тяжелых металлов, а также селективность полифенолов к цинку (Myklestad et al., 1978). Известно, что изменения в молекулярной конформации альгиновой кислоты происходят из-за различия в их сродстве к металлам. Так А. Хауг (Haug, 1967) обнаружил, что альгинаты, богатые гулуриновой кислотой, имеют большее сродство к двухвалентным металлам в реакциях ионного обмена кальций–натрий, медь–натрий и барий–натрий, чем альгинаты, богатые маннуроновой кислотой.

Процессы, в ходе которых металлы накапливаются в водорослях, все еще недостаточно изучены. Поглощение металлов водорослями, вероятно, зависит от их формы в окружающей среде и имеет видовые различия.

Морские водоросли быстро растут, поглощая элементы из воды. У разных видов водорослей биологическая потребность в элементах различна, им свойственны разные механизмы абсорбции из морской воды и уникальные способы аккумуляции в тканях, влияние может оказывать и стадия репродуктивного цикла водорослей (Даурцева и др., 2024).

Взаимосвязь накопления БАВ и элементов в бурых водорослях, таких как *A. nodosum* и *F. distichus*, является сложной и многогранной. Эти водоросли обладают уникальной способностью накапливать как полезные, так и потенциально токсичные элементы, а также синтезировать ценные полисахариды (альгинаты, фукоиданы). Накопление металлов и БАВ взаимосвязано через физиологические процессы, такие как защита от окислительного стресса, регуляция метаболизма и адаптация к условиям окружающей среды.

Выводы

Установлено, что в Баренцевом море у *A. nodosum* содержание альгината в среднем в 1.5 раза выше, чем у *F. distichus*, фукоидана – практически не отличается (исключение *A. nodosum* из бухты Завалишина – в 1.4 раза выше), полифенолов – в среднем выше в 1.4 раза (исключение *F. distichus* из губы Зеленецкая – в 1.7 раза больше).

У водорослей *F. distichus*, по сравнению с *A. nodosum*, в среднем выше концентрация Sr – в 1.3 раза, Fe – в 2.2 раза, Ba – в 1.5 раза и Mn – в 3.4 раза.

Впервые выявлена сильная корреляционная связь содержания Ba с As у обоих видов ($r = -0.84$ для *A. nodosum* и $r = 0.99$ для *F. distichus* при $p < 0.05$), фукоидана с Mg и Cu для *F. distichus* ($r = -0.98$ и $r = -0.97$ соответственно при $p < 0.05$) и с As, Ba, Sr для *A. nodosum* ($r = -0.85$, $r = 0.97$, $r = 0.75$ соответственно при $p < 0.05$), альгината с Ca ($r = -0.99$ при $p < 0.05$) для *F. distichus* и с фукоиданом, Al, As, Ba, Co для *A. nodosum* ($r = 0.92$, $r = -0.82$, $r = -0.93$, $r = 0.91$, $r = -0.79$ соответственно при $p < 0.05$), полифенолов с Zn для *F. distichus* ($r = 0.71$ при $p < 0.05$) и с альгинатом, фукоиданом, Ca, Al, As для *A. nodosum* ($r = -0.87$, $r = -0.72$, $r = 0.75$, $r = 0.92$, $r = 0.84$ соответственно при $p < 0.05$).

Взаимосвязь накопления полисахаридов, полифенолов и элементов в бурых водорослях является сложной и многогранной. *Fucus distichus* характеризуется более быстрым ростом и транспортом питательных веществ (способствует наличие средней жилки) по сравнению с имеющим более длительный жизненный цикл *A. nodosum*. Это может приводить к более интенсивному поглощению некоторых элементов, влияющих на синтез полифенолов и полисахаридов.

Знание корреляционных взаимосвязей металлов и биоактивных веществ в бурых водорослях может стать основой для разработки инновационных решений в экологии, медицине, пищевой промышленности и других областях.

Работа выполнена по теме «Природоподобные технологии в извлечении биологически активных веществ водорослей и беспозвоночных Арктики, фундаментальные и практические аспекты» (№ госрегистрации 124013000732-7) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. *Агрохимия* биогенных элементов: учеб. пособие / А. Х. Шеуджен, Т. Н. Бондарева, И. А. Лебедевский, М. А. Осипов. Краснодар: КубГАУ, 2020. 223 с.
2. Даурцева А. В., Горшенина Е. В., Облучинская Е. Д. Сравнительное исследование элементов и биохимических компонентов стерильных и фертильных бурых водорослей *Ascophyllum nodosum* // Тр. Кольского науч. центра РАН. Сер. Естественные и гуманитарные науки. 2024. Т. 3, № 3. С. 47–60.
3. Кашутин А. Н. Биология развития и экология бурой водоросли *Fucus distichus* в прибрежных водах Камчатки: Дис. ... канд. биол. наук. Петропавловск-Камчатский, 2021. 206 с.

4. Клиндох М. П., Облучинская Е. Д. Сравнительное исследование химического состава бурых водорослей *Fucus vesiculosus* и *Ascophyllum nodosum* // Вестн. МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 466–471.
5. Комплексы полифенолов с ионами металлов как потенциальные средства профилактики и лечения свободно-радикальных патологий / В. А. Костюк, А. И. Потапович, Г. С. Полухович, Т. В. Костюк, А. К. Будько // Кислород и свободные радикалы: Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 19–20 мая 2016 г. Гродно: Гродненский гос. мед. ун-т, 2016. С. 88–90.
6. Кузнецов В.В. Белое море и биологические особенности его флоры и фауны. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 256 с.
7. Леин А. Ю., Кравчишина М. Д. Барий в океане: малые концентрации, но сильные эффекты // Природа. 2020. № 11(1263). С. 46–55.
8. Лобус Н. В., Удалов А. А. Химический состав бурых водорослей *Laminaria digitata* (Hudson) J. V. Lamouroux, 1813 и *Fucus distichus* (Linnaeus, 1767) из заливов архипелага Новая Земля (Карское море) // Биол. моря. 2021. Т. 47, № 5. С. 359–364.
9. Облучинская Е. Д. Технологии лекарственных и лечебно-профилактических средств из бурых водорослей. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. 164 с.
10. Облучинская Е. Д., Рыжик И. В. Изучение слоевищ фукусовых водорослей // Фармация. 2014. № 2. С. 19–21.
11. Облучинская Е. Д., Горшенина Е. В., Пожарицкая О. Н. Влияние географического положения мест сбора арктического *Fucus distichus* L. на накопление металлов и полисахаридов // Фундаментальная гликобиология – 2023: Матер. VI Всерос. конф., Мурманск, 11–15 сентября 2023 г. Мурманск: Изд-во МАУ, 2023. С. 92.
12. Особенности элементного состава ламинарии слоевищ (*Laminariae thalli*) различного происхождения / В. М. Щукин, Е. А. Хорольская, Н. Е. Кузьмина, И. П. Ремезова, В. В. Косенко // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. 2023. Т. 13, № 2. С. 154–172.
13. Ретина О. И. Обоснование и разработка технологии биологически активных веществ из фукусовых водорослей Белого моря: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 24 с.
14. Сибикина О. В., Иозеп А. А., Москвин А. В. Комплексы полисахаридов с катионами металлов: применение и строение (обзор) // Химико-фармацевтический журн. 2009. Т. 43, № 6. С. 35–39.
15. Спицына С. Ф., Томаровский А. А., Оствальд Г. В. Проявление синергизма и антагонизма между ионами меди, цинка и марганца при поступлении их в растения // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2014. Т. 120, № 10. С. 29–32.
16. Тараховская Е. Р., Маслов Ю. И. Специфика усвоения маннита у *Fucus vesiculosus* L. и *Ascophyllum nodosum* (L.) le Jolis (*Phaeophyta*) // Biol. Commun. 2010. № 2. С. 75–81.
17. Ткач А. В., Облучинская Е. Д. Стерины и полифенолы фукоидов Мурманского побережья Баренцева моря // Вестн. МГТУ. 2017. Т. 20, № 2. С. 326–335.
18. Шошина Е. В., Капков В. И. Экологические особенности промысловых фукусовых водорослей Мурманского побережья Баренцева моря // Вестн. МГТУ. 2014. Т. 17, № 1. С. 180–189.
19. Щукин В. М. Особенности накопления элементарных токсикантов в слоевищах ламинарии *Laminariae thalli* различного происхождения и продуктах на их основе: Автореф. дис. ... канд. фарм. наук. Пермь, 2024. 24 с.
20. Andrade S., Pulido M. J., Correa J. A. The effect of organic ligands exuded by intertidal seaweeds on copper complexation // Chemosphere. 2010. Vol. 78(4). P. 397–401.
21. Arctic edible brown alga *Fucus distichus* L.: biochemical composition, antiradical potential and human health risk / E. D. Obluchinskaya, O. N. Pozharitskaya, E. V. Gorshenina et al. // Plants. 2023. Vol. 12, № 12. P. 1–18.
22. *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis from Arctic: Its biochemical composition, antiradical potential, and human health risk / E. D. Obluchinskaya, O. N. Pozharitskaya, E. V. Gorshenina, A. V. Daurtseva, E. V. Flisyuk, Y. E. Generalova, I. I. Terninko, A. N. Shikov // Mar. Drugs. 2024. Vol. 22, № 48. P. 1–22.

23. Catarino M. D., Silva A. M. S., Cardoso S. M. Phycochemical constituents and biological activities of *Fucus* spp. // Mar. Drugs. 2018. Vol. 16. P. 249.
24. Deckert R. J., Garbary D. J. *Ascophyllum* and its symbionts. VI. Microscopic characterization of the *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae), *Mycophycias ascophylli* (Ascomycetes) symbiotum // Algae. 2005. Vol. 20. P. 225–232.
25. Dische Z., Shettles L. B. A specific color reaction of methylpentoses and a spectrophotometric micromethod for their determination // J. Biol. Chem. 1948. Vol. 175. P. 595–603.
26. Do we know the cellular location of heavy metals in seaweed? An up-to-date review of the techniques / A. Vázquez-Arias, C. Pacín, Á. Ares, J. Á. Fernández, J. R. Aboal // Sci. Total Environ. 2023. Vol. 856, part 2, Article: 159215. P. 1–7.
27. Eckersley L., Garbary D. Developmental and environmental sources of variation on annual growth increments of *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae) // Algae. 2007. Vol. 22. P. 107–116.
28. Haug A. The affinity of some divalent metals to different types of alginates // Acta Chem. Scand. 1967. Vol. 15. P. 1794–1795.
29. Heavy metal-induced oxidative stress in algae / E. Pinto, T. C. S. Sigaud-Kutner, M. A. S. Leitão, O. K. Okamoto, D. Morse, P. Colepicolo // J. Phycol. 2003. Vol. 39. P. 1008–1018.
30. Khotimchenko S. V., Vaskovsky V. E., Titlyanova T. V. Fatty acids of marine algae from the pacific coast of North California // Bot. Mar. 2002. Vol. 45. P. 17–22.
31. Kim K. Y., Garbary D. J. Form, function and longevity in fucoid thalli: chlorophyll a fluorescence differentiation of *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *F. distichus* (Phaeophyceae) // Algae. 2009. Vol. 24(2). P. 93–104.
32. Marine metal pollution and effects on seaweed species / L. Contreras-Porcia, A. Meynard, C. López-Cristoffanini, N. Latorre, M. Kumar // Systems biology of marine ecosystems / M. Kumar, P. Ralph (Eds.). Springer, Cham, 2017. P. 35–48.
33. Moenne A., González A., Sáez C. A. Mechanisms of metal tolerance in marine macroalgae, with emphasis on copper tolerance in Chlorophyta and Rhodophyta // Aquat. Toxicol. 2016. Vol. 176. P. 30–37.
34. Muñoz I. L., Díaz N. D. Minerals in edible seaweed: Health benefits and food safety issues // Crit. Rev. Food Sci. Nut. 2022. Vol. 62(6). P. 1592–1607.
35. Myklestad S. M., Eide I., Melsom S. Exchange of heavy metals in *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. *in situ* by means of transplanting experiments // Environ. Pollut. 1978. Vol. 16. P. 277–284.
36. Panova E., Voskoboinikov G., Matishov G. Rare earth elements in fucus algae of the Barents Sea // Dokl. Earth Sci. 2024. Vol. 515, part 1. P. 490–493.
37. Penot M., Penot M. Quelques aspects originaux des transports à longue distance dans le thalle de *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (Phaeophyceae, Fucales) // Phycologia. 1977. Vol. 16. P. 339–347.
38. Photoacclimation responses of the brown macroalga *Sargassum cymosum* to the combined influence of UV radiation and salinity: cytochemical and ultrastructural organization and photosynthetic performance / L. K. Polo, M. R. L. Felix, M. Kreusch, D. T. Pereira, G. B. Costa, C. Simioni, L. C. Ouriques, F. Chow, F. Ramlov, M. Maraschin, Z. L. Bouzon, E. C. Schmidt // J. Photochem. Photobiol. 2014. Vol. 90(3). P. 560–573.
39. Phytochemical components and amino acid profile of brown seaweed *Durvillaea antarctica* as affected by air drying temperature / E. Uribe, A. Vega-Gálvez, N. Vargas, A. Pasten, K. Rodríguez, K. S. Ah-Hen // J. Food Sci. Technol. 2018. Vol. 55. P. 4792–4801.
40. Quantitative and qualitative saccharide analysis of North Atlantic brown seaweed by gas chromatography/mass spectrometry and infrared spectroscopy / C. Niemi, J. Takahashi, A. Gorzsás, F. G. Gentili // Int. J. Biol. Macromol. 2024. Vol. 254, part 3. Article: 127870. P. 1–8.
41. Sadee B. A., Galali Y., Zebari S. M. Recent developments in speciation and determination of arsenic in marine organisms using different analytical techniques. A review // RSC Adv. 2024. Vol. 14(30). P. 21563–21589.

42. *Salgado L. T., Andrade L. R., Amado G. M.* Localization of specific monosaccharides in cells of the brown alga *Padina gymnospora* and the relation to heavy-metal accumulation // *Protoplasma*. 2005. Vol. 225. P. 123–128.
43. *Seasonal variation of the proximate composition, mineral content, fatty acid profiles and other phytochemical constituents of selected brown macroalgae* / M. Garcia-Vaquero, G. Rajauria, M. Miranda, T. Sweeney, M. Lopez-Alonso, J. O'Doherty // *Mar. Drugs*. 2021. Vol. 19, № 204. P. 1–16.
44. *Speciation analysis and toxicity evaluation of arsenolipids—an overview focusing on sea food* / C. Li, J. Chen, Z. Wang, B. Song, K.-L. Cheung, J. Chen, R. Li, X. Liu, X. Jia, S.-Y. Zhong // *Arch. Toxicol.* 2024. Vol. 98(2). P. 409–424.
45. *Taş E., Ak İ.* Chapter 1. Arsenic in brown seaweeds: bioaccumulation, speciation, and health implications // *Marine and freshwater advances: ecology, nutrition, and technology*. Ankara: Iksad, 2024. P. 3–29.
46. *The biochemical composition and antioxidant properties of Fucus vesiculosus from the Arctic region* / E. D. Obluchinskaya, O. N. Pozharitskaya, D. V. Zakharov, E. V. Flisyuk, I. I. Terninko, Y. E. Generalova, I. E. Smekhova, A. N. Shikov // *Mar. Drugs*. 2022. Vol. 20, № 193. P. 1–19.
47. *Todorov T. I., Wolle M. M., Conklin S. D.* Distribution of 26 major and trace elements in edible seaweeds from the US market // *Chemosphere*. 2022. Vol. 294. P. 133651.
48. *Total and inorganic arsenic contents in seaweeds: Absorption, accumulation, transformation and toxicity* / Z. Ma, L. Lin, M. Wu, H. Yu, T. Shang, T. Zhang, M. Zhao // *Aquaculture*. 2018. Vol. 497. P. 49–55.
49. *Usov A. I., Bilan M. I., Klochkova N. G.* Polysaccharides of algae: 48. Polysaccharide composition of several calcareous red algae: Isolation of alginate from *Corallina pilulifera* P. et R. (Rhodophyta, Corallinaceae) // *Bot. Mar.* 1995. Vol. 38. P. 43–51.
50. *Usov A. I., Smirnova G. P., Klochkova N. G.* Polysaccharides of algae: 55. Polysaccharide composition of several brown algae from Kamchatka // *Russ. J. Bioorg. Chem.* 2001. Vol. 27. P. 395–399.
51. *Van Alstyne K. L.* A comparison of three methods for quantifying brown algal polyphenolic compounds // *J. Chem. Ecol.* 1995. Vol. 21. P. 45–58.
52. *Variation in patterns of metal accumulation in thallus parts of Lessonia trabeculata (Laminariales; Phaeophyceae): implications for biomonitoring* // C. A. Sáez, M. G. Lobos, E. C. Macaya, D. Oliva, W. Quiroz, M. T. Brown // *PLoS ONE*. 2012. Vol. 7(11). P. 1–10.
53. *Villares R., Carral E., Carballeira C.* Differences in metal accumulation in the growing shoot tips and remaining shoot tissue in three species of brown seaweeds // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2017. Vol. 99. P. 372–379.
54. *Wegeberg S., Søndergaard J., Geertz-Hansen O.* Elements and sugars in kelp and fucoid species in Greenland, correlation and seasonality // *Algal Res.* 2023. Vol. 75. Article: 103240. P. 1–15.

References

1. *Shpeudzen A. H., Bondareva T. N., Lebedovskiy I. A., Osipov M. A.* *Agrokimiya biogennykh elementov* [Agrochemistry of biogenic elements: textbook. manual]. Krasnodar, Publ. KubGAU, 2020, 223 p. (In Russ.).
2. *Daurtseva A. V., Gorshenina E. V., Obluchinskaya E. D.* Sravnitel'noe issledovanie elementov i biokhimicheskikh komponentov steril'nykh i fertil'nykh burykh vodorosley *Ascophyllum nodosum* [Comparative study of the elements and biochemical components of sterile and fertile brown algae *Ascophyllum nodosum*]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Estestvennye i gumanitarnye nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities], 2024, Vol. 3, No. 3, pp. 47–60 (In Russ.).
3. *Kashutin A. N.* *Biologiya razvitiya i ekologiya buroy vodorosli Fucus distichus v pribrezhnykh vodakh Kamchatki*. Diss. kand. biol. nauk [Development biology and ecology of the brown algae *Fucus distichus* in the coastal waters of Kamchatka. PhD (Biology) diss.]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2021, 206 p. (In Russ.).
4. *Klindukh M. P., Obluchinskaya E. D.* Sravnitel'noe issledovanie khimicheskogo sostava burykh vodorosley *Fucus vesiculosus* i *Ascophyllum nodosum* [Comparative study of the chemical composition of brown algae *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum*]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of Murmansk State Technical University], 2013, Vol. 16, No. 3, pp. 466–471 (In Russ.).

5. Kostyuk V. A., Potapovich A. I., Polyukhovich G. S., Kostyuk T. V., Budko A. K. Kompleksy polifenolov s ionami metallov kak potentsial'nye sredstva profilaktiki i lecheniya svobodno-radikal'nykh patologiy [Complexes of polyphenols with metal ions as potential means of prevention and treatment of free radical pathologies]. *Kislород i svobodnye radikaly. Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Grodno, 19–20 maya 2016 goda* [Oxygen and free radicals. Collection of materials of the International scientific and practical conference, Grodno, May 19–20, 2016]. Grodno, Publ. Grodno State Medical University, 2016, pp. 88–90 (In Russ.).
6. Kuznetsov V. V. *Beloe more i biologicheskie osobennosti ego flory i fauny* [The White Sea and biological features of its flora and fauna]. Moscow, Publ. USSR Academy of Sciences, 1960, 256 p. (In Russ.).
7. Lein A. Yu., Kravchishina M. D. Bariy v okeane: malye kontsentratsii, no sil'nye efekty [Barium in the ocean: low concentrations, but strong effects]. *Priroda* [Nature], 2020, No. 11(1263), pp. 46–55 (In Russ.).
8. Lobus N. V., Udalov A. A. Khimicheskiy sostav burykh vodorosley *Laminaria digitata* (Hudson) J. V. Lamouroux, 1813 i *Fucus distichus* (Linnaeus, 1767) iz zalivov arhipelaga Novaya Zemlya (Karskoe more) [Chemical composition of brown algae *Laminaria digitata* (Hudson) J. V. Lamouroux, 1813 and *Fucus distichus* (Linnaeus, 1767) from the bays of the Novaya Zemlya archipelago (Kara Sea)]. *Biologiya morya* [Marine Biology], 2021, Vol. 47, No. 5, pp. 359–364 (In Russ.).
9. Obluchinskaya E. D. *Tekhnologii lekarstvennykh i lechebno-profilakticheskikh sredstv iz burykh vodorosley* [Technologies of medicinal and therapeutic and prophylactic agents from brown algae]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2005, 164 p. (In Russ.).
10. Obluchinskaya E. D., Ryzhik I. V. Izuchenie sloevishch fukusovykh vodorosley [Study of thalli of fucus algae]. *Farmatsiya* [Pharmacy], 2014, No. 2, pp. 19–21 (In Russ.).
11. Obluchinskaya E. D., Gorshenina E. V., Pozharitskaya O. N. Vliianie geograficheskogo polozheniya mest sbora arkticheskogo *Fucus distichus* L. na nakoplenie metallov i polisakharidov [Influence of the geographical location of collection sites of arctic *Fucus distichus* L. on the accumulation of metals and polysaccharides]. *Fundamental'naya glikobiologiya – 2023: Materialy VI Vserossiyskoy konferentsii, Murmansk, 11–15 sentyabrya 2023 goda* [Fundamental glycobiology – 2023: Proc. VI All-Russian conference, Murmansk, September 11–15, 2023], Murmansk, Publ. MAU, 2023, p. 92 (In Russ.).
12. Shchukin V. M., Khorol'skaya E. A., Kuz'mina N. E., Remezova I. P., Kosenko V. V. Osobennosti elementnogo sostava laminarii sloevishch (*Laminariae thalli*) razlichnogo proiskhozhdeniya [Features of the elemental composition of *Laminaria thalli* of various origins]. *Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertizy sredstv meditsinskogo primeneniya. Regulyatornye issledovaniya i ekspertiza lekarstvennykh sredstv* [Bulletin of the Scientific Center for Expertise of Medical Products. Regulatory studies and expertise of drugs], 2023, Vol. 13, No. 2, pp. 154–172 (In Russ.).
13. Repina O. I. *Obosnovanie i razrabotka tekhnologii biologicheskii aktivnykh veshchestv iz fukusovykh vodorosley Belogo morya. Avtoreferat diss. kand. tekhnol. nauk* [Justification and development of technology for biologically active substances from fucus algae of the White Sea. PhD (Technology) diss.], Moscow, 2005, 24 p. (In Russ.).
14. Sibikina O. V., Iozep A. A., Moskvina A. V. Kompleksy polisakharidov s kationami metallov: primeneniye i stroeniye (obzor) [Polysaccharide complexes with metal cations: application and structure (review)]. *Khimiko-farmatsevticheskiy zhurnal* [Chemical-pharmaceutical J.], 2009, Vol. 43, No. 6, pp. 35–39 (In Russ.).
15. Spitsyna S. F., Tomarovskiy A. A., Ostval'd G. V. Proyavleniye sinergizma i antagonizma mezhdu ionami medi, tsinka i margantsa pri postuplenii ikh v rasteniya [Manifestation of synergism and antagonism between copper, zinc and manganese ions upon their entry into plants]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2014, Vol. 120, No. 10, pp. 29–32 (In Russ.).
16. Tarakhovskaya E. R., Maslov Yu. I. Spetsifika usvoeniya mannita v *Fucus vesiculosus* L. i *Ascophyllum nodosum* (L.) le Jolis (Phaeophyta) [Specificity of mannitol assimilation in *Fucus vesiculosus* L. and *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (Phaeophyta)]. *Biol. Commun.*, 2010, No. 2, pp. 75–81 (In Russ.).

17. Tkach A. V., Obluchinskaya E. D. Steriny i polifenoly fukoidov Murmanskogo poberezh'ya Barentseva morya [Sterols and polyphenols of fucoids of the Murmansk coast of the Barents Sea]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Murmansk State Technical University], 2017, Vol. 20, No. 2, pp. 326–335 (In Russ.).
18. Shoshina E. V., Kapkov V. I. Ekologicheskie osobennosti promyslovykh fukusovykh vodorosley Murmanskogo poberezh'ya Barentseva morya [Ecological features of commercial fucus algae of the Murmansk coast of the Barents Sea]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Murmansk State Technical University], 2014, Vol. 17, No.1, pp. 180–189 (In Russ.).
19. Shchukin V. M. *Osobennosti nakopleniya elementnykh toksikantov v sloevishchakh laminarii Laminariae thalli razlichnogo proiskhozhdeniya i produktakh na ikh osnove. Avtoreferat diss. kand. farm. nauk* [Features of accumulation of elemental toxicants in thalli of kelp *Laminariae thalli* of various origins and products based on them. PhD (Pharmacy) diss.], Perm', 2024, 24 p. (In Russ.).
20. Andrade S., Pulido M. J., Correa J. A. The effect of organic ligands exuded by intertidal seaweeds on copper complexation. *Chemosphere*, 2010, Vol. 78(4), pp. 397–401.
21. Obluchinskaya E. D., Pozharitskaya O. N., Gorshenina E. V. et al. Arctic edible brown alga *Fucus distichus* L.: biochemical composition, antiradical potential and human health risk. *Plants*, 2023, Vol. 12, No. 12, pp. 1–18.
22. Obluchinskaya E. D., Pozharitskaya O. N., Gorshenina E. V., Daurtseva A. V., Flisyuk E. V., Generalova Y. E., Terninko I. I., Shikov A. N. *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis from Arctic: Its biochemical composition, antiradical potential, and human health risk. *Mar. Drugs*, 2024, Vol. 22, No. 48, pp. 1–22.
23. Catarino M. D., Silva A. M. S., Cardoso S. M. Phycochemical constituents and biological activities of *Fucus* spp. *Mar. Drugs*, 2018, Vol. 16, pp. 249.
24. Deckert R. J., Garbary D. J. *Ascophyllum* and its symbionts. VI. Microscopic characterization of the *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae), *Mycophycias ascophylli* (Ascomycetes) symbiotum. *Algae*, 2005, Vol. 20, pp. 225–232.
25. Dische Z., Shettles L. B. A specific color reaction of methylpentoses and a spectrophotometric micromethod for their determination. *J. Biol. Chem.*, 1948, Vol. 175, pp. 595–603.
26. Vázquez-Arias A., Pacín C., Ares Á., Fernández J. Á., Aboal J. R. Do we know the cellular location of heavy metals in seaweed? An up-to-date review of the techniques. *Sci. Total Environ.*, 2023, Vol. 856, part 2, Article: 159215, pp. 1–7.
27. Eckersley L., Garbary D. Developmental and environmental sources of variation on annual growth increments of *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae). *Algae*, 2007, Vol. 22, pp. 107–116.
28. Haug A. The affinity of some divalent metals to different types of alginates. *Acta Chem. Scand.*, 1967, Vol. 15, pp. 1794–1795.
29. Pinto E., Sigaud-Kutner T. C. S., Leitão M. A. S., Okamoto O. K., Morse D., Colepicolo P. Heavy metal-induced oxidative stress in algae. *J. Phycol.*, 2003, Vol. 39, pp. 1008–1018.
30. Khotimchenko S. V., Vaskovsky V. E., Titlyanova T. V. Fatty acids of marine algae from the pacific coast of North California. *Bot. Mar.*, 2002, Vol. 45, pp. 17–22.
31. Kim K. Y., Garbary D. J. Form, function and longevity in fucoid thalli: chlorophyll *a* fluorescence differentiation of *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *F. distichus* (Phaeophyceae). *Algae*, 2009, Vol. 24(2), pp. 93–104.
32. Contreras-Porcia L., Meynard A., López-Cristoffanini C., Latorre N., Kumar M. Marine metal pollution and effects on seaweed species / M. Kumar, P. Ralph (Eds.). *Systems biology of marine ecosystems*. Springer, Cham, 2017, pp. 35–48.
33. Moenne A., González A., Sáez C. A. Mechanisms of metal tolerance in marine macroalgae, with emphasis on copper tolerance in Chlorophyta and Rhodophyta. *Aquat. Toxicol.*, 2016, Vol. 176, pp. 30–37.
34. Muñoz I. L., Díaz N. D. Minerals in edible seaweed: Health benefits and food safety issues. *Crit. Rev. Food Sci. Nut.*, 2022, Vol. 62(6), pp. 1592–1607.

35. Myklestad S. M., Eide I., Melsom S. Exchange of heavy metals in *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. *in situ* by means of transplanting experiments. Environ. Pollut., 1978, Vol. 16, P. 277–284.
36. Panova E., Voskoboynikov G., Matishov G. Rare earth elements in fucus algae of the Barents Sea. Dokl. Earth Sci., 2024, Vol. 515, part 1, pp. 490–493.
37. Penot M., Penot M. Quelques aspects originaux des transports à longue distance dans le thalle de *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (Phaeophyceae, Fucales). Phycologia, 1977, Vol. 16, pp. 339–347.
38. Polo L. K., Felix M. R. L., Kreusch M., Pereira D. T., Costa G. B., Simioni C., Ouriques L. C., Chow F., Ramlov F., Maraschin M., Bouzon Z. L., Schmidt E. C. Photoacclimation responses of the brown macroalga *Sargassum cymosum* to the combined influence of UV radiation and salinity: cytochemical and ultrastructural organization and photosynthetic performance. J. Photochem. Photobiol., 2014, Vol. 90(3), pp. 560–573.
39. Uribe E., Vega-Gálvez A., Vargas N., Pasten A., Rodríguez K., Ah-Hen K. S. Phytochemical components and amino acid profile of brown seaweed *Durvillaea antarctica* as affected by air drying temperature. J. Food Sci. Technol., 2018, Vol. 55, pp. 4792–4801.
40. Niemi C., Takahashi J., Gorzsás A., Gentili F. G. Quantitative and qualitative saccharide analysis of North Atlantic brown seaweed by gas chromatography/mass spectrometry and infrared spectroscopy. Int. J. Biol. Macromol., 2024, Vol. 254, part 3, Article: 127870, pp. 1–8.
41. Sadee B. A., Galali Y., Zebari S. M. Recent developments in speciation and determination of arsenic in marine organisms using different analytical techniques: A review. RSC Adv., 2024, Vol. 14(30), pp. 21563–21589.
42. Salgado L. T., Andrade L. R., Amado G. M. Localization of specific monosaccharides in cells of the brown alga *Padina gymnospora* and the relation to heavy-metal accumulation. Protoplasma, 2005, Vol. 225, pp. 123–128.
43. Garcia-Vaquero M., Rajauria G., Miranda M., Sweeney T., Lopez-Alonso M., O'Doherty J. Seasonal variation of the proximate composition, mineral content, fatty acid profiles and other phytochemical constituents of selected brown macroalgae. Mar. Drugs., 2021, Vol. 19, No. 204, pp. 1–16.
44. Li C., Chen J., Wang Z., Song B., Cheung K.-L., Chen J., Li R., Liu X., Jia X., Zhong S.-Y. Speciation analysis and toxicity evaluation of arsenolipids—an overview focusing on sea food. Arch. Toxicol., 2024, Vol. 98(2), pp. 409–424.
45. Taş E., Ak İ. Chapter 1. Arsenic in brown seaweeds: bioaccumulation, speciation, and health implications. Marine and freshwater advances: ecology, nutrition, and technology, Ankara, Iksad, 2024, pp. 3–29.
46. Obluchinskaya E. D., Pozharitskaya O. N., Zakharov D. V., Flisyuk E. V., Terninko I. I., Generalova Y. E., Smekhova I. E., Shikov A. N. The biochemical composition and antioxidant properties of *Fucus vesiculosus* from the Arctic region. Mar. Drugs, 2022, Vol. 20, No. 193, pp. 1–19.
47. Todorov T. I., Wolle M. M., Conklin S. D. Distribution of 26 major and trace elements in edible seaweeds from the US market. Chemosphere, 2022, Vol. 294, p. 133651.
48. Ma Z., Lin L., Wu M., Yu H., Shang T., Zhang T., Zhao M. Total and inorganic arsenic contents in seaweeds: Absorption, accumulation, transformation and toxicity. Aquaculture, 2018, Vol. 497, pp. 49–55.
49. Usov A. I., Bilan M. I., Klochkova N. G. Polysaccharides of algae: 48. Polysaccharide composition of several calcareous red algae: Isolation of alginate from *Corallina pilulifera* P. et R. (Rhodophyta, Corallinaceae). Bot. Mar., 1995, Vol. 38, pp. 43–51.
50. Usov A. I., Smirnova G. P., Klochkova N. G. Polysaccharides of algae: 55. Polysaccharide composition of several brown algae from Kamchatka. Russ. J. Bioorg. Chem., 2001, Vol. 27, pp. 395–399.
51. Van Alstyne K. L. A comparison of three methods for quantifying brown algal polyphenolic compounds. J. Chem. Ecol., 1995, Vol. 21, pp. 45–58.
52. Sáez C. A., Lobos M. G., Macaya E. C., Oliva D., Quiroz W., Brown M. T. Variation in patterns of metal accumulation in thallus parts of *Lessonia trabeculata* (Laminariales; Phaeophyceae): implications for biomonitoring. PLoS ONE, 2012, Vol. 7(11), pp. 1–10.

53. Villares R., Carral E., Carballeira C. Differences in metal accumulation in the growing shoot tips and remaining shoot tissue in three species of brown seaweeds. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2017, Vol. 99, pp. 372–379.
54. Wegeberg S., Søndergaard J., Geertz-Hansen O. Elements and sugars in kelp and fucoid species in Greenland, correlation and seasonality. *Algal Res.*, 2023, Vol. 75, Article: 103240, pp. 1–15.

Информация об авторах

Анна Васильевна Даурцева – младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6653-5452>

Елена Вячеславовна Горшенина – ведущий инженер, <https://orcid.org/0009-0000-1329-0017>

Екатерина Дмитриевна Облучинская – доктор фармацевтических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-4456-656X>

Information about the authors

Anna V. Daurtseva – Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6653-5452>

Elena V. Gorshenina – Leading Engineer, <https://orcid.org/0009-0000-1329-0017>

Ekaterina D. Obluchinskaya – Dr. Sci. (Pharmacy), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-4456-656X>

Статья поступила в редакцию 15.04.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 26.05.2025.
The article was submitted 15.04.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 26.05.2025.

Научная статья
УДК 574.583 (268.45)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.004

АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ПЕЛАГИАЛИ

Елена Ивановна Дружкова, Игорь Васильевич Берченко, Анастасия Владимировна Ващенко, Марина Павловна Венгер, Вероника Владимировна Водошнянова, Владимир Геннадьевич Дворецкий, Татьяна Геннадьевна Ишкулова, Виктор Витальевич Ларионов, Павел Робертович Макаревич, Алексей Анатольевич Намятов, Анатолий Анатольевич Олейник, Иван Александрович Пастухов, Дмитрий Владимирович Широколов, Татьяна Ивановна Широколобова
Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск, Россия
druzhkova@mmbi.info, berchenko@mmbi.info, venger@mmbi.info, vodopyanova@mmbi.info, vdvoretskiy@mmbi.info, ishkulova@mmbi.info, larionov@mmbi.info, makarevich@mmbi.info, alexey.namyatov.a@gmail.com, oleinik@mmbi.info, pastuhovi@mmbi.info, shirokolobova@mmbi.info

Аннотация

В ходе проведенных исследований определено влияние климатических флуктуаций на структурно-продукционные характеристики пелагиали как с использованием многолетних рядов данных по содержанию хлорофилла *a in situ*, так и при выполнении прямого таксономического изучения пелагического фитоценоза на локальных участках акватории Баренцева моря в период весенней активизации. Установлены сроки начала весеннего цветения фитопланктона, динамика его развития и структурной организации. Разработана методика использования изотопных соотношений $\delta^{18}\text{O}$ для оценки индивидуальных стехиометрических соотношений и первичной продукции акваторий. Получены новые сведения о весеннем пелагическом комплексе зоопланктона в районе арктического архипелага Новая Земля, проведены уникальные исследования бактерио- и вириопланктона в его ранее не изучавшихся прибрежных районах. Приведены сезонные гидрохимические показатели водных масс Кольского залива.

Ключевые слова:

Баренцево море, прикромочная зона, изотопные трассеры, хлорофилл *a*, вириопланктон, бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон

Original article

ACTUAL ASPECTS OF THE ARCTIC PELAGIC ZONE INVESTIGATIONS

Elena I. Druzhkova, Igor V. Berchenko, Anastasya V. Vashchenko, Marina P. Venger, Veronica V. Vodopianova, Vladimir G. Dvoretsky, Tatyana G. Ishkulova, Victor V. Larionov, Pavel R. Makarevich, Alexey A. Namyatov, Anatoliy A. Oleinik, Ivan A. Pastuhov, Dmitry V. Shirokolobov, Tatyana I. Shirokolobova
Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
druzhkova@mmbi.info, berchenko@mmbi.info, venger@mmbi.info, vodopyanova@mmbi.info, vdvoretskiy@mmbi.info, ishkulova@mmbi.info, larionov@mmbi.info, makarevich@mmbi.info, alexey.namyatov.a@gmail.com, oleinik@mmbi.info, pastuhovi@mmbi.info, shirokolobova@mmbi.info

Abstract

In the course of conducted studies the influence of climatic fluctuations on the structural and production characteristics of the pelagic zone was determined using both long-term data series on the chl-*a* content in situ and direct taxonomic study of the pelagic phytocenosis in local areas of the Barents Sea during spring activation. The timing of the onset, dynamics of development and structural organization of spring phytoplankton bloom were determined. A technique was developed for using $\delta^{18}\text{O}$ isotope ratios to assess individual stoichiometric ratios and primary production of water areas. New information was obtained on the spring pelagic complex of zooplankton in the areas of the Arctic archipelago of Novaya Zemlya. The first unique studies of bacterio- and viroplankton were conducted in previously unstudied coastal areas of the Novaya Zemlya archipelago. Seasonal hydrochemical parameters of the water masses of the Kola Bay are given.

Keywords:

Barents Sea, MIZ, isotopic tracers, chlorophyll *a*, viroplankton, bacterioplankton, phytoplankton, zooplankton

Введение

В настоящее время основной целью научной деятельности лаборатории планктона является оценка влияния биотических и абиотических факторов на структуру и функционирование планктонной биоты. Продолжается накопление знаний в областях с дефицитом информации на временной либо пространственной шкалах – изучение всех компонентов пелагиали в гидрологически активных районах с потенциально высоким продукционным потенциалом.

Происходящие климатические изменения в Арктике оказывают значительное влияние на морские экосистемы (The changing ..., 2008; The role ..., 2013; Comiso, Hall, 2014). Они затрагивают различные трофические уровни и изменяют биоразнообразие, структуру и продуктивность сообществ (IPCC ..., 2019; Phytoplankton ..., 2021). В последнее время регистрируется увеличение объема и повышение температуры атлантических вод, поступающих в Баренцево море, и связанное с этим сокращение площади морского льда и увеличение периода открытой воды (Comiso, 2012; Quantifying ..., 2012; Boitsov et al, 2012; Role ..., 2017).

Область дрейфующих льдов – уникальный биотоп, где неразрывно связаны два компонента первичных продуцентов – пелагическая и ледовая флора (Биологические 2012; Role ..., 2017; Makarevich et al., 2022), являющиеся основой создания органического вещества Баренцева моря (Microphytoplankton ..., 2018; The advective ..., 2018). Исследования проводились как с использованием длительных рядов многолетних данных – для выявления влияния климатических флуктуаций на структурно-продукционные характеристики пелагиали по содержанию хлорофилла *a in situ*, так и на локальных участках акватории в период весенней активизации пелагического фитоплена, уровень которой определяет все дальнейшее развитие экосистемы арктических морей в течение года. В северной части Баренцева моря начало этого процесса традиционно связывают с прикромочной ледовой зоной, в юго-восточной части – с районами мелководий и струями основных атлантических течений. Однако до настоящего времени нет единого мнения о сроках и условиях начала весенней активизации пелагического альгоценоза.

Применение новых методических подходов, в частности, комбинации изотопных параметров, солености и биогенных элементов, позволяет рассмотреть гидрологические, гидрохимические и гидробиологические процессы в пелагиали в единой системе их взаимосвязи, проанализировать состав водных масс, выделить наиболее продуктивные районы. Необходимо отметить, что изотопное отношение $\delta^{18}\text{O}$ широко применяется в современной океанографии для анализа взаимодействий вод различного происхождения. Нами предложено использовать изотопные соотношения для оценки индивидуальных стехиометрических соотношений и первичной продукции. Определение начальных концентраций биогенных компонентов, необходимых для оценки уровня биологической продуктивности, связано с некоторыми трудностями. Разрешение этой проблемы – одна из основных целей исследований.

Ключевым компонентом морских экосистем, который связывает между собой первичных продуцентов с более высокими трофическими уровнями, является зоопланктон, который выступает в качестве основного кормового объекта для рыб, определяя общую продуктивность водоема. Зоопланктонные сообщества могут рассматриваться как индикаторы состояния морских экосистем, которое во многом отражает их динамику в условиях современных климатических вариаций и усиливающегося антропогенного пресса (Тимофеев, 2000; Ecosystem ..., 2009; Дворецкий, Дворецкий, 2015).

Несмотря на исследования летнего зоопланктона в восточной части Баренцева моря, сведения о весеннем пелагическом комплексе в литературе отсутствуют.

Учитывая, что реакцию сообществ арктического планктона на океаническое потепление можно выявлять лишь при наличии всех сезонных данных, было выполнено исследование по изучению структуры мезозоопланктона вблизи архипелага Новая Земля в период весеннего цветения фитопланктона.

В Арктике важнейшим и часто доминирующим представителем планктонных пищевых сетей являются прокариоты, играющие ключевую роль в биогеохимических циклах (The ecological ..., 1982;

Fenchel, 2008). При этом наименее изученным компонентом полярных экосистем до настоящего времени остаются вирусы, активно регулирующие продукцию как прокариотных, так и эукариотных микроорганизмов в пелагиали. В этой связи были проведены уникальные исследования в ранее недоступных прибрежных районах архипелага Новая Земля летом 2022 г.

Материал и методы

Данные для анализа хлорофилла *a* были получены в ходе 25 рейсов Мурманского морского биологического института РАН в Баренцевом море и сопредельных водах с 1984 по 2020 гг. (рис. 1).

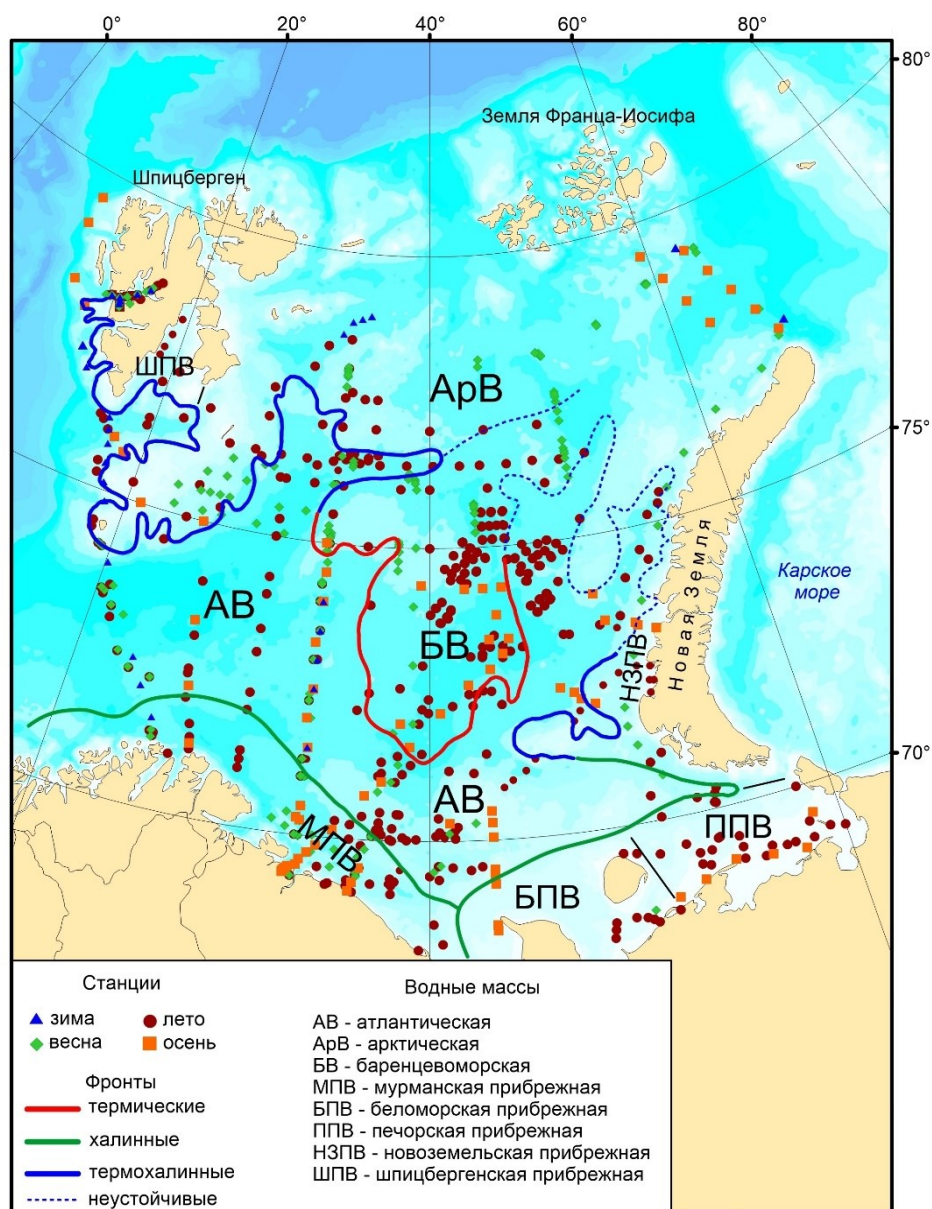


Рис. 1. Станции отбора проб для анализа хлорофилла *a* в Баренцевом море в 1984–2020 гг. Среднее многолетнее положение фронтальных зон и водные массы Баренцева моря приведены по: Climate ..., 2012

Fig. 1. Sampling stations for chlorophyll a analysis in the Barents Sea in 1984–2020, average long-term position of frontal zones and water masses of the Barents Sea (Climate ..., 2012)

Анализ выполнен на основе 765 проб, отобранных батометром Нискина в поверхностном слое воды (до глубины 1 м). С 1984 по 1993 годы концентрацию хлорофилла *a* определяли методом флуориметрии (Strickland, Parsons, 1972), в 2006–2020 гг. – по стандартной методике (ГОСТ ..., 2001). Распределение хлорофилла *a* рассматривалось в отношении основных водных масс, выделенных по гидрологическим критериям (Food ..., 2006; Воды ..., 2016). Использовались следующие предикторы сезонных и пространственных изменений хлорофилла *a*: 1) зимний (декабрь–февраль) индекс Североатлантического колебания (NAO); 2) индекс Арктического колебания (АО); 3) аномалии среднегодовой температуры и солености на разрезе «Кольский меридиан» (dT , dS); 4) площади ледового покрова Баренцева моря (SIE, годовая; SIE-а, апрель; SIE-с, сентябрь, тыс. км²). Сравнение выборок по сезонам и водным массам проводилось с помощью однофакторного дисперсионного анализа или теста Краскела-Уоллиса (Zar, 1999). Множественные сравнения выполнены с использованием теста Тьюки-Крамера или теста Z Краскела-Уоллиса (Zar, 1999). Общие тенденции изменения концентрации хлорофилла *a* с учетом динамики климатических факторов выявлялись с помощью моделей, основанных на многофакторных регрессиях (Legendre, Legendre, 1998). Статистическая значимость независимых переменных (климатических предикторов) оценивалась на основе теста Вальда (Legendre, Legendre, 1998). Вклад климатических факторов в общую вариацию хлорофилла *a* определялся коэффициентом детерминации R^2 . Статистическая обработка данных проводилась с помощью Statistica 10 (StatSoft Inc., США) и NCSS-PASS 2004 (NCSS Statistical Software, США).

Для выявления центров ранневесеннего цветения работы были проведены в ходе рейса НИС «Дальние Зеленцы» с 10 марта по 12 апреля 2021 г. и охватили обширную часть акватории Баренцева моря, свободную от льда. Выполнено 9 разрезов в широтном и меридиональном направлении, включавших 52 гидрологические и 34 комплексные станции. Пробы отбирали и анализировали с выполнением всех стандартных процедур.

В апреле 2019 г. материалом для исследования микроводорослей послужили планктонные сборы, выполненные на северо-востоке Баренцева моря в ходе экспедиционного рейса на НИС «Дальние Зеленцы». Для выделения водных масс и определения их границ были использованы метод градиентов и классический TS -анализ (Мамаев, 1987). В качестве критерия наличия фронтальной зоны на поверхности моря принималось значение горизонтальных градиентов температуры и солености, в 5 раз превышающее климатические градиенты для Баренцева моря: 0.01 °C/км и 0.001 ‰/км (Воды ..., 2016). Обработка проб осуществлялась по стандартным гидробиологическим методикам.

Пробы зоопланктона получены во время экспедиций Мурманского морского биологического института РАН (ММБИ) на НИС «Дальние Зеленцы» в мае 2016 г. (прибрежные воды Новой Земли). Пробы отбирали от дна до поверхности с помощью сети Джели, фиксировали формалином, последующую обработку и анализ полученного материала проводили в лаборатории по стандартным методикам. Все расчеты и статистический анализ выполнены с использованием программных пакетов Microsoft Excel 2003, NCSS-PASS 97 и Primer 5.0.

Материал о структурных характеристиках сообществ бактерио- и вириопланктона был получен в прибрежных районах архипелага Новая Земля летом 2022 г. Подсчет вирусных частиц и бактериальных клеток осуществляли стандартным методом эпифлуоресцентной микроскопии.

В 2024 году сотрудниками Мурманского морского биологического института проведен мониторинг экосистемы Кольского залива. Гидрохимические исследования осуществлялись на 8 станциях (табл. 1) и включали определение биогенных элементов: азота нитритного, азота нитратного, фосфора фосфатного и кремния силикатов. Для анализа были использованы стандартные гидрохимические методы: фосфаты определяли методом Морфи-Райли, нитриты и нитраты – методом Берншнайндера-Робинсона, силикаты – методом Королева (Справочник ..., 1991).

Таблица 1

Координаты гидрохимических станций в Кольском заливе в 2024 г.

Table 1

Coordinates of hydrochemical stations in the Kola Bay in 2024

Район	Станция	Координаты	
		в. д.	с. ш.
Южное колено	1 – Абрам-мыс	33°01'16"	68°58'18"
	2 – мыс Еловый	32°58'04"	68°53'40"
	3 – мыс Крестовый	33°03'54"	68°52'53"
Среднее колено	4 – мыс Белокаменный	33°09'53"	69°05'11"
	5 – мыс Ретинский	33°16'24"	69°05'56"
	6 – губа Грязная	33°19'39"	69°03'41"
	7 – губа Хлебная	33°24'35"	69°04'02"
	8 – губа Ваенга	33°27'08"	69°04'59"
Северное колено	9 – мыс Тоня	33°25'45"	69°11'21"

Результаты и обсуждение

Методика оценки индивидуальных стехиометрических соотношений и первичной продукции с использованием изотопного параметра $\delta^{18}\text{O}$ основана на оценке потребления биогенных элементов. Основная проблема при использовании данной методики – определение точки отсчета концентраций биогенных элементов, от которой рассчитывается биологическая продуктивность. Трассерами определения этой точки отсчета являются величины солености и изотопного параметра $\delta^{18}\text{O}$. Подробно методика расчета первичной продукции по потреблению биогенных элементов представлена в работах (Parameter..., 2023; Hydrochemical..., 2023). В Баренцевом море морская вода состоит из трех составляющих: атлантических, речных и ледовых вод. Относительные объемы этих базовых вод рассчитываются с использованием простого уравнения смешения:

$$C_{\text{con}} = f_a C_a + f_r C_r + f_i C_i, \\ f_a + f_r + f_i = 1,$$

где C_a – средняя концентрация исследуемого элемента в «чисто» атлантических водах; f_a – относительный объем «чисто» атлантических вод в результирующей водной массе, %; C_r – средняя концентрация исследуемого элемента в «чистых» речных водах; f_r – относительный объем «чистой» речной воды, %; C_i – средняя концентрация исследуемого элемента в «ледовых» водах; f_i – объем образовавшегося или растаявшего морского льда, приведенный к плотности воды или объему талой воды, %, «ледовые» воды.

С помощью полученных объемов базовых вод и измеренных концентраций биогенных элементов определяется «консервативная» концентрация конкретного биогенного элемента (например, фосфатного фосфора), которая зависит только от смешения различных вод без учета фотосинтетической или геохимической активности. Разница между этой и полученной концентрацией в конкретной пробе воды будет представлять собой «неконсервативную» концентрацию. Последняя состоит из «продуктивной» (изменения концентрации в результате процесса фотосинтеза или минерализации органического вещества) и «непродуктивной» компоненты (изменения концентрации в результате обмена с нижележащими слоями в результате вертикального перемешивания «непродуктивной» составляющей), а также притока в результате адвекции. Для перехода от величины потребления биогенных веществ к первичной продукции используются усредненные стехиометрические соотношения Редфилда-Ричардса для каждой систематической группы фитопланктона. Их относительный вклад в первичную продукцию есть измеренное (реальное) стехиометрическое отношение углерода к одному из биогенных элементов при использовании

значения относительного химического состава фитопланктона. Зная количество углерода, можно рассчитать первичную продукцию. Таким образом, применение предложенной методики позволяет рассматривать результаты гидрохимических исследований не как отдельный блок, а как комплекс гидрологических, гидрохимических и гидробиологических взаимодействий не на качественном, а на количественном уровне, а также оценить вклад в первичную продукцию всех компонентов баланса биогенных элементов и перейти к изучению климатической изменчивости потребления биогенных элементов и продуктивности исследуемой акватории.

Первичные продуценты. В ходе изучения распределения хлорофилла *a* в различных водных массах и влияния климатических факторов на его динамику были выявлены существенные сезонные и пространственные вариации содержания хлорофилла *a* в поверхностном слое (табл. 2). Локализация центров с повышенными концентрациями фитопигментов в разные сезоны года различна.

Таблица 2

**Концентрации хлорофилла *a* в поверхностных водных массах
Баренцева моря и сопредельных вод в 1984–2020 гг., мг/м³**

Table 2

**Concentrations of chlorophyll *a* in surface water masses
Barents Sea and adjacent waters in 1984–2020, mg/m³**

Водная масса	Зима	Весна	Лето	Осень
Арктическая	<u>0.10–0.22</u> 0.16±0.06	<u>0.28–5.61</u> 1.54±1.50	<u>0.05–1.51</u> 0.30±0.37	<u>0.18–0.36</u> 0.25±0.07
Атлантическая	<u>0.05–0.21</u> 0.14±0.06	<u>0.13–4.59</u> 0.74±0.94	<u>0.03–4.99</u> 0.98±0.78	<u>0.12–1.22</u> 0.51±0.37
Баренцевоморская	–	<u>0.13–2.58</u> 0.44±0.58	<u>0.03–12.36</u> 0.57±1.09	<u>0.08–0.91</u> 0.42±0.24
Мурманская прибрежная	<u>0.13–0.21</u> 0.17±0.06	<u>0.01–1.91</u> 0.46±0.38	<u>0.14–2.78</u> 0.76±0.48	<u>0.11–1.65</u> 0.66±0.41
Новоземельская прибрежная	–	<u>1.12–3.18</u> 2.06±1.04	<u>0.09–3.06</u> 0.65±0.77	<u>0.32–0.57</u> 0.44±0.09
Печорская прибрежная	–	–	<u>0.14–0.96</u> 0.41±0.23	<u>0.60–1.48</u> 0.95±0.37
Шпицбергенская прибрежная	<u>0.23–0.28</u> 0.26±0.02	<u>1.12–8.25</u> 3.77±2.51	<u>0.15–2.99</u> 0.84±0.61	<u>0.11–0.18</u> 0.15±0.03
Беломорская прибрежная	–	–	<u>0.28–1.57</u> 0.81±0.36	<u>0.45–1.19</u> 0.98±0.27

ПРИМЕЧАНИЕ. Числитель – минимальное и максимальное значения, знаменатель – среднее значение ± стандартное отклонение.

Чтобы проследить сезонную динамику развития фитопланктона на акватории моря, были построены карты аномалий внутригодового хода концентраций хлорофилла *a* (рис. 2). Летние аномалии рассчитывались по отношению к базовому периоду март–август (рис. 2А), осенние – июнь–ноябрь (рис. 2Б). Таким образом, отрицательные аномалии будут наблюдаться в районах, где концентрация хлорофилла *a* летом меньше, чем весной, и осенью меньше, чем летом. В районах, для которых характерно увеличение концентрации от весны к лету и от лета к осени, аномалии будут положительными.

Для арктической водной массы было характерно достижение максимальных концентраций хлорофилла *a* весной и последующее их уменьшение летом и осенью. В атлантической водной массе наиболее продуктивным был летний период. Области увеличения концентрации хлорофилла *a* в общих чертах соответствуют области распространения атлантических водных масс (рис. 2А).

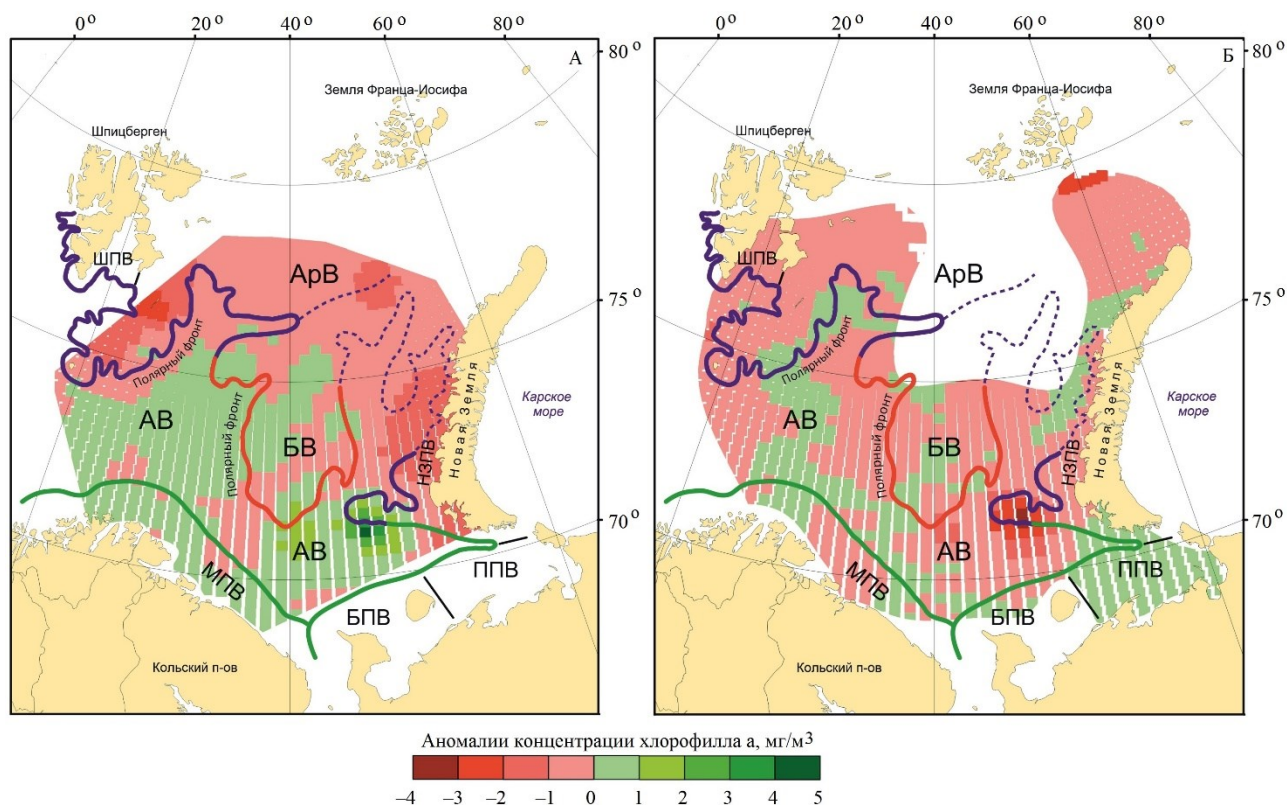


Рис. 2. Аномалии концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое водных масс Баренцева моря летом (А) и осенью (Б):

АрВ – арктическая, АВ – атлантическая, БВ – баренцевоморская, МПВ – мурманская прибрежная, НЗВП – новоземельская прибрежная, ППВ – печорская прибрежная, ШПВ – шпицбергенская прибрежная, БПВ – беломорская прибрежная

Fig. 2. Anomalies of chlorophyll *a* concentration in the surface layer water masses of the Barents Sea summer (A) and autumn (B):

АрВ – Arctic, АВ – Atlantic, БВ – Barents Sea, МПВ – Murmansk coastal, НЗВП – Novaya Zemlya coastal, ППВ – Pechora coastal, ШПВ – Spitsbergen coastal, БПВ – White Sea coastal

Чтобы оценить относительный вклад каждой водной массы в производство первичной продукции Баренцева моря, необходимо учитывать не только концентрацию хлорофилла *a* в различные сезоны года в каждой, но и площадь, которую она занимает на акватории моря. Используя данные о средней сезонной концентрации хлорофилла *a* и средней многолетней площади водной массы, было рассчитано относительное содержание хлорофилла *a* в водных массах Баренцева моря в процентах от годового (рис. 3). Площади водных масс были вычислены по карте в их средних границах, указанных на рис. 2.

Наибольшее относительное содержание хлорофилла *a* в поверхностном слое Баренцева моря было зарегистрировано в весенний период – 46 % от годового (20.4 % – арктическая водная масса), что является характерной особенностью арктической и субарктической зоны Мирового океана, где основная часть годовой первичной продукции формируется во время весеннего цветения фитопланктона. Летом этот показатель снизился до 28.7 %, при этом наибольшее содержание хлорофилла *a* было отмечено в атлантической водной масса – 11.8 %. Осенью и зимой продолжалось снижение относительного содержания хлорофилла *a* до 20.6 и 4.7 % соответственно. Наибольший вклад в суммарное годовое содержание хлорофилла *a* внесли арктическая и атлантическая водные массы (рис. 3).

Наблюдалась также и межгодовая изменчивость концентраций и пространственного распределения хлорофилла *a* на акватории Баренцева моря. Развитие фитопланктона определяется многими факторами, большинство из которых имеют под собой климатическую основу.

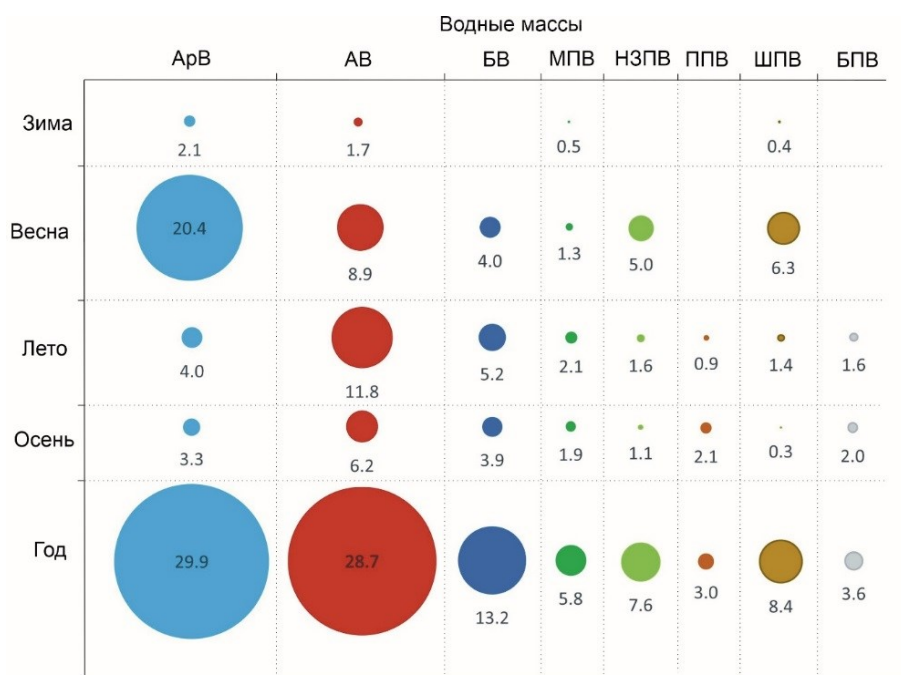


Рис. 3. Относительное содержание хлорофилла *a* в поверхностном слое водных масс Баренцева моря, %:
АрВ – арктическая, АВ – атлантическая, БВ – баренцевоморская, МПВ – мурманская прибрежная, НЗВП – новоземельская прибрежная, ППВ – печорская прибрежная, ШПВ – шпицбергенская прибрежная, БПВ – беломорская прибрежная
Fig. 3. Relative content of chlorophyll *a* in the surface layer of water masses of the Barents Sea, %:
АрВ – Arctic, АВ – Atlantic, БВ – Barents Sea, МПВ – Murmansk coastal, НЗВП – Novaya Zemlya coastal, ППВ – Pechora coastal, ШПВ – Spitsbergen coastal, БПВ – White Sea coastal

Моделирование, основанное на многофакторных регрессиях – модули GLM и GLZ (Generalized Linear Models) (Legendre, Legendre, 1998), позволило оценить характер и дать количественную оценку влияния различных климатических факторов.

Практически все факторы, кроме площади льда в сентябре, были значимо связаны с концентрацией хлорофилла *a* в поверхностном слое. Обнаружена прямая зависимость концентрации хлорофилла *a* от большинства климатических факторов, о чем свидетельствовали положительные коэффициенты регрессионной модели. В случае индекса АО и среднегодовой площади ледового покрова обнаружена обратная зависимость. Найденная линейная модель была статистически значимой (множественный $R = 0.39$, множественный $R^2 = 0.15$, скорректированный $R^2 = 0.14$, $F = 17.23$, $p < 0.01$).

Таким образом, использование многолетних данных позволило уточнить представления об особенностях пространственного распределения хлорофилла *a* в Баренцевом море. Получены новые сведения о локализации хлорофилла *a* в пределах основных водных масс. Средние концентрации хлорофилла *a* в Баренцевом море достигают максимальных значений в весенний период, летом и осенью – снижаются. В весенний период продуцируется около 46 % от суммарного годового количества хлорофилла. В летний период этот показатель снижается до 28 %, в течение осени и зимы – до 21 и 5 % соответственно. Наибольший вклад в суммарное годовое содержание хлорофилла *a* вносят арктическая и атлантическая водные массы. Для арктических вод характерно достижение максимальных концентраций хлорофилла *a* весной и последующее их уменьшение летом и осенью. В атлантических водах наиболее продуктивным является летний период. В целом в более южных районах моря достижение максимальных концентраций хлорофилла *a* происходит позже, чем в северных. Вероятно, это связано с особенностями формирования устойчивой стратификации водной толщи.

Необходимо отметить, что подобный подход позволяет увидеть общую картину, но при этом теряются некоторые детали, которые зачастую ощутимо меняют интерпретацию результатов. Примером могут служить результаты съемки, проведенной в марте–апреле 2021 г. на свободной от льда акватории Баренцева моря (рис. 4).

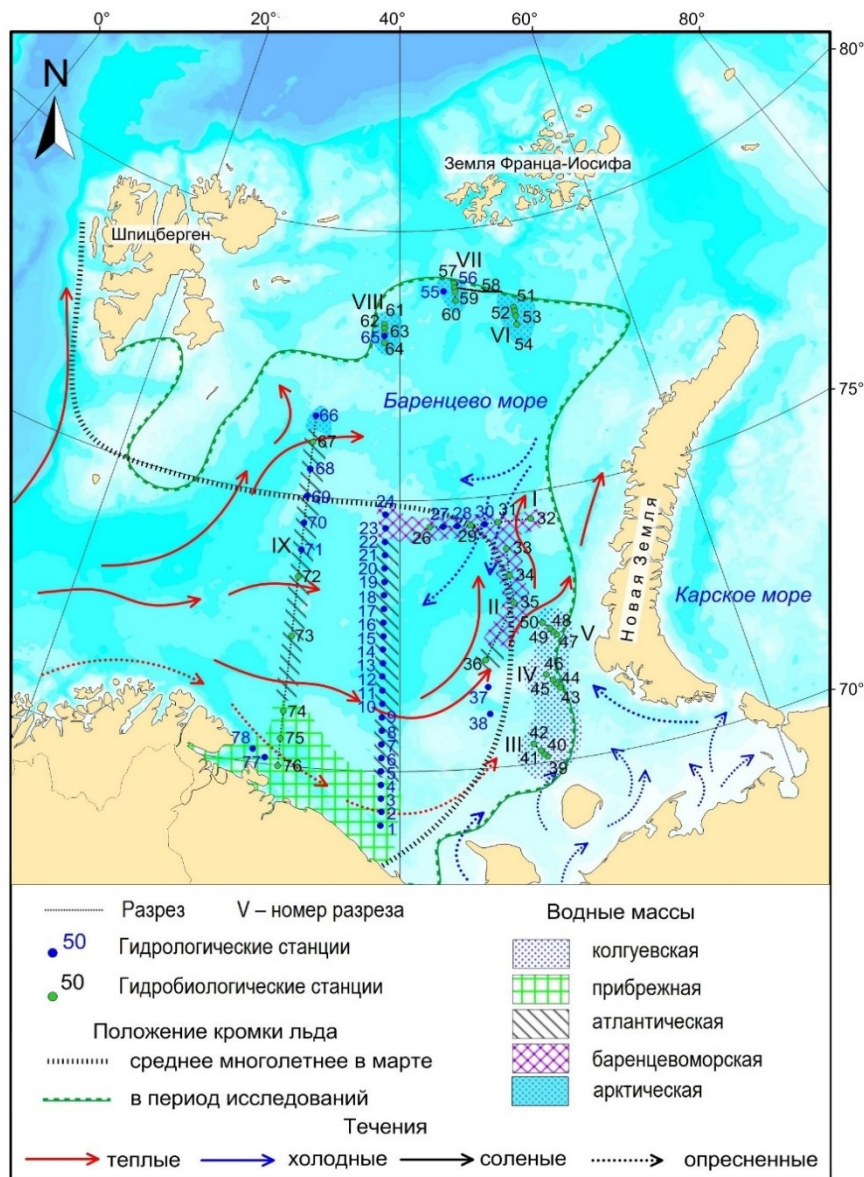


Рис. 4. Ледовые условия и расположение станций в Баренцевом море в марте–апреле 2021 г.
Fig. 4. Ice conditions and station locations in the Barents Sea, March–April 2021

По данным этого исследования, пространственное распределение концентраций хлорофилла *a*, их абсолютные и средние значения существенно различались в разных по происхождению водах Баренцева моря (рис. 5). Линейной зависимости между изменениями концентраций хлорофилла *a* и температурными или соленостными характеристиками воды не наблюдалось. Динамика концентрации хлорофилла *a*, по-видимому, связана не с термохалинными характеристиками водных масс, а с их происхождением, путями миграции и направлениями течений.

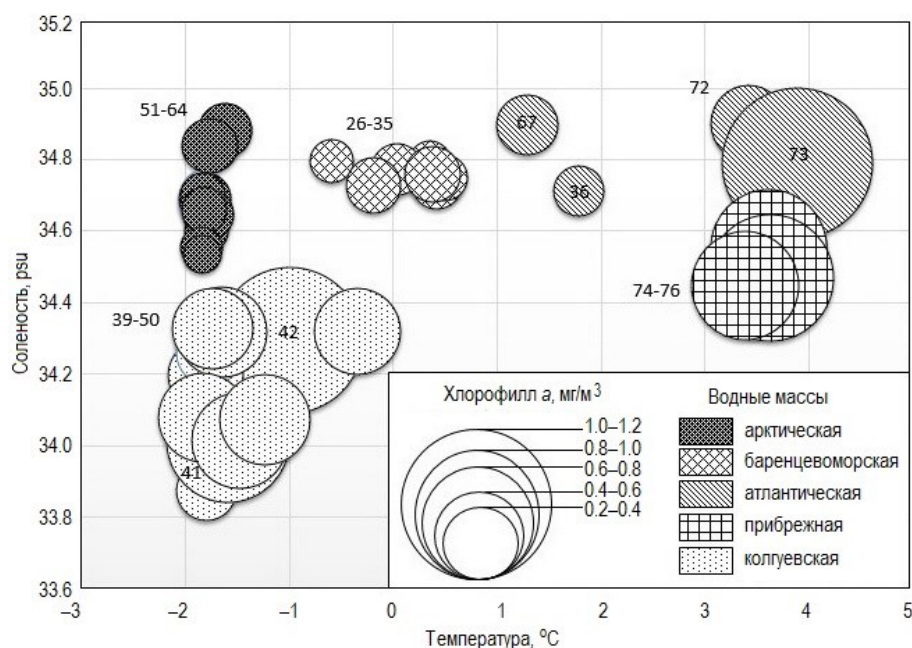


Рис. 5. Концентрации хлорофилла *a*, осредненные для слоя 0–50 м, в области *TS*-диаграммы, весна 2021 г.
Fig. 5. Concentrations of chlorophyll *a* averaged for the 0–50 m horizon in the *TS*-region of the diagram, spring 2021

Были выявлены разобщенные центры ранневесеннего цветения в прибрежных водах – на юго-востоке и юго-западе Баренцева моря. В конце марта–начале апреля максимальные концентрации хлорофилла *a* в прибрежных водах достигали значений около 1 мг/м³. В это же время в баренцевоморских и арктических водах максимум концентраций не превышал 0.20 мг/м³. Распределение биогенных элементов соответствовало зимнему периоду, когда вертикальные градиенты этих параметров еще не сформировались. Величины насыщения вод кислородом выше 100 %-го уровня (в разной степени на всей исследованной акватории) характеризовали активизацию процесса фотосинтеза в фитопланктонном сообществе.

Отсутствие прямой связи между гидрологической структурой водной толщи и микропланктоном максимально проявляется при проведении прямых таксономических исследований. В ходе многолетних наблюдений было изучено влияние полярного фронта и кромки льда на структурно-функциональные характеристики пелагического альгоценоза. Анализ воздействия термохалинных характеристик на концентрацию хлорофилла *a* показал, что она существенно различается в водах разного генезиса, т. е. полярный фронт разделяет более продуктивные арктические воды от атлантических. При этом анализ видового состава фитопланктонных сообществ практически показывает его идентичность. Более того, пелагические фитоценозы в атлантических и арктических водах находились на одной стадии годового сукцессионного цикла – ранневесенней.

В области ледовой кромки изучение микрофитопланктона проводилось в апреле 2019 г. На акватории исследованного участка (рис. 6) по гидрологическим показателям было выделено три типа водных масс.

В западной части (разрезы I и II) наибольшую площадь занимали баренцевоморские воды, в восточной (разрез III) они обнаруживались только в придонной пелагиали, а от поверхности до глубин 75–120 м распространялись поверхностные арктические водные массы. На двух южных станциях разреза I прослеживалось влияние поверхностных атлантических течений в виде выраженного термоклина, отделяющего теплые атлантические воды от подстилающих баренцевоморских. На северных станциях 22–24 этого разреза водная толща была однородной с характеристиками, соответствующими водной массе Баренцева моря. По максимальным горизонтальным градиентам температуры

полярный фронт на поверхности моря располагался между станциями 24 и 26. Южную часть разреза II (станции 31–33) также занимали баренцевоморские воды с однородной гидрологической структурой. При этом на его северных станциях 28–30, расположенных в непосредственной близости от кромки льда, данные водные массы подстилали поверхностный слой холодных распресненных арктических вод, и на поверхности моря между станциями 30 и 31 отмечался четко выраженный прикраевой фронт.

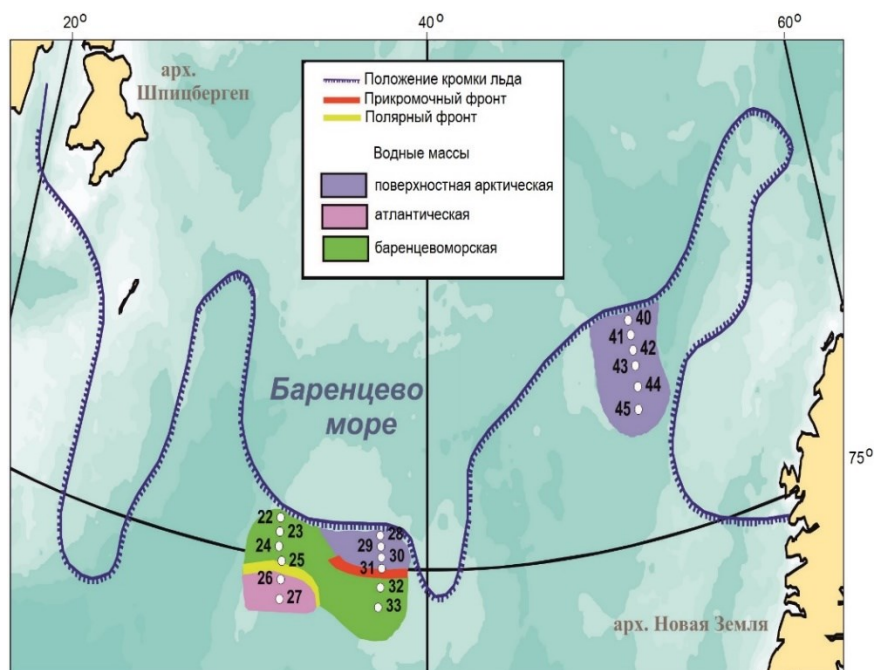


Рис. 6. Карта-схема района исследований в апреле 2019 г.:
разрез I – станции 22–27, разрез II – станции 28–33, разрез III – станции 40–45
Fig. 6. Map of the research area, April 2019:
section I – stations 22–27, section II – stations 28–33, section III – stations 40–45

В исследованной области Баренцева моря отмечен 61 вид фитопланктона: 36 – диатомовые, 23 – динофитовые, 1 – криптофитовые, 1 – диктиохофитовые.

На всем исследованном участке акватории по численности доминировал ранневесенний комплекс диатомовых водорослей: *Pauliella taeniata* (разрезы II и III), *Fragilariopsis oceanica* (разрез III) и мелкие виды рода *Chaetoceros* (разрезы I и II) (рис. 7).

По количественным показателям и таксономическому составу наблюдаемое пространственное распределение организмов отличалось высокой степенью мозаичности как между разрезами, так и между станциями каждого разреза.

Диапазон колебаний обилия микроводорослей составил 140–83000 кл/л при биомассе 0.04–118.65 мкг/л на разрезе III, 0.23–16.33 тыс. кл/л и 0.44–52.11 мкг/л на разрезе I, 1.12–35.33 тыс. кл/л и 2.39–63.61 мкг/л на разрезе II.

В атлантических водных массах численность фитопланктона была минимальна, а в баренцевоморских ее уровень был выше в 2–3.5 раза. В арктических водах на горизонтах 0 и 10 м концентрация организмов была примерно в 10 раз выше, чем в баренцевоморских, а в нижележащих слоях – в 1.5–2 раза. В распределении биомассы микроводорослей обнаруживалось аналогичное соотношение, но при этом ее средние величины в сообществе арктических водных масс превышали таковые баренцевоморских в 4 раза на глубинах 0 и 10 м, на 25 м – менее чем в 1.5 раза, а на 50 м – в 4 раза ниже.

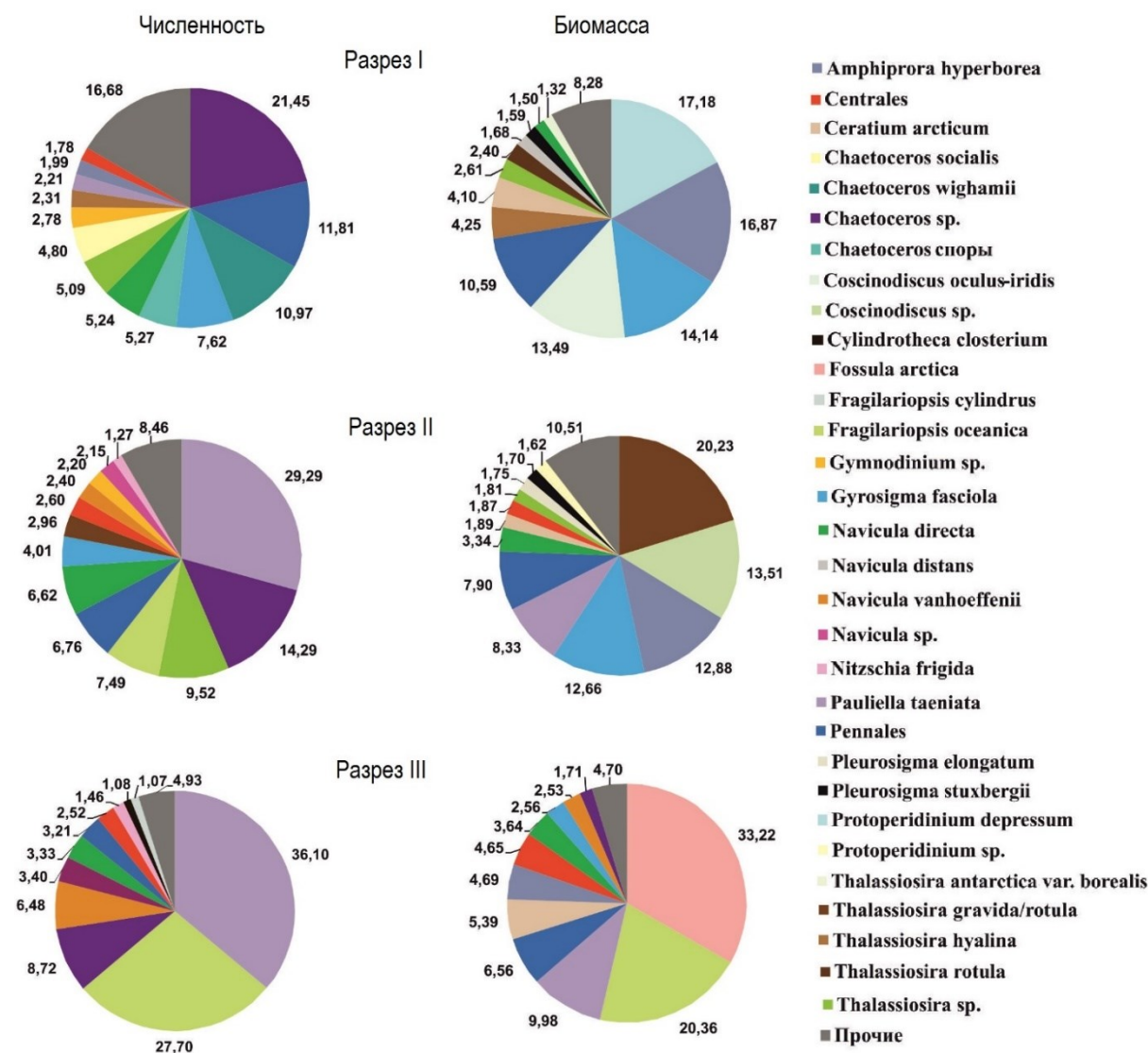


Рис. 7. Доля отдельных видов (в среднем по всем станциям и горизонтам отбора) в общей численности и биомассе пелагических альгоценозов исследованного района, %

Fig. 7. The proportion of individual species (on average for all stations and sampling horizons) from the total values of abundance and biomass of pelagic algal communities in the studied area, %

При сравнении качественного состава пелагических альгоценозов в различных водных массах показатель видового сходства (коэффициент Жаккара) микроводорослей для сообществ атлантических и баренцевоморских вод составил 24.69 %, баренцевоморских и арктических – 23.08 %, арктических и атлантических – 20.24 %. Столь низкие значения, безусловно, свидетельствуют о достоверном различии видовых комплексов фитопланктона в водных массах разного происхождения. При этом коэффициент Жаккара для станций 22, 28 и 40 в прикромочной зоне и ближайших к ним на разрезе (по мере отдаления от полей льда) станций 23, 29 и 41 составлял более 40 %.

Таким образом, в целом в изученной области Баренцева моря наблюдались неоднородность таксономического состава фитопланктона и мозаичное распределение его количественных и качественных характеристик. Выявленные отличия были более значительными в районах локализации водных масс разного типа, чем на станциях, расположенных как на различном расстоянии от ледовой кромки,

так и на разных разрезах. При этом из всего списка видов (61) лишь 15 в равной мере отмечались во всех типах водных масс, большинство из них составляли типичные компоненты весеннего комплекса, а остальную часть – динофлагелляты с круглогодичной встречаемостью. Акватория Баренцевоморского бассейна вблизи полей сезонного льда в ранневесенний период характеризовалась началом активизации развития первичных продуцентов. При этом на фоне общей неоднородности качественного состава и мозаичности пространственного распределения набор доминантов был в значительной степени сходен во всей прикромочной зоне. В то же время в разных ее участках изменение численности и биомассы микроводорослей в направлении от ледовой кромки носило различный характер, не обнаруживая общей закономерности. При этом не было выявлено никаких заметных признаков влияния компонентов ледовой флоры, попадающих в пелагиаль вследствие ледотаяния: список видов в сообществах узкой краевой зоны достоверно не отличался от такового в близлежащей области. Количественные показатели развития и уровень таксономического разнообразия микрофитопланктона в большей мере отличались у сообществ в районах локализации водных масс разного происхождения. По-видимому, в период, предшествующий массовому цветению фитопланктона, альгоценозы прикромочной зоны более подвержены воздействию гидрологических факторов. Происходящие в последние десятилетия в арктических морях сокращение площади ледового покрова и сдвиг сроков льдообразования и ледотаяния, безусловно, не могут не оказывать влияния на пространственно-временную структуру сообществ пелагических микроводорослей прикромочной зоны и прилегающей к ней части акватории. Тем не менее, есть все основания предполагать, что эти процессы в минимальной степени отразятся на их качественном составе и распределении видовых комплексов. Но при этом, вследствие удлинения периода открытой воды и, соответственно, продолжительности вегетации, вполне можно ожидать повышения величин количественных характеристик фитопланктона, что, в свою очередь, приведет к увеличению продуктивности морских экосистем в целом.

Исследования новоземельского зоопланктона. Весной 2016 г. у берегов Новой Земли в пробах обнаружено 54 таксона/группы мезозоопланктона. Голопланктонные организмы доминировали, несмотря на высокую относительную численность меропланктонных организмов (усоногих раков, иглокожих и личинок брюхоногих). Кластерный анализ выделил две основные группы станций (Dvoretsky, Dvoretsky, 2022). Выявленные кластеры соответствовали районированию по гидрографическим условиям. Кластер 1 соответствовал прибрежным водам Новой Земли, а кластер 2 – водам Баренцева моря, где присутствовали более холодные воды. В кластере 1 по общей плотности доминировали науплии *Thysanoessa* spp. (24 ± 6 %), яйца (21 ± 5 %) и науплии (18 ± 4 %) Copepoda, а также *Oithona similis* (14 ± 4 %) (рис. 8). Кластер 2 выделялся преобладанием *O. similis* (18 ± 4 %) в сочетании с относительно высокой численностью науплиев Copepoda (17 ± 5 %), *Fritillaria borealis* (12 ± 3 %) и науплиев усоногих (11 ± 3 %) (рис. 8). Биомасса мезозоопланктона в кластерах 1 и 2 колебалась от 375 до 1485 и от 1001 до 9591 мг/м² (сухой массы) соответственно (Dvoretsky, Dvoretsky, 2022). *Parasagitta elegans* (32 ± 9 %) и *Calanus finmarchicus* (20 ± 9 %) вносили наибольший вклад в общую биомассу мезозоопланктона на станциях кластера 1, тогда как в кластере 2 доминировали *C. finmarchicus* (30 ± 3 %), *Metridia longa* (17 ± 7 %). Комплекс мезозоопланктона на станциях кластера 1 отличался от такового на станциях кластера 2 на уровне сходства 55 % (ANOSIM, $R = 0.78$, $P = 0.002$) (Dvoretsky, Dvoretsky, 2022). Анализ канонических соответствий показал, что широта, долгота и концентрация хлорофилла *a* были значимыми факторами, которые способствовали наблюдаемой изменчивости численности мезозоопланктона. Общая численность мезозоопланктона положительно коррелирует с долготой и отрицательно со средней температурой и концентрацией хлорофилла *a*. Численность *C. glacialis*, *C. hyperboreus*, *M. longa*, *Microcalanus* spp., *Pseudocalanus* spp. и *F. borealis* увеличивалась с широтой/долготой и уменьшалась с повышением температуры. Обилие обычных таксонов мезозоопланктона отрицательно коррелировало с концентрацией хлорофилла *a* на поверхности (Dvoretsky, Dvoretsky, 2022).

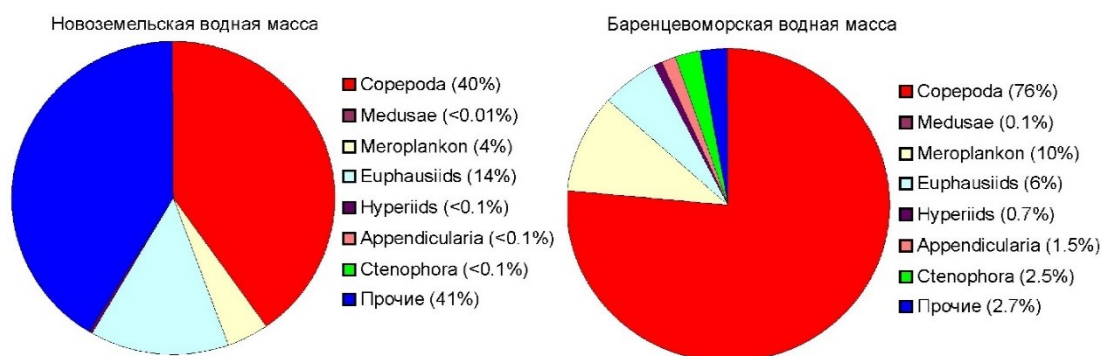


Рис. 8. Относительное обилие зоопланктона в восточной части Баренцева моря весной 2016 г.
Fig. 8. Relative abundance of zooplankton in the eastern Barents Sea in spring 2016

Таким образом, мезозоопланктон демонстрировал пространственную изменчивость численности и биомассы в различных экологических условиях в районе исследований. Высокая плотность меропланктона и младших стадий веслоногих ракообразных указывает на весеннее состояние сообщества мезозоопланктона. Проведенные исследования могут считаться фоновыми, а информация, полученная в ходе экспедиции, должна служить базовой для дальнейших работ, а также для сравнительного анализа с другими арктическими районами.

Микробиологические исследования. В прибрежных районах архипелага Новая Земля летом 2022 г. численность прокариот изменялась в пределах 0.2–0.9 млн кл/мл, биомасса – 2.8–9.9 мг С/м³, при диапазоне средних объемов клеток 0.025–0.089 мкм³ (рис. 9). Повышенные величины количественных показателей выявлены в слое 0–10 м (0.5±0.04 млн кл/мл, 6.6±0.5 мг С/м³), в то время как промежуточные и придонные слои имели более низкие значения (0.3±0.04 млн кл/мл, 4.0±0.3 мг С/м³).

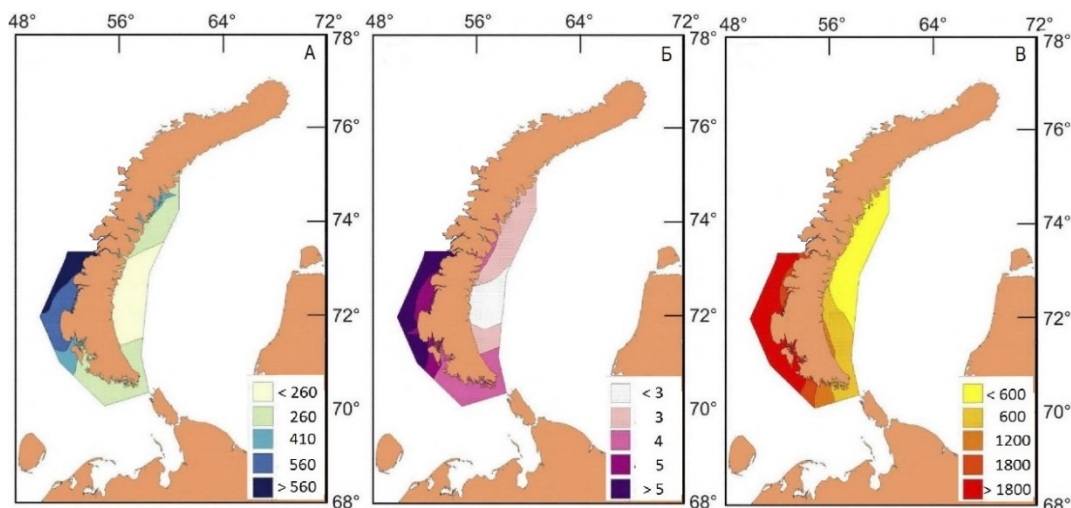


Рис. 9. Распределение количественных характеристик прокариот и вирусных частиц в прибрежных водах архипелага Новая Земля летом 2022 г.:

А – средняя численность прокариот, 10³ кл/мл; Б – средняя биомасса прокариот, мг С/м³; В – средняя численность вирусов, 10³ частиц/мл

Fig. 9. Distribution of quantitative characteristics of prokaryotes and virus particles in the coastal waters of the Novaya Zemlya archipelago in the summer of 2022:

А – average number of prokaryotes, 10³ cells/ml; Б – average biomass of prokaryotes, mg C/m³; В – average number of viruses, 10³ particles/ml

Количество вирусов изменялось от 0.6 до 3.2 млн частиц/мл, их биомасса от 0.04 до 0.11 мкг С/м³ (рис. 9). Рассчитанное количество контактов между вирио- и прокариотопланктоном составляло 0.1–3.2 в сутки. Максимальная концентрация и биомасса вирусов отмечены в слое 0–10 м (1.5 ± 0.2 млн частиц/мл, 0.08 ± 0.01 мкг С/м³), снижаясь ко дну до 1.3 ± 0.3 млн частиц/мл и 0.07 ± 0.01 мкг С/м³ соответственно.

Обилие вирусных частиц значительно превышало обилие клеток прокариот (в 1–8 раз). На фоне общего снижения всех количественных показателей с глубиной, их наибольшие значения отмечены в водах западной части архипелага, наименьшие – в водах его восточной части (рис. 9). Количество контактов между вирусами и прокариотами на западе было в 3 раза выше, чем на востоке. Выявленные различия определялись как обеспеченностью прокариот (потенциальных хозяев вирусов) лабильным субстратом, так и гидрологическими особенностями районов исследования.

В восточной части архипелага численность прокариот соответствовала осенним величинам в бессточной мелководной зоне Карского моря, в западной части значения показателя находились в более узких пределах, чем в заливе Моллера летом (Влияние ..., 2016; Гетеротрофный ..., 2023). В приведенных для сравнения акваториях диапазоны обилия вирусов значительно превосходили значения, полученные в наших исследованиях. Эта разница может быть объяснена более высоким обилием морских бактерий, которые служат потенциальными хозяевами для вирусов.

Сезонная изменчивость гидрохимических параметров водных масс Кольского залива выполнена в 2024 г. Средние показатели изученных параметров представлены в табл. 3

Таблица 3

Средние значения гидрохимических показателей в Кольском заливе в 2024 г., мкг/л

Table 3

Average values of hydrochemical indicators in the Kola Bay in 2024, mcg/l

Район	Сезон	Нитриты	Нитраты	Фосфаты	Кремний
Северное колено	Зима	—	—	—	—
	Весна	5.1	596.7	25.5	1271
	Лето	7.7	6.8	28.7	127
	Осень	0	31.7	11.2	49
Среднее колено	Зима	14.7	292.3	65.6	610
	Весна	13.0	322.5	89.4	1414
	Лето	10.7	137.3	64.9	747
	Осень	6.7	82.6	24.7	376
Южное колено	Зима	13.4	517.7	66.0	987
	Весна	7.6	295.9	24.3	1845
	Лето	11.8	138.5	55.3	1259
	Осень	5.7	66.4	20.2	894

По большинству главных биогенных элементов за период исследований (табл. 1) от зимнего к осеннему сезону наблюдается понижение средних концентраций в водах Кольского залива. Основные причины заключаются в снижении концентраций в результате обмена вод залива с морем, потреблении этих веществ продуцентами в процессе жизнедеятельности, оседании их на дне в виде труднорастворимого органического осадка. Характерное для весеннего периода увеличение количества Si (табл. 3) является следствием таяния снега, попадания талой воды в ручьи, реки и затем в залив, а также планового весеннего спуска вод Туломского водохранилища в устье Кольского залива. Содержание в водах фосфатов, как и нитритов, лишь немногим отличается весной и летом. Приток морской воды из моря в залив, насыщенной фосфатами в начале весны, вертикальное перемешивание, которое способствует транспортировке PO_4^{3-} от дна к поверхности в зимне-весенний период, увеличивают количество фосфора в заливе. Также известно о быстром возвращении в воду фосфора в виде фосфатных ионов в результате естественных трансформационных процессов, так как скорость его оборота в природном цикле экосистемы Кольского залива составляет около 18 сут. (Бардан,

Ишкулова, 2010). И очень важная причина высокого содержания фосфатов в Кольском заливе – антропогенное загрязнение. В моющих средствах, попадающих в залив, присутствуют СПАВ с большим содержанием PO_4^{3-} (бытовые воды также содержат и нитриты, и аммоний, при окислении которого образуется NO_2^-). Из таблицы 3 видно, что в южном колене количество нитратов в зимний период значительное (447.7 мкг/л), вместе с тем к осени плавно уменьшается. В среднем колене залива весной наблюдается небольшое увеличение концентраций NO_3^- в результате весенних паводков, водообмена поверхность–дно и попадания в эти части залива антропогенных вод. В летний период зафиксировано резкое уменьшение данного вещества, вероятно, из-за потребления его фитопланктоном при цветении.

При сравнении с литературными данными по гидрохимии Кольского залива прошлых лет наблюдается заметное расширение диапазонов как к минимуму, так и к максимуму почти по всем элементам (Кольский ..., 1997; Широкая, Овчинникова, 2011). Для фосфатов диапазон флуктуаций за год составил от значения ниже предела обнаружения метода (ст. 3, март) до 314.6 мкг/л (ст. 4, апрель). Выявленное на ст. 3 низкое значение PO_4^{3-} объясняется ее близким расположением к береговому стоку. Для нитритов минимальное количество зафиксировано на ст. 9 в сентябре (аналитический ноль), а максимум достиг в апреле на ст. 4 – 155.5 мкг/л. Этот единственный случай за год такого высокого содержания нитритов, зафиксированного нами, и он, безусловно, антропогенного происхождения. Для нитратов наименьшее количество было отмечено в июле на ст. 9 – 1.4 мкг/л, а наибольшее в марте на ст. 8 – 904.2 мкг/л. Для кремния диапазон концентраций в 2024 г. составил 20–2822 мкг/л, соответственно, в сентябре (ст. 9) и марте (ст. 2).

Таким образом, нами определены современные диапазоны концентраций главных биогенных элементов на исследованных участках Кольского залива в 2024 г. В результате антропогенного загрязнения содержание нитритного азота, по сравнению с 1990 гг., возросло примерно в 2.5 раза. Увеличилось и количество нитратов в заливе – в среднем примерно на 200 %. На момент исследований самым загрязненным по фосфатам являлось среднее колено – содержание PO_4^{3-} на этом участке стало выше в 2.3 раза по сравнению с более ранними исследованиями (Кольский ..., 1997). Территориально наименее чистыми по биогенным веществам являются воды у мыса Белокаменный и в губе Ваенга.

В ходе исследований, проведенных лабораторией планктона в последний пятилетний период, определено влияние климатических флуктуаций на структурно-продукционные характеристики пелагиали как с использованием многолетних рядов данных по содержанию хлорофилла *a in situ*, так и при проведении прямого таксономического изучения пелагического фитоцена на локальных участках акватории Баренцева моря в период весенней активизации. Определены сроки начала, динамика развития и структурной организации весеннего цветения фитопланктона. Разработана методика использования изотопных соотношений $\delta^{18}\text{O}$ для оценки индивидуальных стехиометрических соотношений и первичной продукции акваторий. Получены новые сведения о весеннем пелагическом комплексе зоопланктона в районе арктического архипелага Новая Земля, где также проведены уникальные исследования бактерио- и вириопланктона.

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ госрегистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Бардан С. И., Ишкулова Т. Г. Суточная изменчивость гидрохимических параметров в начальный период органотрофной фазы функционирования экосистемы Кольского залива (Баренцево море) // Изв. РАН. Сер. географ. 2010. № 4. С. 98–105.
2. Биологические компоненты сезонного льда / А. Ф. Сажин, Т. Н. Ратькова, С. А. Мошаров, Н. Д. Романова, И. В. Мошарова, Д. А. Портнова // Биологические ресурсы Белого моря: изучение и использование. СПб.: Изд. ЗИН РАН, 2012. С. 97–115.
3. Влияние вирусов на бактериопланктон открытой и прибрежной части Баренцева моря / М. П. Венгер, А. И. Копылов, Е. А. Заботкина, П. Р. Макаревич // Биол. моря. 2016. Т. 42, № 1. С. 19–26.

4. *Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость.* / В. К. Ожигин, В. А. Ившин, А. О. Трофимов, М. Ю. Карсаков. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2016. 260 с.
5. *Гетеротрофный* нано- и микропланктон Карского моря в осенний период / А. Ф. Сажин, Н. Д. Романова, А. И. Копылов, А. В. Романенко, Е. А. Заботкина // *Океанология*. 2023. Т. 63, № 2. С. 243–254.
6. *ГОСТ 17.1.4.02-90. ВОДА. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a** // Государственный контроль качества воды. М.: Изд-во стандартов, 2001. С. 551–563.
7. *Кольский залив: океанография, биология, экосистемы, поллютанты* / Отв. ред Г. Г. Матишов. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. 265 с.
8. *Мамаев О. И.* Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 296 с.
9. *Справочник гидрохимика: рыбное хозяйство* / А. И. Агатова, И. А. Налетова, В. Л. Зубаревич и др. / Под ред. В. В. Сапожникова. М.: Агропромиздат, 1991. 224 с.
10. *Тимофеев С. Ф.* Экология морского зоопланктона. Мурманск: Изд-во МГПИ, 2000. 216 с.
11. *Формирование* центров ранневесеннего цветения фитопланктона в Кольском заливе / Г. Г. Матишов, Н. В. Дружков, А. А. Намятов, Е. Ф. Марасаева, В. В. Ларионов, Д. В. Моисеев, И. В. Бронников, Т. Г. Ишкулова // *Докл. РАН*. 2000. Т. 375, № 1. С. 137–141.
12. *Широкая Т. А., Овчинникова С. И.* Гидрохимические исследования бассейна Кольского залива. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2011. 182 с.
13. *Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G.* Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // *ICES J. Mar. Sci.* 2012. Vol. 69. P. 833–840. doi:10.1093/icesjms/fss075
14. *Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries* / G. Matishov, D. Moiseev, O. Lyubina et al. // *Polar Biol.* 2012. Vol. 35. P. 1773–1790. URL: <https://doi.org/10.1007/s00300-012-1237-9>
15. *Comiso J. C.* Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover // *J. Climatol.* 2012. Vol. 25. P. 1176–1193. doi:10.1175/JCLI-D-11-00113.1
16. *Comiso J. C., Hall D. K.* Climate trends in the Arctic as observed from space // *Climate Change*. 2014. Vol. 5. P. 389–409. doi:10.1002/wcc.277
17. *Ecosystem Barents Sea.* Trondheim: Tapir Academic Press, 2009. 587 p.
18. *Fenchel T.* The microbial loop – 25 years later // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2008. Vol. 366. P. 99–103.
19. *Food webs and carbon flux in the Barents Sea* / P. Wassmann, M. Reigstad, T. Haug, B. Rudels, M. L. Carroll, H. Hop, G. W. Gabrielsen, S. Falk-Petersen, S. G. Denisenko, E. Arashkevich, D. Slagstad, O. Pavlova // *Prog. Oceanogr.* 2006. Vol. 71. P. 232–287.
20. *Hydrochemical basis of marine waters biological productivity, surrounding Svalbard archipelago* / A. A. Namyatov, P. R. Makarevich, I. V. Tokarev, I. A. Pastuhov // *Biol. Commun.* 2023. Vol. 68(1). P. 30–48. URL: <https://doi.org/10.21638/spbu03.2023.104>
21. *IPCC Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* / H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhal, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nikolai, A. Okem et al. (Eds.). 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/> (accessed on 08.05.2024).
22. *Legendre P., Legendre L.* Numerical ecology. Amsterdam: Elsevier, 1998. 853 p.
23. *Makarevich P. R., Vodopianova V. V., Bulavina A. S.* Dynamics of the spatial chlorophyll-*a* distribution at the Polar Front in the marginal ice zone of the Barents Sea during spring // *Water*. 2022. Vol. 14. P. 101. URL: <https://doi.org/10.3390/w14010101>
24. *Microphytoplankton community structure in the western Arctic Ocean: Surface layer variability of geographic and temporal considerations in summer* / Y. Wang, P. Xiang, J. Kang, Y. Y. Ye, G. M. Lin, Q. L. Yang, M. Lin // *Hydrobiologia*. 2018. Vol. 811. P. 295–312. doi:10.1007/s10750-017-3500-0
25. *Parameter $\delta^{18}\text{O}$ in the marine environment ecosystem studies on the example of the Barents Sea* / A. A. Namyatov, P. R. Makarevich, E. I. Druzhkova, I. A. Pastukhov // *Water*. 2023. Vol. 15. P. 328. doi:10.3390/w15020328

26. *Phytoplankton* biodiversity is more important for ecosystem functioning in highly variable thermal environments / E. Bestion, B. Haegeman, S. A. Codesal, A. Garreau, M. Huet, S. Barton, J. M. Montoya // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2021. Vol. 118. Article: e2019591118.
27. *Quantifying* the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat / M. Årthun, T. Eldevik, L. H. Smedsrud, Ø. Skagseth, R. B. Ingvaldsen // *J. Climatol*. 2012. Vol. 25. P. 4736–4743. doi:10.1175/JCLI-D-11-00466
28. *Role* for Atlantic inflows and sea ice loss on shifting phytoplankton blooms in the Barents Sea / L. Oziel, G. Neukermans, M. Ardyna, C. Lancelot, J.-L. Tison, P. Wassmann, J. Sirven, D. Ruiz-Pino, J.-C. Gascard // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2017. Vol. 122(6). P. 5121–5139. doi:10.1002/2016JC012582L
29. *Strickland J. D. H., Parsons T. R.* A practical handbook of seawater analysis // *Bull. Fish. Res. Board Can.* 1972. 310 p. URL: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1791>
30. The advective origin of an under-ice spring bloom in the Arctic Ocean using multiple observational platforms / G. Johnsen, M. Norli, M. Moline, I. Robbins, C. von Quillfeldt, K. Sørensen, F. Cottier, J. Berge // *Polar Biol*. 2018. Vol. 41. P. 1197–1216.
31. *The changing* climate of the Arctic / D. G. Barber, J. V. Lukovich, J. Keogak, S. Baryluk, L. Fortier, G. H. R. Henry // *Arctic*. 2008. Vol. 61(5). P. 7–26. doi:10.14430/arctic98
32. *The ecological* role of water-column microbes in the sea / F. Azam, T. Fenchel, J. G. Field et al. // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1982. Vol. 10. P. 257–263.
33. *The role* of the Barents Sea in the Arctic climate system / L. H. Smedsrud, I. Esau, R. B. Ingvaldsen, T. Eldevik, P. M. Haugan, C. Li, V. S. Lien, A. Olsen, A. M. Omar, O. H. Otterå, B. Risebrobakken, A. B. Sandø, V. A. Semenov, S. A. Sorokina // *Rev. Geophys.* 2013. Vol. 51(7). P. 1–35. doi:10.1002/rog.20017
34. *Zar J. H.* Biostatistical analysis. 4th ed. USA: Prentice-Hall Inc., 1999. 663 p.

References

1. Bardan S. I., Ishkulova T. G. Sutochnaya izmenchivost' gidrokhimicheskikh parametrov v nachal'nyy period organotrofnoy fazy funktsionirovaniya ekosistemy Kol'skogo zaliva (Barentsevo more) [The daily variability of the hydrochemical parameters in the initial period of the organotroph phase of the functioning of the ecosystem of the Kola Bay (Barents Sea)]. *Izvestiya RAN. Seriya: Geograficheskaya* [Izvestiya RAS. Geographical Series], 2010, No. 4, pp. 98–105 (In Russ.).
2. Sazhin A. F., Ratkova T. N., Mosharov S. A., Romanova N. D., Mosharova I. V., Portnova D. A. Biologicheskie komponenty sezonnoy l'da [Biological components of seasonal ice]. *Biologicheskie resursy Belogo morya: izuchenie i ispol'zovanie* [Biological resources of the White Sea: study and use], Saint Petersburg, Publ. Zool. Inst. RAS, 2012, pp. 97–115 (In Russ.).
3. Venger M. P., Kopylov A. I., Zabotkina E. A., Makarevich P. R. Vliyanie virusov na bakterioplankton otkrytoy i pribrezhnoy chasti Barentseva morya [The effect of viruses on bacterioplankton of the open and coastal part of the Barents Sea]. *Biologiya morya* [Marine Biology], 2016, Vol. 42, No. 1, pp. 19–26 (In Russ.).
4. Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. O., Karsakov M. Yu. *Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost'* [The water of the Barents Sea: structure, circulation, variability]. Murmansk, Publ. PINRO, 2016, 260 p. (In Russ.).
5. Sazhin A. F., Romanova N. D., Kopylov A. I., Romanenko A. V., Zabotkina E. A. Geterotrofnyy nano- i mikroplankton Karskogo morya v osenniy period [Heterotrophic nano- and microplankton of the Kara Sea in autumn]. *Okeanologiya* [Oceanology], 2023, Vol. 63, No. 2, pp. 243–254 (In Russ.).
6. GOST 17.1.4.02-90. VODA. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla a. Gosudarstvennyy kontrol' kachestva vody [GOST 17.1.4.02-90. WATER. Methodology for spectrophotometric determination of chlorophyll a. State Water Quality Control], Moscow, Publ. Standards, 2001, pp. 551–563. (In Russ.).
7. *Kol'skiy zaliv: okeanografiya, biologiya, ekosistemy, pollyutanty* [Kola Bay: oceanography, biology, ecosystems, pollutants]. Apatity, Publ. KSC RAS, 1997, 265 p. (In Russ.).

8. Mamaev O. I. *Termokhalinnyy analiz vod Mirovogo okeana* [Thermal analysis of the waters of the World Oceans]. Leningrad, Hydrometeoyzdat, 1987, 296 p. (In Russ.).
9. *Spravochnik gidrokhimika: rybnoe khozyaystvo* [Hydrochemist's Handbook: Fisheries]. Moscow, Agropromizdat, 1991, 224 p. (In Russ.).
10. Timofeev S. F. *Ekologiya morskogo zooplanktona* [Ecology of marine zooplankton]. Murmansk, Publ. MGPI, 2000, 216 p. (In Russ.).
11. Matishov G. G., Druzhkov N. V., Namyatov A. A., Marasaeva E. F., Larionov V. V., Moiseev D. V., Bronnikov I. V., Ishkulova T. G. Formirovanie tsentrov ranne-vesennego tsveteniya fitoplanktona v Kol'skom zalive [Formation of centers of the early-medium flowering of phytoplankton in the Kola Bay]. *Doklady RAN* [Doklady RAS], 2000, Vol. 375, No. 1, pp. 137–141 (In Russ.).
12. Shirokaya T. A., Ovchinnikova S. I. *Gidrokhimicheskie issledovaniya basseyna Kol'skogo zaliva* [Hydrochemical studies of the Kola Bay basin]. Murmansk, Publ. MSTU, 2011, 182 p. (In Russ.).
13. Boitsov V. D., Karsakov A. L., Trofimov A. G. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009. *ICES J. Mar. Sci.*, 2012, Vol. 69, pp. 833–840. doi:10.1093/icesjms/fss075
14. Matishov G., Moiseev D., Lyubina O. et al. Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries. *Polar Biol.*, 2012, Vol. 35, pp. 1773–1790. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00300-012-1237-9>
15. Comiso J. C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover. *J. Climatol.*, 2012, Vol. 25, pp. 1176–1193. doi:10.1175/JCLI-D-11-00113.1
16. Comiso J. C., Hall D. K. Climate trends in the Arctic as observed from space. *Climate Change*, 2014, Vol. 5, pp. 389–409. doi:10.1002/wcc.277
17. *Ecosystem Barents Sea*. Trondheim, Tapir Academic Press, 2009, 587 p.
18. Fenchel T. The microbial loop – 25 years later. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 2008, Vol. 366, pp. 99–103.
19. Wassmann P., Reigstad M., Haug T., Rudels B., Carroll M. L., Hop H., Gabrielsen G. W., Falk-Petersen S., Denisenko S. G., Arashkevich E., Slagstad D., Pavlova O. Food webs and carbon flux in the Barents Sea. *Prog. Oceanogr.*, 2006, Vol. 71, pp. 232–287.
20. Namyatov A. A., Makarevich P. R., Tokarev I. V., Pastuhov I. A. Hydrochemical basis of marine waters biological productivity, surrounding Svalbard archipelago. *Biol. Commun.*, 2023, Vol. 68(1), pp. 30–48. Available at: <https://doi.org/10.21638/spbu03.2023.104>
21. IPCC Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate / H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhal, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nikolai, A. Okem et al. (Eds.), 2019. Available at: <https://www.ipcc.ch/srocc/> (accessed on 08.05.2024).
22. Legendre P., Legendre L. *Numerical ecology*. Amsterdam, Elsevier, 1998. 853 p.
23. Makarevich P. R., Vodopianova V. V., Bulavina A. S. Dynamics of the spatial chlorophyll-*a* distribution at the Polar Front in the marginal ice zone of the Barents Sea during spring. *Water*, 2022, Vol. 14, p. 101. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14010101>
24. Wang Y., Xiang P., Kang J., Ye Y. Y., Lin G. M., Yang Q. L., Lin M. Microphytoplankton community structure in the western Arctic Ocean: Surface layer variability of geographic and temporal considerations in summer. *Hydrobiologia*, 2018, Vol. 811, pp. 295–312. doi:10.1007/s10750-017-3500-0
25. Namyatov A. A., Makarevich P. R., Druzhkova E. I., Pastukhov I. A. Parameter $\delta^{18}\text{O}$ in the marine environment ecosystem studies on the example of the Barents Sea. *Water*, 2023, Vol. 15, p. 328. doi:10.3390/w15020328
26. Bestion E., Haegeman B., Codesal S. A., Garreau A., Huet M., Barton S., Montoya J. M. Phytoplankton biodiversity is more important for ecosystem functioning in highly variable thermal environments. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2021, Vol. 118, Article: e2019591118.
27. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R. B. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. *J. Climatol.*, 2012, Vol. 25, pp. 4736–4743. doi:10.1175/JCLI-D-11-00466

28. Oziel L., Neukermans G., Ardyna M., Lancelot C., Tison J.-L., Wassmann P., Sirven J., Ruiz-Pino D., Gascard J.-C. Role for Atlantic inflows and sea ice loss on shifting phytoplankton blooms in the Barents Sea. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2017, Vol. 122(6), pp. 5121–5139. doi:10.1002/2016JC012582L
29. Strickland J. D. H., Parsons T. R. A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Board Can.*, 1972, 310 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1791>
30. Johnsen G., Norli M., Moline M., Robbins I., von Quillfeldt C., Sørensen K., Cottier F., Berge J. The advective origin of an under-ice spring bloom in the Arctic Ocean using multiple observational platforms. *Polar Biol.*, 2018, Vol. 41, pp. 1197–1216.
31. Barber D. G., Lukovich J. V., Keogak J., Baryluk S., Fortier L., Henry G. H. R. The changing climate of the Arctic. *Arctic*, 2008, Vol. 61(5), pp. 7–26. doi:10.14430/arctic98
32. Azam F., Fenchel T., Field J. G. et al. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1982, Vol. 10, pp. 257–263.
33. Smedsrud L. H., Esau I., Ingvaldsen R. B., Eldevik T., Haugan P. M., Li C., Lien V. S., Olsen A., Omar A. M., Otterå O. H., Risebrobakken B., Sandø A. B., Semenov V. A., Sorokina S. A. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Rev. Geophys.*, 2013, Vol. 51(7), pp. 1–35. doi:10.1002/rog.20017
34. Zar J. H. *Biostatistical analysis*. 4th ed. USA, Prentice-Hall Inc., 1999, 663 p.

Информация об авторах

Елена Ивановна Дружкова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-7891-0800>

Игорь Васильевич Берченко – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-3262-2643>

Анастасия Владимировна Ващенко – стажер-исследователь, <https://orcid.org/0000-0003-0381-6147>

Марина Павловна Венгер – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4433-8965>

Вероника Владимировна Водопьянова – кандидат биологических наук, научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0003-1639-6452>

Владимир Геннадьевич Дворецкий – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-1654-8594>

Татьяна Геннадьевна Ишкулова – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6777-66983>

Виктор Витальевич Ларионов – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0003-3945-5013>

Павел Робертович Макаревич – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-7581-862X>

Алексей Анатольевич Намятов – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-9276-3632>

Анатолий Анатольевич Олейник – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0009-0005-2988-7180>

Иван Александрович Пастухов – младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2090-0287>

Дмитрий Владимирович Широколов – техник

Татьяна Ивановна Широколова – кандидат биологических наук, ведущий инженер, <https://orcid.org/0009-0005-7280-5259>

Information about the authors

Elena I. Druzhkova – PhD (Biology), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7891-0800>

Igor V. Berchenko – PhD (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3262-2643>

Anastasya V. Vashchenko – Trainee Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0381-6147>

Marina P. Venger – Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4433-8965>

Veronica V. Vodopianova – PhD (Biology), Research Associate, <https://orcid.org/0000-0003-1639-6452>

Vladimir G. Dvoretzky – PhD (Biology), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1654-8594>

Tatyana G. Ishkulova – Research Associate, <https://orcid.org/0000-0002-6777-66983>

Victor V. Larionov – PhD (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3945-5013>

Pavel R. Makarevich – Dr. Sci (Biology), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7581-862X>

Alexey A. Namyatov – PhD (Geography), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9276-3632>

Anatoliy A. Oleinik – PhD (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0009-0005-2988-7180>

Ivan A. Pastuhov – Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2090-0287>

Dmitry V. Shirokolobov – Engineer

Tatyana I. Shirokolobova – PhD (Biology), Itading Engineer, <https://orcid.org/0009-0005-7280-5259>

Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 25.04.2025; принята к публикации 30.05.2025.
The article was submitted 24.03.2025; approved after reviewing 25.04.2025; accepted for publication 30.05.2025.

Научная статья
УДК 551.352
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.005

ДАТИРОВАНИЕ ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЗАЛИВА ГРЁН-ФЬОРД, АВГУСТ 2023 г.

Наталья Сергеевна Иванова, Ирина Сергеевна Усягина

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия

ivanova_ns@mmbi.info, usjagina@mmbi.info

Аннотация

Оценена хронология современного осадконакопления (100–150 лет) в южной части залива Грён-фьорд по данным экспедиции ММБИ РАН на архипелаг Шпицберген в 2023 г. Колонка донных отложений была отобрана на расстоянии 500 м от устья ручья Бретъёрна в зоне поступления флювиогляциальных потоков в залив. Календарный возраст слоев осадочной толщи определяли методом изотопного датирования по избыточному ^{210}Pb . Темпы осадконакопления рассчитаны по модели CRS(CF). Верификация возрастной модели выполнена по независимому хроностратиграфическому маркеру ^{137}Cs . Возраст осадочной толщи (78 см) приблизительно 137 лет. Выявлена значительная изменчивость темпов седиментации в южной части залива – от 0.09 (1887 г.) до 3.12 см/год (2002 г.).

Ключевые слова:

залив Грён-фьорд, донные отложения, хронология седиментации, флювиогляциальные потоки

Original article

DATING OF SEDIMENTARY STRATA IN THE SOUTHERN PART OF THE GRØNFJORD, AUGUST 2023

Natalia S. Ivanova, Irina S. Usyagina

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia

ivanova_ns@mmbi.info, usjagina@mmbi.info

Abstract

The chronology of sedimentation in the southern part of the Grønfjord was evaluated according to the coastal expedition of the MMBI RAS for the Spitsbergen Archipelago in 2023. The column of bottom sediments was selected at a distance of 500 m from the mouth of the st. Bretjørna, in the zone of flow of fluvio-glacial flows into the bay. The calendar age of the layer of sedimentary stratum was determined by the isotope dating method for an excess of ^{210}Pb and is confirmed by an independent chronostratigraphic marker ^{137}Cs . The rate of sedimentation is designed according to the CRS(CF) model. A significant variability of sedimentation rate in the southern part of the bay for ~ 137 years was revealed, from 0.09 cm/year (1887) to 3.12 cm/year (2002).

Keywords:

Grønfjord Bay, bottom sediments, sedimentation chronology, fluvio-glacial flows

Введение

Наблюдаемое смягчение климата на архипелаге Шпицберген происходит в четыре раза быстрее, чем в среднем по планете (Long-term ..., 2014). Это, в свою очередь, вызывает интенсивное таяние ледников и вынос большого количества терригенного материала флювиогляциальными потоками. Данный процесс может приводить к изменению скорости седиментации и размерного состава морских отложений. Около 30 % водосборной площади залива Грён-фьорд подвержено оледенению (Соловьянова, Третьяков, 2004) и, как следствие, поступление наносов со склонов в бассейн седиментации происходит за счет эрозионных процессов в приледниковой зоне. Южная часть Грён-фьорда (о. Западный Шпицберген) испытывает наиболее значимое ледниковое влияние (Мещеряков, 2017). Водосбор представлен ледниками Западный и Восточный Грёнфьорд, Янсон, Баалсруд, которые разгружаются водотоками ручья Бретъёрна и реки Грёнфьорд. Основное количество обломочного материала поступает в южную часть залива и оказывает значительное влияние на седиментацию. В связи с этим мы предполагаем, что исследование осадочной толщи южной части залива,

расположенной на западной периферии Земли Норденшельда, поможет нам реконструировать изменения в осадконакоплении, связанные с климатическими флуктуациями и дегляциацией ледниковых массивов с середины XX века по настоящее время.

Предметом исследования были скорость седиментации и литотипы донных отложений в течение последних 100 лет. Для определения возраста современных осадков и темпов осадконакопления широко применяются изотопные методы с применением короткоживущих радионуклидов. Наиболее точным из них является метод неравновесного (избыточного) $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ с периодом полураспада 22.2 года, который позволяет датировать отложения, накопленные в течение 100–150 лет (Appleby, 2001).

Цель данного исследования – оценка динамики темпов осадконакопления и изменения литотипов донных отложений в южной части залива Грён-фьорд за последние 100–150 лет.

Материал и методы

Колонка донных отложений была отобрана в береговой экспедиции ММБИ РАН на архипелаг Шпицберген в августе 2023 г. Отбор проводили с борта лодки «Zodiac Mark-3» трубкой ГОИН 2.0 на расстоянии 500 м от устьевой зоны ручья Бретгёрна (глубина 45 м).

Мощность вскрытой осадочной толщи составила 78 см. Первичную обработку колонки выполняли на биогеостанции ММБИ РАН (пос. Баренцбург). Колонку разрезали керамическим ножом на слои по 3 см. Полученные образцы донных отложений подвергали лиофильной сушке на оборудовании Alpha 1-4LDPlus Martin Christ в химико-аналитической лаборатории ААНИИ в пос. Баренцбург. Радиометрический и гранулометрический анализы проб проводили в лаборатории океанографии и радиоэкологии ММБИ РАН.

Измерения удельной активности радионуклидов в донных отложениях выполнены на полупроводниковом широкополосном германиевом детекторе планарного типа BE5030 (Canberra, США), который регистрирует энергии гамма-квантов от 3 кэВ до 3 МэВ, что позволяет определять линии радионуклидов гамма- и рентгеновского спектра. Фоновое излучение ограничивали свинцовой защитой экрана детектора HPGe-2P («Аспект», Россия). Спектральная информация была собрана с помощью импульсного анализатора DSA-1000. Обработку спектров и идентификацию радионуклидов проводили в программе Genie-2000 (Canberra, версия 3.3).

Природный $^{210}\text{Pb}_{\text{общ}}$ определяли по линии 46.5 кэВ. Для расчета активности избыточного $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$, поступившего с атмосферными выпадениями, из значений $^{210}\text{Pb}_{\text{общ}}$ вычитали активность фонового ^{210}Pb , образующегося *in situ* в грунте, измеренного по основным линиям ^{226}Ra . Количественное определение ^{226}Ra было проведено с помощью гамма-линий ^{214}Pb и ^{214}Bi . Удельную активность ^{137}Cs определяли по линии 661.8 кэВ. Счетные образцы измеряли в течение 24 ч. Данные измерений были скорректированы на дату отбора колонки (14.08.2023 г.), результаты приведены в расчете на сухую массу.

Большинство исследований по датированию современных отложений было посвящено озерным и морским отложениям. В устьевых районах, где процессы осадконакопления проходят в условиях постоянного гидродинамического воздействия, таких исследований проведено относительно немного. Перемешивание осадка и изменчивость скорости осадконакопления в устьевых зонах повышают требования к интерпретированию результатов и выбору модели датирования (Andersen, 2017).

Календарный возраст вскрытой осадочной толщи по $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ определяли согласно модели постоянного потока (CRS) (Sanchez-Cabeza, Ruiz-Fernandez, 2012) по формуле

$$t(i) = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A(0)}{A(i)},$$

где $t(i)$ – возраст верхней части осадочного слоя, лет; $A(i) = A(0)e^{-\lambda t}$, $A(0)$ – активность $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$, накопленная на поверхности морского дна, Бк/м²; λ – постоянная радиоактивного распада ^{210}Pb (0.03118 ± 0.00017 лет⁻¹).

Неопределенность возраста слоев $u(t(i))$ рассчитана по формуле

$$u(t(i)) = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(u(\lambda)t(i))^2 + \left(\frac{u(A(0))}{A(0)} \right)^2 + \left(1 - \frac{2A(i)}{A(0)} \right) \left(\frac{u(A(i))}{A(i)} \right)^2}.$$

Для проверки результатов датирования использовали независимый геохронологический маркер ^{137}Cs . Пики антропогенных радионуклидов в донных отложениях сопоставляли с конкретными событиями в истории поступления радиоактивных выпадений в Баренцево море.

Гранулометрический анализ выполняли по методу ВНИИОкеангеологии без химического воздействия на донные отложения (Андреева, Лапина, 1998). Для уточнения данных по накоплению терригенного материала в районе работ вводили поправку на содержание органического вещества. Массу органических веществ определяли косвенным методом потерь при прокаливании (ППП) при температуре 450 °С (Даувальтер, 2012). Название литотипов донных отложений дано в соответствии с классификацией ВНИИОкеангеологии (по преобладающей фракции).

Результаты и обсуждение

Радиометрический анализ показал снижение удельной активности $^{210}\text{Pb}_{\text{общ}}$ с глубиной (от 132.9 до 52.4 Бк/кг), что позволило провести датировку слоев донного осадка. Экспоненциальное снижение было нестабильным ($R^2 = 0.5$), следовательно, не выполняется одно из условий модели постоянного потока $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ в донные отложения – CRS(CFCS). В связи с этим наиболее подходящей для данного района будет модель CRS(CF) с менее строгими условиями, предполагающими изменение скорости осадконакопления. Эта модель менее чувствительна к поверхностному перемешиванию и дает относительно небольшие погрешности при условии соблюдения общих требований (Appleby, 2001).

Профиль снижения удельной активности $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ с глубиной представлен на рис. 1. Удельная активность $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ снижалась от 88.4–99.5 Бк/кг в поверхностном слое до 10.9 Бк/кг в нижнем слое исследуемой осадочной толщи. Для определения «равновесной» глубины применяли метод «ключевой» даты (Sanchez-Cabeza, Ruiz-Fernandez, 2012) по наибольшему пику ^{137}Cs в нижней части профиля колонки. Этот пик соответствует максимуму атмосферных выпадений ^{137}Cs , он расположен в слое 57–60 см (1963 г.). Расчеты показали, что равновесие между фоновым ^{210}Pb и ^{226}Ra будет находиться в слое 78–81 см. Исходя из этого, предыдущий слой 75–78 см (102.1 г/см^2) датируется 1887 г., и возраст осадочной толщи составляет 136.6 ± 17.6 лет.

На рисунке 1Б для построения графика на оси ординат использовалась «массовая» глубина (г/см^2). Этот параметр применяется в моделях датирования для того, чтобы учесть уплотнение осадка с глубиной (Sanchez-Cabeza, Ruiz-Fernandez, 2012). Диаграмма распределения ^{137}Cs по профилю колонки хорошо согласуется с максимумами его поступления в Баренцево море (рис. 1). Первый пик ^{137}Cs датирован по $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ как 1946 ± 7 г., второй пик – 1966 г. Накопленная масса осадка на глубине 60–65 см в слоях, где были обнаружены эти пики, могла сформироваться в период глобальных атмосферных выпадений радионуклидов после испытаний атомного оружия на Новой Земле (1955–1963 гг.) (Bergqvist, Ferm, 2000; Техногенные ..., 2005). Повышение удельной активности ^{137}Cs на глубине 48–51 см, датированной по $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ как 1986 ± 2 г., можно объяснить наложением двух источников – атмосферными выпадениями после аварии на Чернобыльской атомной электростанции (1986 г.) и трансокеаническим переносом с Западно-Шпицбергенским течением радиоактивных отходов завода «Селлафилд» из Ирландского моря (Kautsky, 1988; Матишов, Матишов 2001).

На основании проведенного датирования реконструированы темпы седиментации в южной части залива Грён-фьорд. Средняя скорость с 1887 по 2023 гг. составляет 1.2 ± 0.9 см/год. В XX веке темпы варьировали в пределах 0.1–1.0 см/год. С начала XXI века по настоящее время темпы увеличились на порядок, среднее значение составляет 2.3 ± 1.4 см/год. Многолетняя динамика осадконакопления сопоставима с трендом повышения среднегодовой температуры воздуха

по материалам открытой базы данных Норвежского метеорологического института (Norwegian Meteorological Institute and NRK; <https://www.yr.no/en>) (рис. 2). Полученные значения сопоставимы с результатами в районе устьевого взморья р. Грёндален в 2022 г. и подтверждают тенденцию увеличения темпов седиментации с первой декады XXI века (Стратиграфическая ..., 2024).

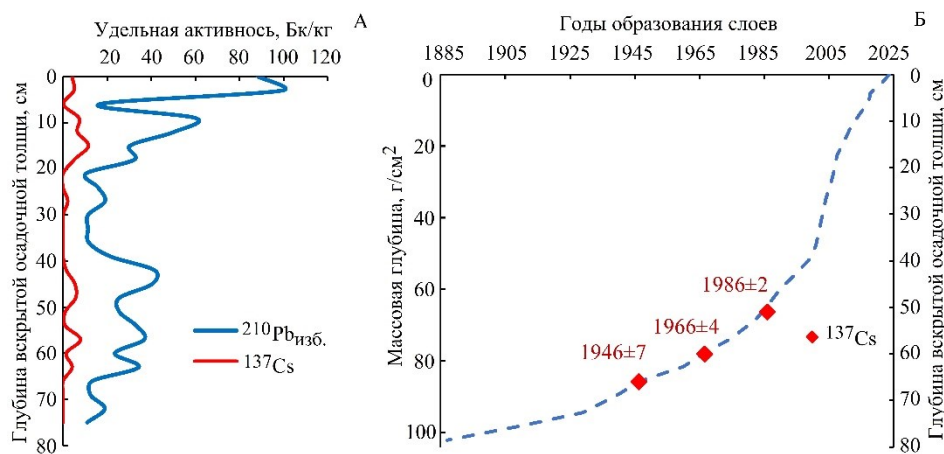


Рис. 1. Удельная активность $^{210}\text{Pb}_{\text{изб.}}$ и ^{137}Cs (А) и возраст осадочной толщи (Б) по модели CRS(CF). Красным шрифтом отмечены годы $t(i) \pm u(t(i))$, подтвержденные пиками поступления ^{137}Cs (красные ромбы)
Fig. 1. The specific activity of ^{210}Pb and ^{137}Cs (A) and the age of the sedimentary column (Б) according to the CRS(CF) model. The years $t(i) \pm u(t(i))$, confirmed by the peaks of ^{137}Cs intake (red diamonds), are marked in red font

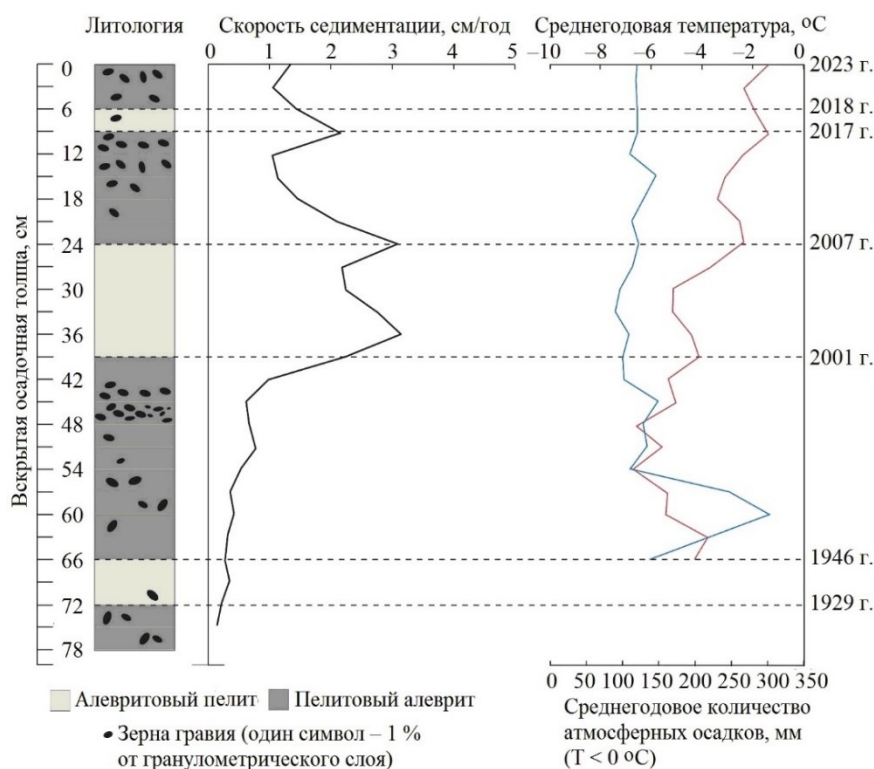


Рис. 2. Хронология формирования типов донных отложений в южной части залива Грён-фьорд. Красная линия – изменение среднегодовых температур, синяя – изменение среднегодового количества атмосферных осадков

Fig. 2. Chronology of formation of bottom sediment types in the southern part of the Grønfjord. The red line is the change in average annual temperatures, the blue line is the change in the average annual precipitation

Гранулометрический анализ показал, что вскрытая осадочная толща сложена преимущественно зернами пелита и мелкого алеврита с периодическими включениями хорошо окатанных зерен гравия. По классификации ВНИИОкеангеологии, осадочную толщу можно интерпретировать двумя литотипами – алевритовым пелитом и пелитовым алевритом. Смена литотипов происходила в 1887–1929, 1929–1946, 1946–2001, 2001–2007, 2007–2017, 2017–2018 и 2018–2023 гг. (рис. 2).

С начала XXI века в результате смягчения климата и, как следствие, увеличения объема флювиогляциальных потоков, поступающих в водосборный бассейн в первой декаде XX века, наблюдается скачок скорости осадконакопления. Количество выпадающих атмосферных осадков в зимнее время существенно снизилось по сравнению с более ранним периодом (рис. 2), что способствовало ослаблению ледовитости и мощности припайных льдов в заливе Грён-фьорд (Иванов, Журавский, 2010; Исследования ..., 2012). В слоях колонки от 21 до 39 см, датированных 2001–2007 гг., отсутствует гравийно-галечный материал и наблюдается максимальная скорость осадконакопления. В периоды, когда в осадках присутствует включения гравия (1946–2001 и 2007–2017 гг.), отмечено снижение темпов седиментации, аналогичные закономерности получены при исследовании осадконакопления в устьевом взморье р. Грёндален (Стратиграфическая ..., 2024).

Выводы

В последнее столетие темпы седиментации в южной части залива Грён-фьорд варьируют в диапазоне от 0.09 до 3.12 см/год, при этом отмечается тенденция роста с конца XX века. Максимальные скорости наблюдались с 2001 по 2007 гг., так как в этот период снижалась ледовитость, что приводило к ослаблению мощности припайных льдов.

Работа выполнена по теме «Состояние морских и наземных экосистем архипелага Шпицберген в условиях современной климатической и антропогенной изменчивости» (№ госрегистрации 125012900989-8) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Андреева И. А., Лапина Н. Н. Методика гранулометрического анализа донных осадков Мирового океана и геологическая интерпретация результатов лабораторного изучения вещественного состава осадков. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1998. 45 с.
2. Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.
3. Иванов Б. В., Журавский Д. М. Ледовые условия в заливе Грён-фьорд (Шпицберген) в течение 1974–2008 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2(85). С. 27–31.
4. Исследования снежно-ледяного покрова залива Грён-фьорд (арх. Шпицберген): исторические данные, натурные исследования, моделирование / Б. В. Иванов, А. К. Павлов, О. М. Андреев, Д. М. Журавский, П. Н. Священников // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2(92). С. 43–54.
5. Матишов Д. Г., Матишов Г. Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. 418 с.
6. Мещеряков Н. И. Особенности седиментогенеза в заливе Грён-фьорд (Западный Шпицберген) // Вестн. МГТУ. 2017. Т. 20, № 1. С. 272–279.
7. Соловьянова И. Ю., Третьяков М. В. Наблюдение за стоком взвешенных наносов рек бассейна залива Грён-фьорд // Комплексные исследования Шпицбергена. Вып. 4. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. С. 230–236.
8. Стратиграфическая хронология и механизмы формирования донных отложений на устьевом взморье реки Грёндален (залив Грён-фьорд, Западный Шпицберген) в период климатических изменений / Н. И. Мещеряков, И. С. Усягина, А. А. Намятов, И. В. Токарев // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2024. Т. 32, № 5. С. 104–120.
9. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: радиоэкологический последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря (Белая книга–2000) / Ю. В. Сивинцев, С. М. Вакуловский, А. П. Васильев, В. Л. Высоцкий, А. Т. Губин, В. А. Данилян,

- В. А. Кобзев, И. И. Крышев, С. А. Лавковский, В. А. Мазокин, А. И. Никитин, О. И. Петров, Б. Г. Пологих, Ю. И. Скорик. М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
10. Andersen T. J. Some practical considerations regarding the application of ^{210}Pb and ^{137}Cs dating to estuarine sediments // Applications of paleoenvironmental techniques in estuarine studies. Developments in Paleoenvironmental Research. Springer, 2017. Vol. 20. P. 121–140.
 11. Appleby P. G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments / W. M. Last, J. P. Smol (Eds.) // Tracking environmental change using lake sediments. 2001. Vol. 1. P. 171–203.
 12. Bergqvist N.-O., Ferm R. Nuclear explosions 1945–1998 (FOA-R-00-01572-180). Stockholm, Sweden: Defence Research Establishment, 2000. 43 p.
 13. Kautsky H. Determination of distribution processes, transport routes and transport times in the North Sea and the northern Atlantic using artificial radionuclides as tracers // Radionuclides: a tool for oceanography B / J. C. Guary, P. Guegueniat, R. J. Pentreath (Eds.). London: Elsevier, 1988. P. 271–280.
 14. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012 / Ø. Nordli, R. Przybylak, A. E. J. Ogilvie, K. Isaksen // Polar Res. 2014. Vol. 33. P. 21349.
 15. Sanchez-Cabeza J. A., Ruiz-Fernandez A. C. ^{210}Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. № 82. P. 183–200.

References

1. Andreeva I. A., Lapina N. N. *Metodika granulometricheskogo analiza donnykh osadkov Mirovogo okeana i geologicheskaya interpretatsiya rezul'tatov laboratornogo izucheniya veshchestvennogo sostava osadkov* [Methods for the granulometric analysis of bottom sediments in the World Ocean and geological interpretation of results of laboratory study of the sediment composition]. Saint Petersburg, Publ. VNIIOkeangeologiya, 1998, 45 p. (In Russ.).
2. Dauvalter V. A. *Geoekologiya donnykh otlozheniy ozer* [Geoeology of bottom deposits of lakes]. Murmansk, Publ. Murmansk State Technical University, 2012, 242 p. (In Russ.).
3. Ivanov B. V., Zhuravsky D. M. Ledovye usloviya v zalive Gryen-ford (Shpitsbergen) v techenie 1974–2008 gg. [Ice conditions in the Gulf of Grønfjord (Svalbard) during 1974–2008]. *Problemy Arktiki i Antarkтики* [Problems of the Arctic and Antarctic], 2010, No. 2(85), pp. 27–31 (In Russ.).
4. Ivanov B. V., Pavlov A. K., Andreev O. M., Zhuravsky D. M., Svyashchennikov P. N. Issledovaniya snezhno-ledyanogo pokrova zaliva Gryen-ford (arkhipelag Shpitsbergen): istoricheskie dannye, naturnye issledovaniya, modelirovanie [Studies of the snow and ice cover of the Grønfjord Bay (Svalbard): historical data, field studies, modeling]. *Problemy Arktiki i Antarkтики* [Problems of the Arctic and Antarctic], 2012, No. 2(92), pp. 43–54 (In Russ.).
5. Matishov D. G., Matishov G. G. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya* [Radiation ecological oceanology]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2001, 418 p. (In Russ.).
6. Meshcheryakov N. I. Osobennosti sedimentogeneza v zalive Gryen-ford (Zapadnyy Shpitsbergen) [Features of sedimentation in the Grønfjord (West Spitsbergen)]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of Murmansk State Technical University], 2017, Vol. 20, No. 1, pp. 272–279 (In Russ.).
7. Solov'yanova I. Yu., Tret'yakov M. V. Nablyudeniye za stokom vzveshennykh nanosov rek basseyna zaliva Gryen-ford [Monitoring the runoff of suspended sediment in the rivers of the Grønfjord Bay basin]. *Kompleksnye issledovaniya Shpitsbergena, vypysk 4* [Complex investigations of Spitsbergen nature, Vol. 4]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2004, pp. 230–236 (In Russ.).
8. Meshcheryakov N. I., Usyagina I. S., Namyatov A. A., Tokarev I. V. Stratigraficheskaya khronologiya i mekhanizmy formirovaniya donnykh otlozheniy na ust'evom vzmor'e reki Gryendalen (zaliv Gryen-ford, Zapadnyy Shpitsbergen) v period klimaticheskikh izmeneniy [Stratigraphic chronology and mechanisms of formation of bottom sediments at the mouth of the Grøndalen River (Grønfjord, West Spitsbergen) during the period of climatic changes]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya* [Stratigraphy. Geological correlation], 2024, Vol. 32, No. 5, pp. 104–120 (In Russ.).
9. Sivintsev Yu. V., Vakulovskiy S. M., Vasil'ev A. P., Vysotskiy V. L., Gubin A. T., Danilyan V. A., Kobzev V. I., Kryshev I. I., Lavkovskiy S. A., Mazokin V. A., Nikitin A. I., Petrov O. I., Pologikh B. G., Skorik Yu. I. *Tekhnogennyye radionuklidy v moryakh, omyvayushchikh Rossiyu: radioekologicheskie posledstviya udaleniya radioaktivnykh otkhodov v arkticheskie i dal'nevostochnyye morya (Belaya kniga-2000)* [Technogenic radionuclides in the seas washing Russia: radioecological consequences of the

- disposal of radioactive waste in the Arctic. Ecology of the Arctic and Far Eastern seas (White Book-2000)], Moscow, IzdAT, 2005, 624 p. (In Russ.).
10. Andersen T. J. Some practical considerations regarding the application of ^{210}Pb and ^{137}Cs dating to estuarine sediments. Applications of paleoenvironmental techniques in estuarine studies. Developments in Paleoenvironmental Research, Springer, 2017, Vol. 20, pp. 121–140.
 11. Appleby P. G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments / W. M. Last, J. P. Smol (Eds.). Tracking environmental change using lake sediments, 2001, Vol. 1, pp. 171–203.
 12. Bergqvist N.-O., Ferm R. Nuclear explosions 1945–1998 (FOA-R-00-01572-180). Stockholm, Sweden, Defence Research Establishment, 2000, 43 p.
 13. Kautsky H. Determination of distribution processes, transport routes and transport times in the North Sea and the northern Atlantic using artificial radionuclides as tracers. Radionuclides: a tool for oceanography B / J. C. Guary, P. Guegueniat, R. J. Pentreath (Eds.), London, Elsevier, 1988, pp. 271–280.
 14. Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A. E. J., Isaksen K. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012. Polar Res., 2014, Vol. 33, p. 21349.
 15. Sanchez-Cabeza J. A., Ruiz-Fernández A. C. ^{210}Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. Geochim. Cosmochim. Acta, 2012, No. 82, pp. 183–200.

Информация об авторах

Наталья Сергеевна Иванова – стажер-исследователь,

<https://orcid.org/0009-0006-9513-4344>

Ирина Сергеевна Усягина – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник,

<https://orcid.org/0000-0002-5984-6479>

Information about the authors

Natalia S. Ivanova – Trainee Researcher, <https://orcid.org/0009-0006-9513-4344>

Irina S. Usyagina – PhD (Geography), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5984-6479>

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 02.06.2025.
The article was submitted 16.04.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 02.06.2025.

Научная статья
УДК 546.36 (268.45)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.006

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЙ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В МОРСКОМ ПРИБРЕЖЬЕ МУРМАНА

Геннадий Васильевич Ильин, Ирина Сергеевна Усягина

*Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
ilyin@mmbi.info, usyagina@mmbi.info*

Аннотация

Рассмотрены закономерности формирования фона техногенной радиоактивности морской среды в прибрежной зоне Мурманска на примере основных дозообразующих изотопов. Актуальность темы определена важной ролью побережья Кольского полуострова, Мурманского берега в частности, в социальном и хозяйственном развитии Евро-Арктической зоны России. В работе использованы материалы радиоэкологических и океанографических исследований 1994–2021 гг. в открытых водах прибрежной зоны и в некоторых крупных губах Кольского побережья. Определен современный уровень фона удельной и объемной активности радиоизотопов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в морской среде, включая зоны перевалки и маршруты эвакуации радиоактивных отходов в прибрежье Мурманска. Показана роль объектов атомной инфраструктуры и потоков атлантических вод в формировании радиоэкологического фона. Современное радиоизотопное загрязнение побережья дифференцировано, но в целом оценивается как низкофоновое, не вызывающее опасений за безопасность природопользования. Местные источники техногенной радиоактивности формируют область повышенной концентрации радиоизотопов в западной части Кольского побережья – Варангер-фьорде, Мотовском и Кольском заливах. В акватории, отдаленной от техногенных источников радиации, фон удельной и объемной активности радиоизотопов значительно снижен. Отмечены различия трендов в динамике концентраций ^{137}Cs , ^{90}Sr в водной массе и донных отложениях прибрежной зоны. Динамика ^{90}Sr в водной массе хорошо описывается двумя осцилляциями с периодом 4.5 и 3.58 года. Полученные материалы рассматриваются как элемент мониторинга и необходимая информация для развития морехозяйственной деятельности и комплексного управления прибрежными зонами.

Ключевые слова:

морская прибрежная зона, радионуклиды, источники радиации, донные осадки, океанографические условия

Original article

DYNAMICS OF ACCUMULATION OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN THE SEA COAST OF MURMANSK

Gennady V. Ilyin, Irina S. Usyagina

*Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian
ilyin@mmbi.info, usyagina@mmbi.info*

Abstract

The patterns of formation of the background of technogenic radioactivity of the marine environment in the coastal zone of Murmansk are studied using the example of the main dose-forming isotopes. The relevance of the study is determined by the important role of the coast of the Kola Peninsula and the Murmansk coast, in particular, in the social and economic development of the Euro-Arctic zone of Russia. The work uses materials from radioecological and oceanographic studies from 1994–2021 in the open waters of the coastal zone and in a number of large bays of the Kola coast. The study shows the current background level of specific and volumetric activity of radioisotopes ^{137}Cs , ^{90}Sr and $^{239,240}\text{Pu}$ in the marine environment, including transshipment zones and evacuation routes for radioactive waste off the coast of Murmansk. The role of nuclear infrastructure facilities and Atlantic water flows in the formation of the radioecological background is shown. Modern radioisotope pollution of the coastal area is differentiated, but is generally assessed as low-background, without causing concern for the safety of environmental management. Local sources of man-made radioactivity form an area of increased concentration of radioisotopes in the western part of the Kola coast – Varangerfjord, Motovsky and Kola bays. In the water area remote from man-made sources of radiation, the background of specific and volumetric activity of radioisotopes is significantly reduced. Differences in trends in the dynamics of concentrations of ^{137}Cs , ^{90}Sr in the water mass and bottom sediments of the coastal zone are noted. The dynamics of the ^{90}Sr in water is well described by 2 oscillations

in with a period of 4.5 and 3.58 years. The received materials are considered as an element of monitoring and necessary information for the development of marine management and integrated coastal zone management.

Keywords:

marine coastal zone, radionuclides, radiation sources, bottom sediments, oceanographic conditions

Введение

Поступление техногенных радионуклидов в Баренцево море произошло в «ядерную эпоху». Основными источниками всего спектра искусственных радионуклидов стали испытания ядерного оружия на полигонах архипелага Новая Земля в 1955–1963 гг. а также их транзит с североатлантическими водами с сопредельных акваторий Ирландского, Северного и Норвежского морей (Матишов, Матишов, 2001; Aarkrog, 2003; Plutonium ..., 2010). Немногом позже, в 1960–1980-е гг., в арктических морях отмечали максимальные объемы воздушных выпадений искусственных радионуклидов, связанные с глобальным перераспределением радиоактивных веществ, попавших в высокие слои атмосферы в результате испытаний и разного рода ядерных инцидентов. Наиболее значимым из последних стала авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. По некоторым оценкам, вклад чернобыльских выбросов в загрязнение вод Баренцева и Карского морей в 1990-е гг. составлял 10–20 % от общего уровня радиоактивности (Вакуловский и др., 1985; Радиоактивное ..., 1991). Пик поступлений радионуклидов в Баренцево море пришелся на 1980-е гг. В настоящее время поступление многократно снижено, но не прекратилось окончательно и постоянно дополняется глобальными атмосферными выпадениями (Матишов и др., 2022). Кроме этого в регионе действуют факторы отложенного риска, к которым относятся захоронения радиоизлучающих отходов и береговая инфраструктура атомного флота, включая хранилища этих отходов, технические базы обслуживания и ремонта. В «ядерный» и «пост-ядерный» периоды в воде и донных отложениях моря наблюдали относительно широкий спектр радионуклидов ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{129}I , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{60}Co , попавших в экосистему в результате систематических или эпизодических утечек радиоактивных материалов.

Прибрежная зона Кольского полуострова в системе Баренцева моря и побережье Мурман, в частности, выделяются высокой социальной и хозяйственной освоенностью. Здесь чрезвычайно развита инфраструктура торговых и военных портов, промышленное производство, включая аквакультуру, рыбодобывающую и перерабатывающую деятельность, бурно развивающийся туризм и акватуризм с центрами в населенных пунктах Териберка, Дальние Зеленцы, на п-ове Рыбачий, с чем связана необходимость постоянного контроля состояния морской среды.

В то же время здесь расположено множество потенциальных источников техногенного радиоактивного излучения. Поэтому радиоэкологический статус прибрежной зоны зависит не только от поступающих сюда атлантических вод. Изменчивость фоновой характеристики побережья формируется также под влиянием местных объектов атомной инфраструктуры. К числу основных таких объектов можно отнести хранилища ядерных отходов в губах Андреева, Оленья, Сайда, Гремиха (Йоканьгский рейд). Дополнительный риск загрязнения создается обращением с ядерными отходами при их эвакуации из хранилищ в губах Андреева и Гремиха, операциях трансфера упаковок отработавшего ядерного топлива на перерабатывающие предприятия.

Основными дозообразующими техногенными радионуклидами в морской экосистеме к настоящему времени являются изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr . Они имеют повышенную растворимость в воде, высокую радиотоксичность и легко встраиваются в метаболические процессы. В спектре накопленных радионуклидов присутствуют также изотопы плутония, накопленные в донных осадках. В основном это изотопы $^{239,240}\text{Pu}$. Их концентрации практически не уменьшаются из-за длительности полураспада, и при современных исследованиях вопросы их накопления и перераспределения приобретают все большую значимость. Вместе с тем остро стоит необходимость постоянного контроля состояния морской среды. Основная цель работы – получить актуальные данные и составить концептуальную основу формирования радиоэкологического фона в воде и донных отложениях прибрежной зоны Мурман, выяснить тенденции в динамике накопления радионуклидов.

Материал и методы

В работе использованы материалы многолетних наблюдений ММБИ РАН за концентрацией ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных отложениях, полученные в судовых и береговых экспедициях, а также данные 2021 г. по удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в современном слое осадков (0–2 см).

Отбор проб воды и грунта выполняли стандартным оборудованием по современным методикам, принятым МАГАТЭ. Донные отложения отбирали дночерпателем ван-Вина, прямооточной трубкой ГОИН-1,5 и почвенным пробоотборником (d 10 см, на литоральных отмелях).

Для анализа объемной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде пробы отбирали с помощью насоса. Объем проб составлял соответственно 100 и 30 л. Для определения радиоизотопов цезия пробы поверхностной воды пропускали через сорбционную колонку с целлюлозным неорганическим сорбентом «анфеж», который затем высушивали. Измерения активности γ -излучающих радионуклидов в пробах выполнены на γ -спектрометре InSpector-2000 (Canberra, США) с детектором из чистого германия, а также на спектрометре γ - и рентгеновского излучения b13237 (Canberra, США). Расчеты выполнены с помощью базового программного обеспечения анализа спектров Genie-2000.

Определение удельной активности ^{90}Sr в пробах проведено радиохимическим методом с выделением дочернего продукта ^{90}Y – излучателя β -активности. Активность ^{90}Sr рассчитана по измерениям активности равновесного ^{90}Y в счетных образцах. Измерения β -активности образцов выполнены на установке LS-6500 (Beckman Instruments Inc., США).

Радиометрический анализ удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в пробах донного осадка осуществлен в лаборатории радиохимии Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Активность изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ определена на α -спектрометре Model 7401 (Canberra, США).

Совокупный анализ данных позволяет установить многолетнюю динамику и охарактеризовать современное радиационное состояние прибрежной зоны Мурманска, оценить относительный вклад глобальных, региональных и локальных источников в радиоактивное загрязнение побережья.

Результаты и обсуждение

Характеристика района. В работе в качестве ограничительного признака прибрежной зоны используется Прибрежный желоб, по нему ориентировано теплое Мурманское прибрежное течение, переносящее атлантические воды вдоль Мурманского берега Кольского полуострова. Поток этих вод на некоторых участках подходит близко к берегу по ответвлениям желоба и работает как источник радионуклидов из Северо-Европейского бассейна. На картах температуры и солёности хорошо прослеживаются флуктуации потока и заливы атлантических вод в прибрежную зону (рис. 1).

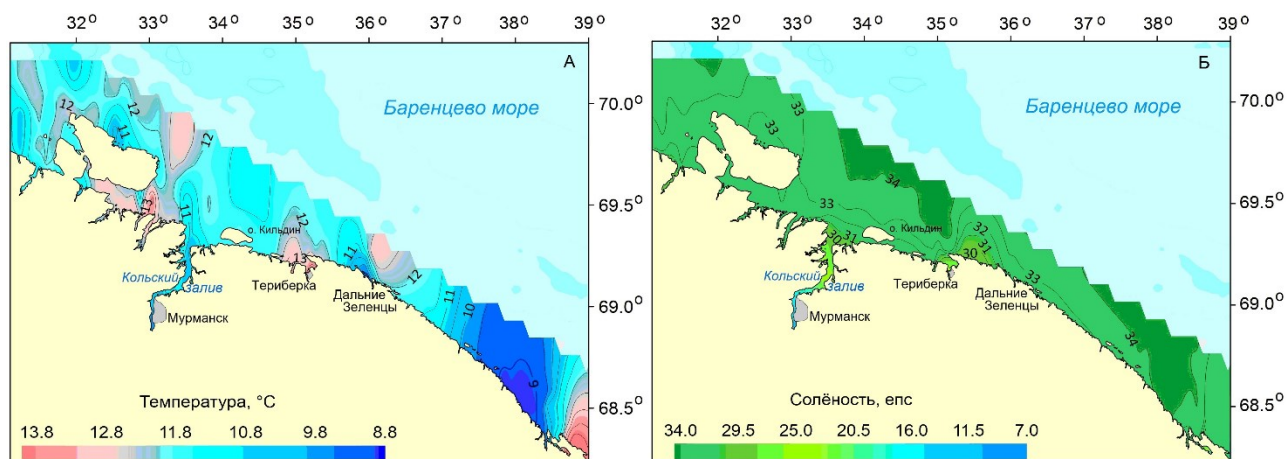


Рис. 1. Карта-схема распределения температуры (А) и солёности (Б) воды в прибрежной зоне Кольского полуострова, июль 2021 г.

Fig. 1. Schematic map of the distribution of temperature (А) and salinity (Б) of water in the coastal zone of the Kola Peninsula, July 2021

Берег Мурмана сложен главным образом скальными породами и относится к абразионному типу. Донные отложения прибрежной зоны разнообразны по текстуре и слабо изучены. По нашим фрагментарным наблюдениям, в современных осадках преобладает тонкодисперсная пелитовая фракция – более 40 %, которая и обеспечивает депонирование радионуклидов (Датирование ..., 2024). В бухтах нередки валунные и песчаные пляжи. Это обуславливает значительную долю песка и включения гравийного материала в донном осадке.

Современное радиоэкологическое состояние морской среды в прибрежной зоне. В водных массах и донных отложениях побережья формируется мозаичное поле изучаемых радионуклидов цезия, стронция и плутония. Характеристика современного фона техногенных радионуклидов поверхностного слоя воды и верхнего осадочного слоя в побережье Мурмана представлена в таблице и на рисунках 2–5.

Концентрация радионуклидов в воде и донных отложениях прибрежной зоны Кольского полуострова
The concentration of radionuclides in the water and bottom sediments of the coastal zone of the Kola Peninsula

Среда	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239,240}\text{Pu}$
Вода, Бк/м ³	$\frac{1.67 \pm 0.15}{0.71 - 3.80}$ (0.46)	$\frac{3.46 \pm 0.48}{0.46 - 7.24}$ (2.05)	–
Донный осадок, Бк/кг	$\frac{2.51 \pm 0.61}{0.60 - 6.30}$ (2.03)	$\frac{0.78 \pm 0.21}{0.20 - 2.10}$ (0.60)	$\frac{1.13 \pm 0.16}{0.29 - 3.10}$ (0.68)

ПРИМЕЧАНИЕ. Числитель – среднее значение $\pm$ ошибка среднего, знаменатель – минимальное и максимальное значения, в скобках приведено стандартное отклонение.

Из приведенных данных видно, что средние концентрации радионуклидов в воде и донных отложениях соответствуют таковым для морского бассейна в целом (Радиоэкологическое ..., 2020). Подтверждается, что общий фон радионуклидного загрязнения морской среды создается потоком вод из Норвежского моря и Северной Атлантики. В то же время в распределении ^{137}Cs и ^{90}Sr как в воде, так и в донных отложениях отмечены разномасштабные участки относительно повышенного содержания радиоизотопов, образование которых связано с влиянием атомной инфраструктуры. Такие участки наиболее выражены в западной части побережья – в заливах Мотовский, Кольский и Варангер-фьорд.

Формирование фона радионуклидов в прибрежной водной массе. Доказано поступление радионуклидов в Мотовский залив от хранилища в губе Андреева с 1982 г. (Объекты ..., 2017; Ильин, Усягина, 2019). Вымывание остаточного количества радионуклидов с загрязненной территории хранилища наблюдается и в настоящее время. Радионуклиды попадают в Мотовский залив с потоком речных вод через губу Западная Лица. Поток загрязненной воды поступает в залив в верхнем слое 40–50 м и смешивается с водами открытого моря. Концентрация ^{137}Cs в слабосоленой воде стокового течения варьирует выше 2.5 Бк/м³, но снижается по мере смешения на акватории залива малосоленых вод с морской водой Баренцева моря. По данным многолетних наблюдений (2014, 2018 и 2021 гг.), средняя объемная активность изотопов цезия и стронция в Мотовском заливе практически не изменяется и составляет 1.6 и 3.4 Бк/м³ соответственно. Такая же ситуация наблюдается в заливе Варангер-фьорд (рис. 2). Более высокая активность ^{137}Cs на акватории этих заливов отмечена в губах, с размещенной там инфраструктурой атомного флота, например – в губах Ура, Ара, Печенга.

Значимым источником радионуклидов в побережье Мурмана в «пост-ядерную» эпоху стал сток Кольского залива. Уровень его радиоактивности формируется под влиянием инфраструктуры флота в губах Пала, Оленья, Сайда и предприятия «Атомфлот». Загрязнены как верхний, так и придонный слои воды (Радиоэкологическое ..., 2023). Концентрация радионуклидов изменчива из-за их неравномерной эмиссии. Однако в многолетнем плане объемная активность изотопов остается повышенной. Средняя многолетняя активность ^{137}Cs в верхнем слое воды северного колена залива составляет 3.8 Бк/м³, а ^{90}Sr – 8.7 Бк/м³.

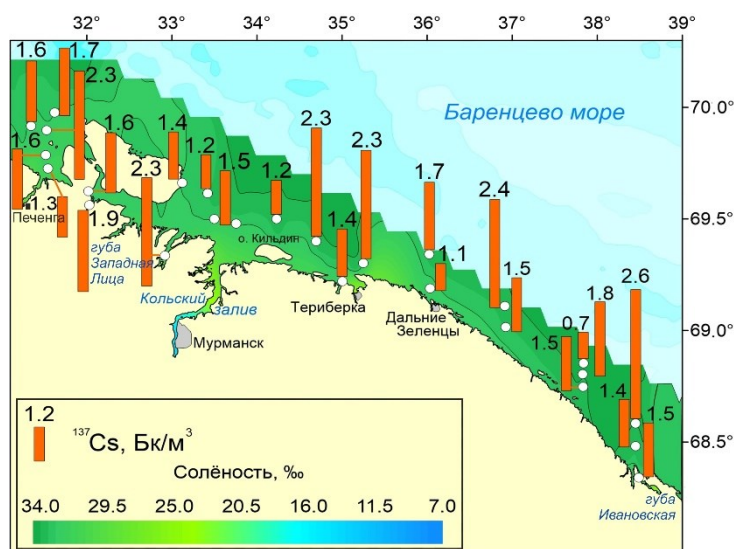


Рис. 2. Распределение изотопа ^{137}Cs в верхнем слое воды прибрежной зоны Мурманска в поле солёности, 2021 г.
Fig. 2. Distribution of the ^{137}Cs isotope in the upper water layer of the Murmansk coast in the salinity field, 2021

Солёность и концентрация ^{137}Cs в воде Кольского и Мотовского заливов достоверно взаимно коррелируют. В Мотовском заливе между солёностью и концентрацией ^{137}Cs установлена обратная корреляционная связь ($r = -0.58$ при $P = 0.95$, $n = 12$), в Кольском заливе корреляция положительна ($r = 0.62$ при $P = 0.95$, $n = 10$). Такое различие обусловлено расположением источников радионуклидов и способами их переноса. В Мотовском заливе хранилище радиоактивных отходов расположено вблизи устья реки, и загрязнители переносятся пресными водами. В Кольском заливе объекты инфраструктуры расположены в губах с морской водой, и распространение радиоизотопов обеспечивается потоками солёных вод.

В зоне открытого побережья, восточнее Кольского полуострова, также отмечено несколько участков повышенной объёмной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в удалённых от техногенных источников районах. Анализ расположения этих участков в поле температуры и солёности показывает, что приток радионуклидов обеспечивается ответвлениями солёных атлантических вод Мурманского прибрежного течения, ориентированными рельефом дна. Наиболее глубоко эти потоки внедряются в прибрежную зону в районах губ Терiberская, Зеленецкая, Ивановская и далее вдоль Мурманского побережья.

Формирование фона радионуклидов в донных отложениях побережья. Интервал изменчивости величин удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в донных отложениях близок (таблица) к значениям наших предыдущих исследований (Объекты ..., 2017; Динамика ..., 2019; Концентрация ..., 2020). В западных участках прибрежной зоны также установлено долговременное влияние местных источников.

Распределение «пятен» повышенной активности определяется не только близостью объектов атомной инфраструктуры непосредственно в губах Варангер-фьорда, Мотовского и Кольского заливов. Так, хаотично расположенные в центральных частях заливов точки высокой концентрации ^{137}Cs соответствуют понижениям донного рельефа. Депрессивные участки дна обуславливают снос и накопление в отложениях тонкодисперсного осадочного материала – пелитов, алевроито-пелитов, что обеспечивает повышенное накопление радиоизотопов в осадке (Митяев и др., 2018; Ильин, Усягина 2019; Радиоэкологическое ..., 2023). Глубиной опосредована связь накоплений техногенных радионуклидов со структурой донных отложений. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в среднем составляет 4.6 и 0.6 Бк/кг сухого осадка соответственно.

В Кольском заливе высокий порог в рельефе дна его устьевой части ослабляет вымывание осажённого материала из ковша. Поэтому концентрация радионуклидов его средней и северной части повышена, и в целом донные отложения в нем более загрязнены, чем в Мотовском заливе.

В открытых районах побережья накопление ^{137}Cs существенно снижается – до 0.2–0.5 Бк/кг с удалением на восток от устьевых областей Кольского и Мотовского заливов (рис. 3). Выделяются локальные участки относительно повышенной удельной активности ^{137}Cs (2–3.7 Бк/кг), соответствующие ответвлениям прибрежного желоба и вихрям теплого Мурманского прибрежного течения. Удельная активность ^{90}Sr на таких участках увеличивается в отдельных точках до 2.5–4.5 Бк/кг. Максимальная активность $^{239,240}\text{Pu}$, также как ^{137}Cs и ^{90}Sr , отмечена в западных участках прибрежной зоны.

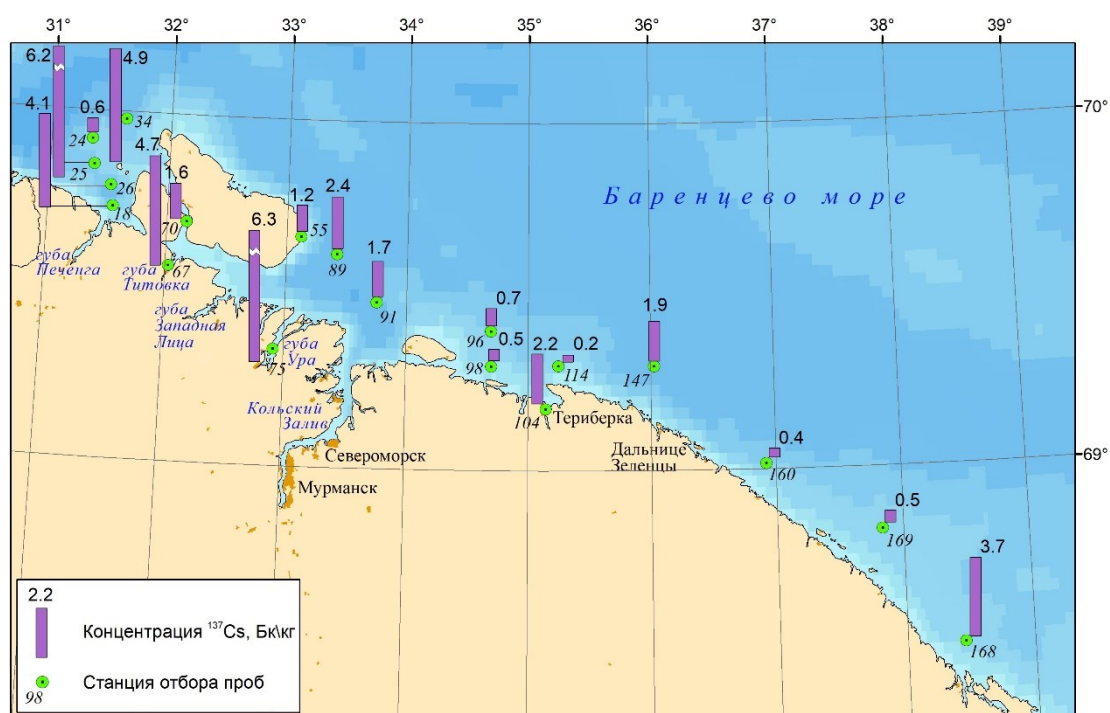


Рис. 3. Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях прибрежной зоны Мурмана, 2021 г.
Fig. 3. Specific activity of ^{137}Cs in bottom sediments of the coastal zone of the Murman in 2021

Используя сходство в общей тенденции распределения этих изотопов с запада на восток, на примере ^{137}Cs , данных о котором гораздо больше, мы с высокой долей вероятности можем выделить основные закономерности формирования фона концентраций плутония в прибрежье. Можно утверждать, что образование максимумов активности $^{239,240}\text{Pu}$ также связано с влиянием атомной инфраструктуры в губах прибрежья (Ильин и др., 2015; Объекты ..., 2017). Точечных источников в Мотовском заливе несколько. Это сток из губ Андреева (Западная Лица) с хранилищем ядерных отходов, а также из губ Ара и Ура с инфраструктурой флота.

Распределение «пятен» повышенной активности $^{239,240}\text{Pu}$, как и ^{137}Cs , в центральных частях заливов соответствует депрессиям донного рельефа, в которых происходит накопление тонкодисперсного осадочного материала. Однако корреляционной связи удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ с глубиной установить не удалось из-за недостатка данных.

В открытых районах побережья накопление ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ существенно снижается с удалением на восток от устьевых областей Кольского и Мотовского заливов, уровень накопления уже хорошо соответствует фону плутония в почвах России (0.8 Бк/кг) и осадках открытых районов моря (0.95 Бк/кг) (Новые ..., 2011; Лукашенко, Эдомская, 2021). Здесь также выделяются локальные участки относительного роста удельной активности цезия и плутония, связанные не только с транзитом радионуклидов с водами Мурманского течения, но и с накоплением тонкодисперсных отложений в ответвлениях желоба.

Динамика радиоактивного загрязнения воды прибрежной зоны. Запрещение испытаний ядерного оружия в 1963 г. и нормирование сброса отходов европейскими радиохимическими заводами в конце 1980-х гг. снизило концентрацию ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных отложениях Баренцева моря в целом. Однако полного вымывания радионуклидов из экосистемы не происходит, и последние 15–20 лет их концентрация в воде и донных осадках сохраняется на относительно низком, но стабильном уровне. Нами проанализированы данные многолетних радиоэкологических наблюдений ММБИ РАН в прибрежной зоне Мурмана. Использованы материалы эпизодических наблюдений с 1994 по 2005 гг. и данные регулярных наблюдений с 2005 по 2021 гг. (рисунки 4, 5). Исследовано радиоэкологическое состояние воды и поверхностного слоя донных осадков (0–3 см) в различных участках побережья.

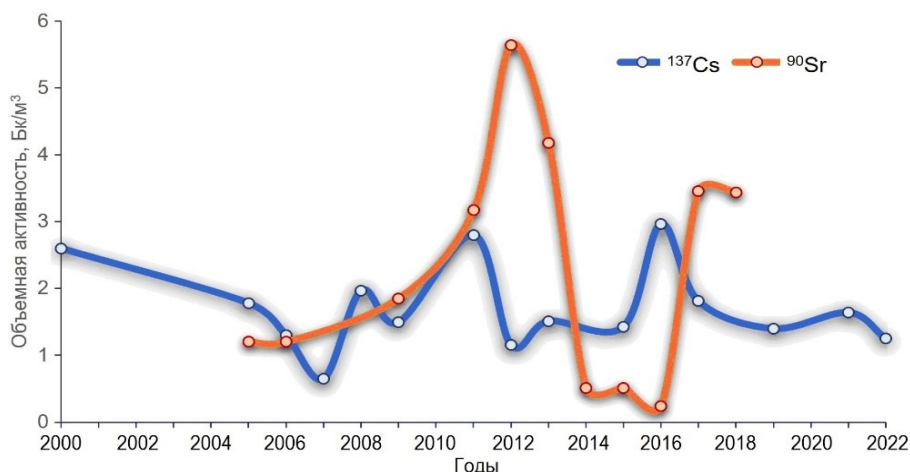


Рис. 4. Динамика среднегодовых значений активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде прибрежной зоны Мурмана
Fig. 4. Dynamics of the average annual values of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity in the waters of the Murmansk coastal zone

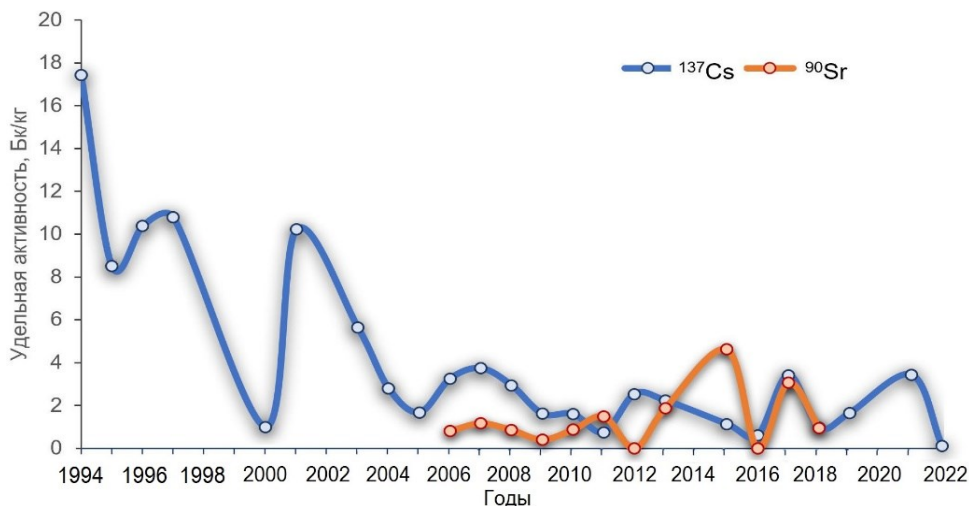


Рис. 5. Динамика среднегодовых значений активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в донных отложениях прибрежной зоны Мурмана
Fig. 5. Dynamics of the average annual values of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity in bottom sediments of the Murmansk coastal zone

С начала 2000 гг. темп снижения объемной активности замедлился, а концентрация приблизилась к современным значениям, обусловленным миграцией ^{137}Cs и ^{90}Sr в глобальном и региональном обороте, включая слабые локальные источники в регионе.

Отмечена неравномерность поступления радионуклидов в прибрежье в течение последних 20 лет. В целом нисходящий тренд активности ^{137}Cs и ^{90}Sr осложняется короткопериодной осцилляцией их осредненных концентраций. В водной среде графически отображаются 2 восходящие и 2 нисходящие фазы осцилляции (рис. 4). При этом фазы осцилляции ^{90}Sr запаздывают относительно осцилляций ^{137}Cs . Фазы близки по продолжительности, но не совпадают полностью. В донных отложениях такие различия также наблюдаются, однако они сглажены, по-видимому, вследствие низкой концентрации радионуклидов.

Цикличность в динамике концентраций, касающихся водной среды, может быть связана с таковой в поступлении североатлантических вод в прибрежную зону с течениями. Сдвиг фаз и другие различия в значительной степени обусловлены, вероятно, различиями геохимического поведения ^{137}Cs и ^{90}Sr в водной среде, а также процессами седиментации осадочного материала из водной толщи. Соединения стронция менее активно сорбируются взвесью и дольше остаются в водной среде по сравнению с цезием.

В связи с этим нами выполнен гармонический анализ ряда концентрации ^{90}Sr в водной массе прибрежья (Гордеева, 2017; Малинин, 2020). Выявлены две основные гармоники с периодами 4.5 и 3.58 года. Эти гармоники весьма удовлетворительно описывают наблюдаемую изменчивость, их вклад обеспечивает, соответственно, 45 и 42 % изменчивости ряда средних концентраций. Однако спектр наблюдаемых амплитуд осложняется дополнительными гармоническими и негармоническими осцилляциями, вызванными комплексом второстепенных дополнительных факторов. Причиной существенных расхождений расчетных рядов (13 %) может оказаться также небольшая длина исходного ряда данных (исходной выборки). Это допускает большое количество незначимых и менее выраженных гармоник в спектре динамических колебаний. Дополнительно разнородность распределения ^{90}Sr на участках морского дна усугубляют неравномерности рельефа и гранулометрической структуры донных осадений. Следует указать, что более высокая удельная активность отмечена во впадинах донного рельефа западной части моря, где более всего концентрируются тонкодисперсные отложения (Митяев и др., 2018; Динамика ..., 2019).

Заключение

Высокие уровни радиоактивного загрязнения районов прибрежья Кольского полуострова были выявлены в 1990-х гг. В прибрежье Мурмана главными источниками радиоизотопного загрязнения являлись объекты атомной инфраструктуры флота в губе Печенга, заливах Кольский и Мотовский, в проливе Йоканьгский рейд. В настоящее время радиоизотопное загрязнение морской прибрежной среды дифференцировано, но повсюду оценивается как низкофоновое, не вызывающее опасений за безопасность природопользования. В Кольском прибрежье по-прежнему действуют локальные, относительно слабые источники техногенной радиоактивности, связанные с инфраструктурой флота. В Варангер-фьорде таким источником является сток из губы Печенга. На участке Мурманского прибрежья – это сток из губы Андреева (Западная Лица) и суммарный сток из Кольского залива. Несмотря на повышенный фон ^{137}Cs и ^{90}Sr на этих участках, короткоживущие радионуклиды при исследованиях здесь не были обнаружены. Это свидетельствует, по-видимому, об остаточных следах эмиссии радионуклидов, не имеющей характера инцидентов.

В акватории, удаленной от техногенных источников радиации, фон удельной и объемной активности радиоизотопов значительно снижен. В то же время полученные данные подтверждают результаты более ранних наблюдений, свидетельствующих о влиянии притока радионуклидов в прибрежную зону с вихрями атлантических вод прибрежного течения.

Полученные данные могут быть приняты для решения фундаментальных научных задач и удовлетворения социальных запросов населения Мурманской области, а также могут рассматриваться как элемент мониторинга и необходимая информация для развития морехозяйственной деятельности.

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ госрегистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН, а также при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-17-00243).

Список литературы

1. Вакуловский С. М., Никитин А. И., Чумичев В. Б. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиохимических заводов // Атомная энергия. 1985. Т. 58, вып. 6. С. 445–449.
2. Гордеева С. М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». СПб.: Изд. РГГМУ, 2017. 68 с. URL: http://elibr.rshu.ru/files_books/pdf/img-503135449.pdf
3. Датирование современной осадочной толщи краевых бассейнов Восточного Мурмана (Кольский полуостров) на примере губ Ярнышная и Зеленецкая / Н. И. Мещеряков, И. С. Усягина, Г. В. Ильин, Н. С. Иванова // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14, № 3. С. 393–405. doi:10.25283/2223-4594-2024-3-393-405
4. Динамика искусственных радионуклидов в экосистемах морей Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков. Часть 2. Донные отложения / Г. Г. Матишов, Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Е. Э. Кириллова // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 4. С. 24–35. doi:10.7868/S25001640190404
5. Ильин Г. В., Усягина И. С. Радиоэкологические исследования в Мурманском прибрежье Баренцева моря как часть мониторинга среды при обращении с радиоактивными отходами // Атомная энергия. 2019. Т. 126, вып. 5. С. 285–289. URL: https://elibr.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t126-5_2019/p287/
6. Ильин Г. В., Усягина И. С., Касаткина Н. Е. Радиоэкологическое состояние морской и наземной среды в районе губы Андреева // Атомная энергия. 2015. Т. 118, вып. 3. С. 168–174. URL: https://elibr.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t118-3_2015/p170/
7. Концентрация искусственных радиоизотопов в биоте арктического шельфа в современных условиях (2013–2018 гг.) / Г. Г. Матишов, Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Д. А. Валуйская, Е. Э. Кириллова // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494, № 1. С. 67–71. doi:10.31857/S2686739720090133
8. Лукашенко С. Н., Эдомская М. А. Плутоний в окружающей среде: источники, механизмы распространения, концентрации // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61, № 4. С. 394–424. doi:10.31857/S086980312104007X
9. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд. РГГМУ, 2020. 408 с. URL: http://elibr.rshu.ru/files_books/pdf/img-417184359.pdf
10. Матишов Г. Г., Усягина И. С., Ильин Г. В. Реконструкция поступления и миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr в экосистеме Баренцева моря // Вестн. РФФИ. 2022. Т. 2, № 114. С. 119–135. doi:10.22204/2410-4639-2022-114-02-119-135
11. Матишов Д. Г., Матишов Г. Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. 417 с.
12. Митяев М. В., Герасимова М. В., Павлова Л. Г. Современные донные отложения Мотовского залива (Баренцево море) // Тр. Кольского науч. центра. 2018. Т. 4, № 9. Сер. Океанология. Вып. 5. С. 118–130. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018-9-4-118-130
13. Новые данные о концентрации изотопов плутония в отложениях Баренцева моря / Г. Г. Матишов, Н. Е. Касаткина, А. П. Леппанен, Д. Г. Матишов, Д. Солатие // Докл. РАН. 2011. Т. 440, № 5. С. 696–700. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17058002_37241647.pdf
14. Объекты инфраструктуры атомного флота как источник радиоактивного загрязнения Баренцева моря (на примере хранилища отходов в губе Андреева) / Г. В. Ильин, Н. Е. Касаткина, Д. В. Моисеев, И. С. Усягина // Атомная энергия. 2017. Т. 122, вып. 2. С. 108–114. URL: https://elibr.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t122-2_2017/p108/
15. Радиоактивное загрязнение Северного Ледовитого океана по результатам наблюдений в 1985–1987 гг. / А. И. Никитин, И. Ю. Катрич, А. И. Кабанов, В. Б. Чумичев, В. М. Смагин // Атомная энергия. 1991. Т. 71, вып. 2. С. 169–172.
16. Радиоэкологическое состояние среды морских экосистем Арктики в условиях современного природопользования / Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Н. Е. Касаткина, Д. А. Валуйская // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2020. Т. 5, № 11. Сер. Океанология. Вып. 7. С. 260–274. doi:10.37614/2307-5252.2020.11.4.013

17. Радиоэкологическое состояние прибрежной зоны Кольского полуострова (по данным наблюдений в 2013–2020 годах) / Г. Г. Матишов, Г. В. Ильин, И. С. Усягина, Д. В. Моисеев, Д. А. Валуйская // Метеорология и гидрология. 2023. № 4. С. 99–110. doi:10.52002/01-2906-2023-4-99-110
18. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean // Deep Sea Res. II. 2003. Vol. 50, № 17/21. P. 2597–2606. doi:10.1016/S0967-0645(03)00137-1
19. Plutonium isotopes as tracers for ocean processes: A review / P. Lindahl, S. H. Lee, P. Worsfold, M. Keith-Roach // J. Mar. Environ. Res. 2010. Vol. 69(2). P. 73–84. doi:10.1016/j.marenvres.2009.08.002

References

1. Vakulovskiy S. M., Nikitin A. I., Chumichev V. B. O zagryaznenii arkticheskikh morey radioaktivnymi otkhodami zapadnoevropeyskikh radiokhimicheskikh zavodov [On the contamination of the Arctic seas with radioactive waste from Western European radiochemical plants]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 1985, Vol. 58, Iss. 6, pp. 445–449 (in Russ.).
2. Gordeeva S. M. *Praktikum po distsipline «Statisticheskie metody obrabotki i analiza gidrometeorologicheskoy informatsii»* [A workshop on the discipline «Statistical methods of processing and analyzing hydrometeorological information»]. Saint Petersburg, Publ. RGGMU, 2017, 68 p. (In Russ.). Available at: http://elibrshu.ru/files_books/pdf/img-503135449.pdf
3. Meshcheryakov N. I., Usyagina I. S., Il'in G. V., Ivanova N. S. Datirovanie sovremennoy osadochnoy tolshchi kraevykh basseynov Vostochnogo Murmana (Kol'skiy poluoostrov) na primere gub Yarnyshnaya i Zelenetskaya [Dating of the recent sedimentary strata of the marginal basins of Eastern Murman (Kola Peninsula) using the example of Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy], 2024, Vol. 14, No. 3, pp. 393–405 (In Russ.). doi:10.25283/2223-4594-2024-3-393-405
4. Matishov G. G., Il'in G. V., Usyagina I. S., Kirillova E. E. Dinamika iskusstvennykh radionuklidov v ekosistemakh morey Severnogo Ledovitogo okeana na rubezhe XX–XXI vekov. Chast' 2. Donnye otlozheniya [Dynamics of artificial radionuclides in the ecosystems of the seas of the Arctic Ocean at the turn of the 21st century. Part 2. Bottom sediments]. *Nauka Yuga Rossii* [Science in the South of Russia], 2019, Vol. 15, No. 4, pp. 24–35 (In Russ.). doi:10.7868/S25001640190404
5. Il'in G. V., Usyagina I. S. Radioekologicheskie issledovaniya v Murmanskoy pribrezh'e Barentseva morya kak chast' monitoringa sredi pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami [Radioecological studies in the Murmansk littoral of the Barents Sea as part of environmental monitoring in radwaste management]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2019, Vol. 126, Iss. 5, pp. 285–289 (In Russ.). doi:10.1007/s10512-019-00558-6
6. Il'in G. V., Usyagina I. S., Kasatkina N. E. Radioekologicheskoe sostoyanie morskoy i nazemnoy sredi v rayone guby Andreeva [Radioecological state of marine and land environments in the region Andreeva Bay]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2015, Vol. 118, Iss. 3, pp. 168–174 (in Russ.). Available at: https://elibrbiblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t118-3_2015/p170/
7. Matishov G. G., Il'in G. V., Usyagina I. S., Valuyskaya D. A., Kirillova E. E. Kontsentratsiya iskusstvennykh radioizotopov v biote arkticheskogo shel'fa v sovremennykh usloviyakh (2013–2018 gg.) [Current levels of artificial radioisotopes in biota from the Arctic continental shelf (2013–2018)]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle* [Doklady RAS. Earth Sciences], 2020, Vol. 494, No. 1, pp. 67–71 (In Russ.). doi:10.31857/S2686739720090133
8. Lukashenko S. N., Edomskeya M. A. Plutoniyy v okruzhayushchey srede: istochniki, mekhanizmy rasprostraneniya, kontsentratsii [Plutonium in the environment: sources, distribution mechanisms, concentrations]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. [Radiation Biology. Radioecology], 2021, Vol. 61, No. 4, pp. 394–424 (In Russ.). doi:10.31857/S086980312104007X

9. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii* [Statistical methods for analyzing hydrometeorological information], Saint Petersburg, Publ. RGGMU, 2020, 408 p. (In Russ.). Available at: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-417184359.pdf
10. Matishov G. G., Usyagina I. S., Il'in G. V. Rekonstruktsiya postupleniya i migratsii ^{137}Cs i ^{90}Sr v ekosisteme Barentseva morya [Reconstruction of the Arrival and Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Ecosystem of the Barents Sea]. *Vestnik Rossiyskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy* [Bulletin Russian Foundation for Basic Research], 2022, Vol. 2, No. 114, pp. 119–135 (In Russ.). doi:10.22204/2410-4639-2022-114-02-119-135
11. Matishov D. G., Matishov G. G. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya* [Radiation ecological oceanology]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2001, 417 p. (In Russ.).
12. Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Pavlova L. G. Sovremennye donnye otlozheniya Motovskogo zaliva (Barentsevo more) [Modern bottom sediments of the Motovsky Bay (Barents Sea)]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, Seriya: Okeanologiya, vypusk 5* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Oceanology, iss. 5], 2018, Vol. 4, No. 9, pp. 118–130 (In Russ.). doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018-9-4-118-130
13. Matishov G. G., Kasatkina N. E., Leppanen A. P., Matishov D. G., Solatie D. Novye dannye o kontsentratsii izotopov plutoniya v otlozheniyakh Barentseva morya [New data on the concentration of plutonium isotopes in the sediments of the Barents Sea]. *Doklady Akademii Nauk* [Doklady RAS], 2011. Vol. 440, No. 5, pp. 696–700 (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17058002_37241647.pdf
14. Il'in G. V., Kasatkina N. E., Moiseev D. V., Usyagina I. S. Ob"ekty infrastruktury atomnogo flota kak istochnik radioaktivnogo zagryazneniya Barentseva morya (na primere khranilishcha otkhodov v gube Andreeva) [Infrastructure objects of the nuclear fleet as sources of radioactive contamination of the Barents Sea (using the example of a waste storage facility in Andreeva Bay)]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2017, Vol. 122, Iss. 2, pp. 108–114 (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t122-2_2017/p108/
15. Nikitin A. I., Katrich I. Yu., Kabanov A. I., Chumichev V. B., Smagin V. M. Radioaktivnoe zagryaznenie Severnogo Ledovitogo okeana po rezul'tatam nablyudeniya v 1985–1987 gg. [Radioactive contamination of the Arctic Ocean, based on observations in 1985–1987]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 1991, Vol. 71, Iss. 2, pp. 169–172 (In Russ.).
16. Il'in G. V., Usyagina I. S., Kasatkina N. E., Valuyskaya D. A. Radioekologicheskoe sostoyanie sredy morskikh ekosistem Arktiki v usloviyakh sovremennogo prirodopol'zovaniya [Radioecological status of arctic marine ecosystems and current ocean and coastal management]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, Seriya: Okeanologiya, vypusk 7* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Oceanology, iss. 7], 2020, Vol. 5, No. 11, pp. 260–274 (In Russ.). doi:10.37614/2307-5252.2020.11.4.013
17. Matishov G. G., Il'in G. V., Usyagina I. S., Moiseev D. V., Valuyskaya D. A. Radioekologicheskoe sostoyanie pribrezhnoy zony Kol'skogo poluostrova (po dannym nablyudeniya v 2013–2020 godakh) [Radioecological condition of the Kola Peninsula coastal zone according to observations in 2013–2020]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2023, No. 4, pp. 99–110 (In Russ.). doi:10.3103/S106837392304009X
18. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean. *Deep Sea Res. II*, 2003, Vol. 50, No. 17/21, pp. 2597–2606. doi:10.1016/S0967-0645(03)00137-1
19. Lindahl P., Lee S. H., Worsfold P., Keith-Roach M. Plutonium isotopes as tracers for ocean processes: A review. *J. Mar. Environ. Res.*, 2010, Vol. 69(2), pp. 73–84. doi:10.1016/j.marenvres.2009.08.002

Информация об авторах

Геннадий Васильевич Ильин – кандидат географических наук, главный научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-5707-9114>

Ирина Сергеевна Усягина – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-5984-6479>

Information about the authors

Gennady V. Ilyin – PhD (Geography), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5707-9114>

Irina S. Usyagina – PhD (Geography), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5984-6479>

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 23.06.2025.
The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 23.06.2025.

Научная статья
УДК 597.08.591.9
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.007

СТРУКТУРА И БИОРАЗНООБРАЗИЕ ПРИБРЕЖНОЙ ИХТИОФАУНЫ ГУБ ВОСТОЧНОГО МУРМАНА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2022 ГОДА

Оксана Юрьевна Кудрявцева

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
kudryavtseva@mmbi.info

Аннотация

Рассмотрен видовой состав ихтиофауны литорально-сублиторальной зоны губ Ярнышная и Зеленецкая (Баренцево море) в летний период 2022 г. Получены количественные характеристики распределения каждого вида рыб. Проанализирована пространственно-временная и межгодовая динамика обилия и разнообразия рыбной части прибрежных сообществ. Отмечено 12 видов рыб, среди которых наиболее постоянным и многочисленным в прибрежной ихтиофауне была сайда. Рыбные сообщества летом 2022 г. в сравнении с многолетними данными характеризовались средними показателями видового богатства, плотности распределения рыб, обилия тресковых видов и биоразнообразия.

Ключевые слова:

ихтиофауна, состав, численность, биомасса, разнообразие, прибрежная зона, губы Ярнышная и Зеленецкая

Original article

STRUCTURE AND BIODIVERSITY OF COASTAL FISH IN THE BAYS OF EASTERN MURMAN DURING SUMMER 2022

Oksana Yu. Kudryavtseva

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
kudryavtseva@mmbi.info

Abstract

In the article was considered species composition of fish in the littoral and sublittoral zones of Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays (Barents Sea) during summer 2022. Also quantitative characteristics of the distribution for each fish species are represented. The dynamics of abundance and diversity of coastal fish communities were analyzed. At whole was discovered 12 species of fish and most abundant between them is young saithe *Pollachius virens*. Comparing of perennial data with 2022 indicates that at the present observed average species composition, fish distribution density, abundance of young Gadidae and indicators of biodiversity in coastal communities.

Keywords:

ichthyofauna, composition, quantity, biomass, diversity, intertidal zone, Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays

Введение

Исследования в прибрежной зоне Баренцева моря в связи с интенсивным хозяйственным освоением в последние годы береговой линии становятся все более актуальными и востребованными. Они одни из приоритетных направлений деятельности Мурманского морского биологического института РАН с 2008 г. Основные задачи этих наблюдений заключаются в получении базовых знаний о структуре и биоразнообразии литорально-сублиторальных сообществ рыб и изучении причинно-следственных связей их изменчивости.

Данная работа освещает результаты ихтиологических исследований, выполненных в губах Ярнышная и Зеленецкая в летний период 2022 г., цель которых состояла в оценке структуры и биоразнообразия прибрежных сообществ рыб в сравнении с многолетними данными.

Материал и методы

Описание районов исследований, расположения стандартных ихтиологических станций, методов отбора и обработки проб изложены нами в более ранних публикациях (Kudryavtseva, 2018; Кудрявцева, 2019, 2022). В 2022 году площадь одного облова волокушей варьировала в пределах 200–350 м².

Выполнено 7 икhtiологических станций в губе Зеленецкая и 6 – в губе Ярнышная (табл. 1). Анализ выполнен для 1045 рыб (табл. 2).

Таблица 1

Характеристика отбора икhtiологических проб в 2022 г.

Table 1

Areas and dates of ichthyological sampling in 2022

Район	Дата	Количество станций
Губа Ярнышная	13.07	3
	11.08	3
Губа Зеленецкая	16.07	4
	12.08	3

Таблица 2

Объем материала, экз.

Table 2

Volume of material studied, spec.

Вид	Губа Ярнышная	Губа Зеленецкая
Атлантическая треска <i>Gadus morhua</i> Linnaeus, 1758	12	72
Сайда <i>Pollachius virens</i> (Linnaeus, 1758)	19	799
Трехиглая колюшка <i>Gasterosteus aculeatus</i> Linnaeus, 1758	7	–
Арктический шлемоносный бычок <i>Gymnocanthus tricuspid</i> (Reinhardt, 1830)	1	3
Европейский керчак <i>Myoxocephalus scorpius</i> (Linnaeus, 1758)	30	21
Пинагор <i>Cyclopterus lumpus</i> Linnaeus, 1758	–	1
Европейская бельдюга <i>Zoarces viviparus</i> (Linnaeus, 1758)	–	2
Атлантический маслюк <i>Pholis gunnellus</i> (Linnaeus, 1758)	9	5
Европейская многопозвонковая песчанка <i>Ammodytes marinus</i> Raitt, 1934	–	18
Ершоватка <i>Limanda limanda</i> (Linnaeus, 1758)	–	1
Речная камбала <i>Platichthys flesus</i> (Linnaeus, 1758)	1	1
Морская камбала <i>Pleuronectes platessa</i> Linnaeus, 1758	–	43
Всего	79	966

Номенклатура и зоогеографическая характеристика видов даны в соответствии с современными представлениями о систематике рыбообразных и рыб (Andriashev, Chernova, 1995; Catalog ..., 2025). Для характеристики равномерности распределения каждого вида вычисляли частоту его встречаемости F . Биоразнообразие сообществ оценивалось по индексам видового богатства Менхеника D_{Mn} , неоднородности Шеннона H и доминирования Бергера–Паркера d (Мэггаран, 1992). При анализе многолетней динамики количественных характеристик распределения и биоразнообразия рыбных сообществ были использованы данные, осредненные за сезон по двум исследованным губам.

Результаты и обсуждение

Видовой состав. В литорально-сублиторальной зоне исследованных губ летом 2022 г. обнаружено 12 видов рыб, относящихся к 8 семействам, 5 отрядам (табл. 3). Наиболее представительным по числу семейств был отряд Perciformes – 3, а по числу видов – семейство Pleuronectidae – 3. По характеру зоогеографического ареала преобладали преимущественно бореальные виды (91.7 %), а преимущественно арктические были представлены единственным видом – арктическим шлемоносным бычком.

Уловы состояли в основном из молоди указанных видов (табл. 3). Сайда и арктический шлемоносный бычок представлены в литоральных сообществах только сеголетками, у атлантической трески, трехиглой колюшки, европейского керчака, атлантического маслюка и морской камбалы наряду с сеголетками встречалась и более старшая молодь, а у остальных видов сеголетки отсутствовали. Икhtiофауна в разных районах несколько различалась по видовому составу. Так пинагор,

европейская многопозвонковая песчанка, ершоватка и морская камбала отмечены только в губе Зеленецкая, а трехиглая колюшка – лишь в губе Ярнышная. Число видов на станциях варьировало от 3 до 8, максимальное отмечено в губе Зеленецкая на станциях 1 и 4. Однако наиболее часто в обеих губах встречалась молодь сайды, европейского керчака ($F = 85.7\text{--}100\%$) и атлантической трески ($F = 66.7\text{--}100\%$) (табл. 3). В губе Зеленецкая отмечена относительно высокая встречаемость морской камбалы, а в губе Ярнышная – атлантического маслюка. Другие виды редко отмечались на литорали губ Восточного Мурмана в 2022 г.

Таблица 3

Частота встречаемости видов рыб в губах Восточного Мурмана в летний период 2022 г.

Table 3

Frequency of species occurrence in Eastern Murman bays during summer period in 2022

Таксон	ЗГА	Губа Зеленецкая					Губа Ярнышная				
		Станции				F, %	Станции			F, %	
		1	2	3	4		5	6	7		
Отряд Gadiformes											
Семейство Gadidae											
<i>Gadus morhua</i>	ПБ	+	+	+	+	100.0	+	+	+	66.7	
<i>Pollachius virens</i>	ПБ	+	+	+	+	85.7	+	+	+	100.0	
Отряд Gasterosteiformes											
Семейство Gasterosteidae											
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	ПБ	–	–	–	–	–	+	+	+	66.7	
Отряд Scorpaeniformes											
Семейство Cottidae											
<i>Gymnocanthus tricuspis</i>	ПА	+	–	–	+	28.6	–	–	+	16.7	
<i>Myoxocephalus scorpius</i>	ПБ	+	+	+	+	85.7	+	+	+	100.0	
Семейство Cyclopteridae											
<i>Cyclopterus lumpus</i>	ПБ	+	–	–	–	14.3	–	–	–	–	
Отряд Perciformes											
Семейство Zoarcidae											
<i>Zoarces viviparus</i>	ПБ	+	–	–	+	28.6	–	–	–	–	
Семейство Pholidae											
<i>Pholis gunnellus</i>	ПБ	–	–	+	+	28.6	+	+	–	50.0	
Семейство Ammodytidae											
<i>Ammodytes marinus</i>	ПБ	+	–	–	–	14.3	–	–	–	–	
Отряд Pleuronectiformes											
Семейство Pleuronectidae											
<i>Limanda limanda</i>	ПБ	–	–	+	–	14.3	–	–	–	–	
<i>Platichthys flesus</i>	ПБ	–	–	–	+	14.3	–	–	+	16.7	
<i>Pleuronectes platessa</i>	ПБ	+	–	–	+	57.1	–	–	–	–	
Всего видов		8	3	5	8	11	5	5	6	7	

ПРИМЕЧАНИЕ. ЗГА – зоогеографический ареал: ПА – преимущественно арктический, ПБ – преимущественно бореальный вид; F – частота встречаемости.

Распределение. В среднем за период исследований в 2022 г. плотность распределения рыб в куту губы Ярнышная была 0.5 тыс. экз/га, в литоральной зоне губы Зеленецкая – 5.6 тыс. экз/га, а их биомасса составляла соответственно 1.5 и 32.0 кг/га. Прибрежные сообщества рыб в губах различались не только по видовому составу, но и по количественным характеристикам распределения отдельных видов (рис. 1). В губе Ярнышная наблюдались более плотные скопления европейского керчака, атлантического маслюка и речной камбалы. Акваторию губы Зеленецкая предпочитали тресковые виды и арктический шлемоносный бычок.

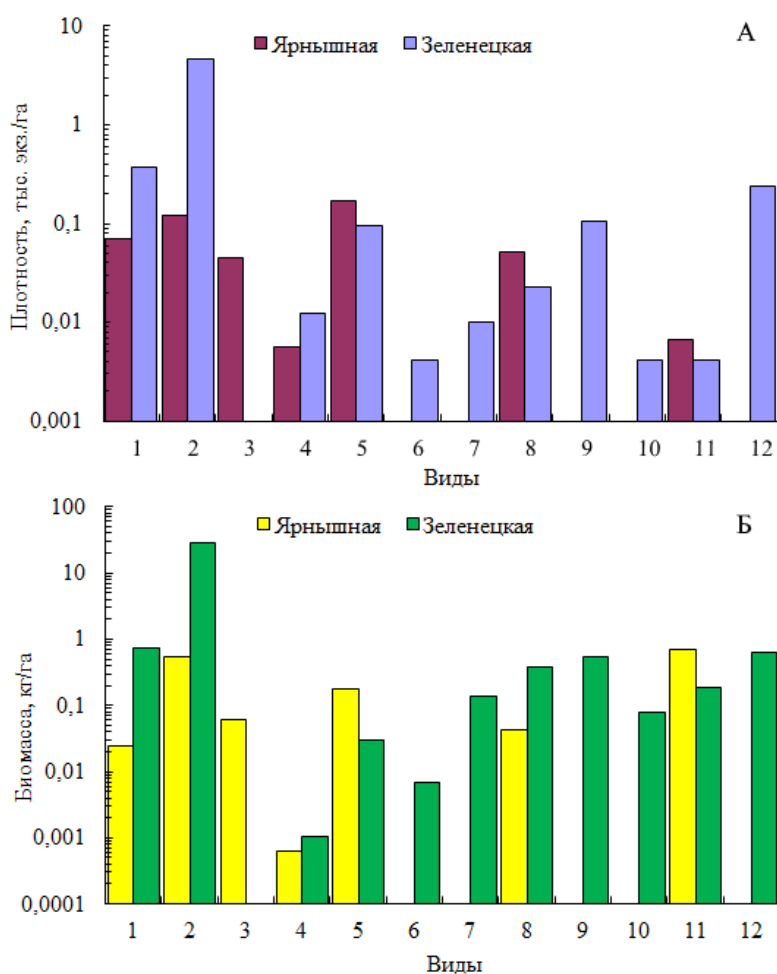


Рис. 1. Средняя плотность (А) и средняя удельная биомасса (Б) рыб в губах Восточного Мурмана летом 2022 г.: 1 – *G. morhua*, 2 – *P. virens*, 3 – *G. aculeatus*, 4 – *G. tricuspis*, 5 – *M. scorpius*, 6 – *C. lumpus*, 7 – *Z. viviparus*, 8 – *P. gunnellus*, 9 – *A. marinus*, 10 – *L. limanda*, 11 – *P. flesus*, 12 – *P. platessa*

Fig. 1. Mean density of fish distribution (А) and mean specific fish biomass (Б) in Eastern Murman bays in summer period 2022:

1 – *G. morhua*, 2 – *P. virens*, 3 – *G. aculeatus*, 4 – *G. tricuspis*, 5 – *M. scorpius*, 6 – *C. lumpus*, 7 – *Z. viviparus*, 8 – *P. gunnellus*, 9 – *A. marinus*, 10 – *L. limanda*, 11 – *P. flesus*, 12 – *P. platessa*

Наиболее обильным видом в сообществах рыб губы Зеленецкая была сайда, плотность распределения которой в среднем за летний период составила 4.7 тыс. экз/га, плотность других видов была на порядки меньше (рис. 1А). В губе Ярнышная рыбы держались очень разреженно, в сообществах преобладал европейский керчак (0.2 тыс. экз/га). Основу биомассы прибрежных сообществ рыб губы Зеленецкая летом 2022 г. составляла сайда (29.3 кг/га), а в губе Ярнышная, где биомасса этого вида не превышала 0.6 кг/га, преобладала речная камбала – 0.7 кг/га (рис. 1Б).

В июле в обеих губах рыбные сообщества характеризовались сходными низкими показателями обилия (рис. 2). Так плотность распределения рыб не превышала 0.6 тыс. экз/га, а их биомасса варьировала от 0.4 кг/га в губе Ярнышная до 1.4 кг/га в губе Зеленецкая, где отмечался значительный прилов сравнительно крупных камбаловых видов рыб 2–4-летнего возраста и 5-летних особей атлантического маслюка. Ядро сообществ губ в начале периода наблюдений формировали сеголетки европейского керчака и атлантической трески, которые разреженно встречались в литоральной зоне. Основной вклад в биомассу литоральных сообществ губы Ярнышная привносил европейский керчак, а в губе Зеленецкая – атлантический маслюк и речная камбала.

В августе в литоральной зоне наблюдалось увеличение плотности распределения сеголеток сайды, которая заняла доминирующее положение по численности в рыбных сообществах обеих губ (рис. 2). При этом общая плотность распределения рыб в губе Ярнышная, по сравнению с июлем, практически не изменилась, оставаясь на низком уровне, и доля сайды в сообществах не превышала 50 %, а в губе Зеленецкая – резко возросла до 10.6 тыс. экз/га (62.5 кг/га) и доля сайды достигла 88.3 %. По биомассе в рыбных сообществах губы Ярнышная превалировала речная камбала (52.1 %), а в губе Зеленецкая – сайда (93.5 %). В августе наблюдалось незначительное снижение плотности распределения атлантического маслюка и керчаковых рыб, а также увеличение обилия атлантической трески и морской камбалы в губе Зеленецкая и трехиглой колюшки в губе Ярнышная. Следует также отметить, что традиционно встречающиеся в ктовой зоне губы Ярнышная половозрелые особи речной камбалы в летний период 2022 г. отсутствовали, а единственная 4-летняя особь, выловленная в этом районе в августе, имела длину 19.4 см.

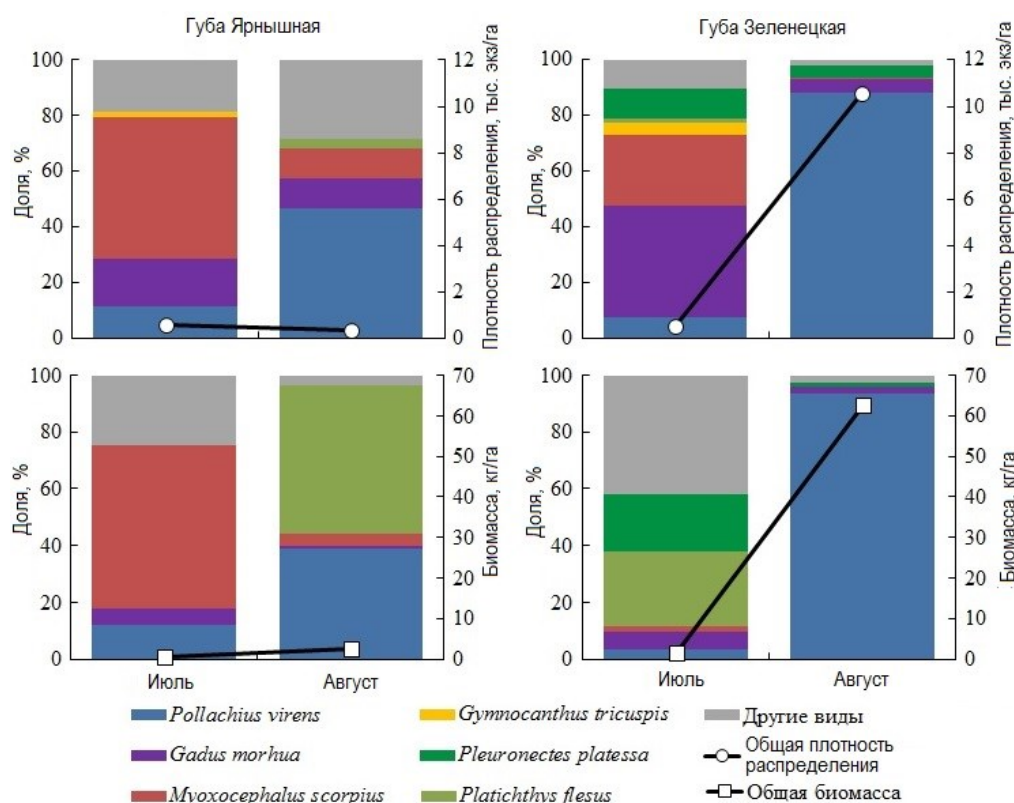


Рис. 2. Пространственно-временные изменения структуры литорально-сублиторальных сообществ рыб летом 2022 г.
Fig. 2. Spatio-temporal changes in the structure of the littoral-sublittoral fish communities in summer 2022

Сравнивая полученные результаты с данными за предшествующие годы (Kudryavtseva, 2018; Кудрявцева, 2019, 2022, 2023, 2024), следует отметить, что прибрежная ихтиофауна летом 2022 г. характеризовалась немногочисленным видовым составом (12 видов) и невысокой плотностью распределения рыб, составляющей 5.2 тыс. экз/га (17.2 кг/га) (рис. 3). Наиболее обильными в литоральной зоне исследованных губ были сеголетки сайды. Плотность распределения этого вида в среднем составила 2.4 тыс. экз/га (14.9 кг/га). Показатели для остальных видов были на порядки меньше.

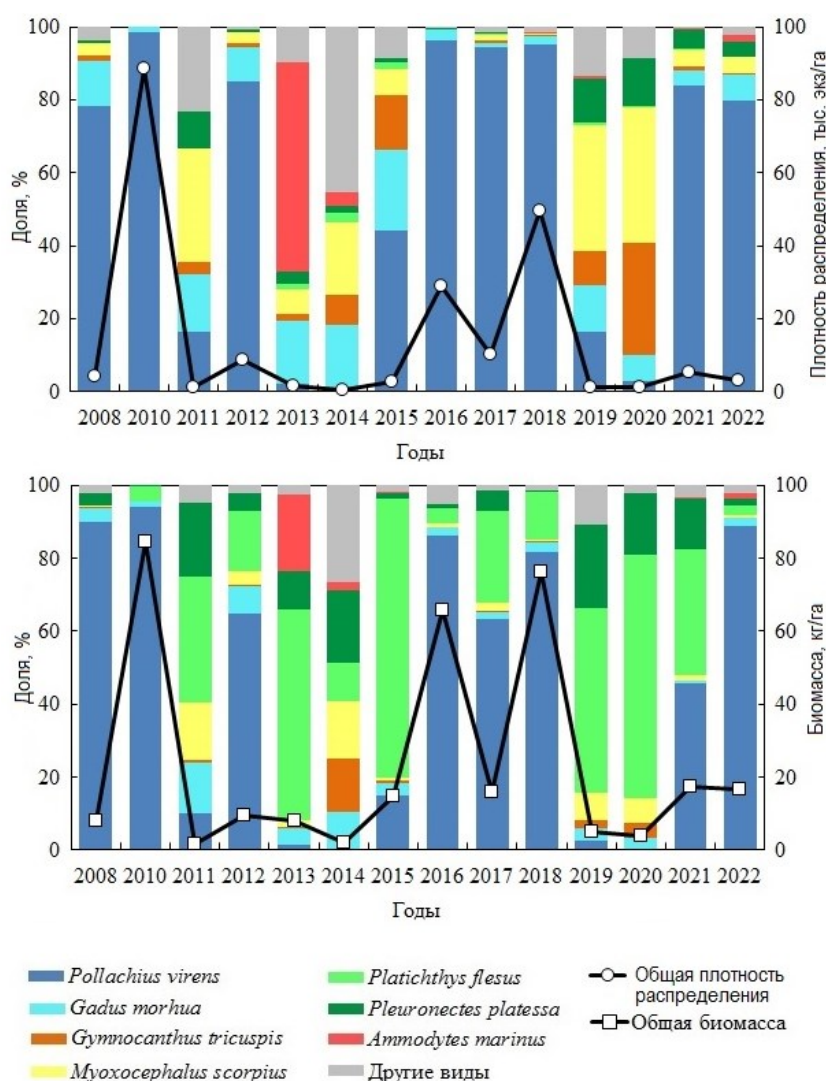


Рис. 3. Многолетняя динамика распределения рыб в прибрежной зоне губ Ярнышная и Зеленецкая в летний период

Fig. 3. Dynamics of ichthyofauna distribution in coastal zone of Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays in summer period

Суммарная плотность распределения сеголеток тресковых видов (сайды и атлантической трески) составила 2.6 тыс. экз/га (15.3 кг/га). Таким образом, по степени обилия молоди тресковых видов 2022 г. следует характеризовать как период их средней численности. К этой категории были отнесены 2008, 2012, 2017 и 2021 гг. (Kudryavtseva, 2018; Кудрявцева, 2024), когда прибрежные сообщества рыб отличались невысокими показателями обилия (4.1–10.1 тыс. экз/га, 7.9–17.2 кг/га) и обилия тресковых видов (3.4–9.6 тыс. экз/га, 6.7–10.3 кг/га), небольшим числом видов (10–13) и достаточно высокой долей молоди сайды в сообществах рыб (рис. 3).

Биоразнообразие сообществ. Многолетний ряд наблюдений за рыбными сообществами губ Восточного Мурмана в летний период позволил установить, что в 2022 г. им характерны средние показатели видового богатства ($D_{Mn} = 0.37$) и биоразнообразия ($H' = 1.29$). Вместе с тем отмечена относительно высокая степень доминирования преобладающего вида ($d = 0.78$) (рис. 4). Сходные по характеристикам биоразнообразия прибрежные сообщества рыб отмечены в 2008 и 2021 гг.

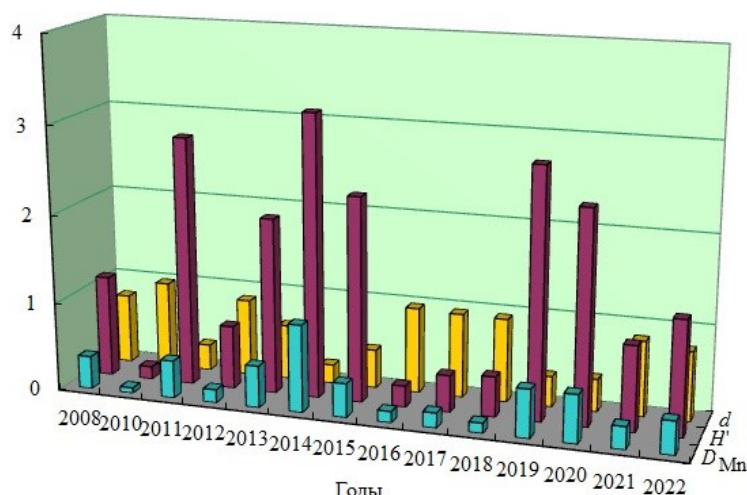


Рис. 4. Динамика показателей видового разнообразия прибрежных сообществ рыб в губах Ярнышная и Зеленецкая
Fig. 4. Dynamics of indices of diversity of coastal fish communities in Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays

Заключение

В летний сезон 2022 г. рыбная часть сообществ прибрежной зоны губ Ярнышная и Зеленецкая характеризовалась невысокими показателями обилия (0.5–5.6 тыс. экз/га, 1.5–32.0 кг/га) и видового богатства (12 видов). Наиболее плотные скопления рыб отмечены в губе Зеленецкая, где самым многочисленным видом в ихтиофауне литорали была сайда, доминирующая и по биомассе. В разреженных сообществах губы Ярнышная по плотности распределения преобладал европейский керчак, а по биомассе – речная камбала.

В течение летнего периода 2022 г. в прибрежной зоне губ Восточного Мурмана наблюдалось увеличение обилия сеголеток сайды, что сходным образом повлияло на структуру ихтиофауны обеих губ. Поскольку более плотные скопления сайды наблюдались в губе Зеленецкая, литоральные сообщества рыб этой губы претерпели более выраженные внутрисезонные изменения: увеличение плотности рыб в литоральной зоне и смена преобладающего вида.

Сравнительный анализ результатов многолетних исследований прибрежной ихтиофауны губ Восточного Мурмана свидетельствует, что в 2022 г. литоральные сообщества рыб характеризовались средними показателями видового богатства, плотности распределения рыб, обилия молоди тресковых видов и биоразнообразия. Сходными характеристиками обладали сообщества рыб в годы невысокой (средней) численности сеголеток сайды (2008 и 2021 гг.).

Автор выражает искреннюю благодарность директору ММБИ РАН М. В. Макарову и сотрудникам Института И. В. Рыжик, М. В. Митяеву, М. В. Герасимовой, Д. В. Пуговкину, Д. О. Салахову, а также С. С. Голдину, А. С. Курило и многим другим за всестороннюю помощь в полевых работах и при сборе материала.

Работа выполнена по теме «Экология рыб и биоразнообразие рыбной части сообществ арктических морей» (№ госрегистрации 124013000725-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Кудрявцева О. Ю. Характеристика прибрежных сообществ рыб в губах Восточного Мурмана в летне-осенний период 2018 г. // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2019. Т. 3, № 10. Сер. Океанология. Вып. 6. С. 22–35. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.3.22-35
2. Кудрявцева О. Ю. Характеристика прибрежных сообществ рыб в губах Восточного Мурмана в летне-осенний период 2019 года // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2022. Т. 4, № 13. Сер. Океанология. Вып. 10. С. 42–54. doi:10.37614/2307-5252.2022.4.10.005
3. Кудрявцева О. Ю. Характеристика прибрежной ихтиофауны губ Восточного Мурмана в летний период 2020 года // Тр. Кольского науч. центра РАН. Сер. Естественные и гуманитарные науки. 2023. Т. 2, № 3. С. 34–44. doi:10.37614/2949-1185.2023.2.3.005

4. Кудрявцева О. Ю. Характеристика прибрежной ихтиофауны губ Восточного Мурмана в летний период 2021 года // Тр. Кольского науч. центра РАН. Сер. Естественные и гуманитарные науки. 2024. Т. 3, № 3. С. 94–103. doi:10.37614/2949-1185.2024.3.3.009
5. Мэггаран Э. Экологическое разнообразие и его измерение / Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 184 с.
6. Andriashev A. P., Chernova N. V. Annotated List of fishlike vertebrates and fishes of the arctic seas and adjacent waters // J. Ichthyology. 1995. Vol. 35, № 1. P. 81–123.
7. Catalog of fishes: genera, species, references / R. Fricke, W. N. Eschmeyer, R. van der Laan (Eds.). Electronic version accessed 14 March 2025. URL: <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>
8. Kudryavtseva O. Yu. Structure of coastal fish communities in Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays (Eastern Murman) // J. Ichthyology. 2018. Vol. 58, № 4. P. 508–518. doi:10.1134/S0032945218040094

References

1. Kudryavtseva O. Yu. Kharakteristika pribrezhnykh soobshchestv ryb v gubakh Vostochnogo Murmana v letne-osenniy period 2018 g. [Characteristics of coastal fish communities in Eastern Murman bays during summer and autumn 2018]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Okeanologiya, vypusk 6* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Oceanology, Iss. 6], 2019, Vol. 3, No. 10, pp. 22–35 (In Russ.)
2. Kudryavtseva O. Yu. Kharakteristika pribrezhnykh soobshchestv ryb v gubakh Vostochnogo Murmana v letne-osenniy period 2019 goda [Characteristics of coastal fish communities in Eastern Murman bays during summer and autumn 2019]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Okeanologiya, vypusk 10* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Oceanology, Iss. 10], 2022, Vol. 4, No. 13, pp. 42–54 (In Russ.)
3. Kudryavtseva O. Yu. Kharakteristika pribrezhnoy ikhtiofauny gub Vostochnogo Murmana v letniy period 2020 goda [Characteristics of coastal fish in the bays of Eastern Murman during summer 2020]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Estestvennye i gumanitarnye nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities], 2023, Vol. 2, No. 3, pp. 34–44 (In Russ.)
4. Kudryavtseva O. Yu. Kharakteristika pribrezhnoy ikhtiofauny gub Vostochnogo Murmana v letniy period 2021 goda [Characteristics of coastal fish in the bays of Eastern Murman during summer 2021]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Estestvennye i gumanitarnye nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities], 2024, Vol. 3, No. 3, pp. 94–103 (In Russ.)
5. Megarran E. *Ekologicheskoe raznoobrazie i ego izmerenie* [Ecological diversity and its measurement]. Moscow, Mir, 1992, 184 p. (In Russ.)
6. Andriashev A. P., Chernova N. V. Annotated list of fishlike vertebrates and fishes of the arctic seas and adjacent waters. J. Ichthyology, 1995, Vol. 35, No. 1, pp. 81–123.
7. Catalog of fishes: genera, species, references / R. Fricke, W. N. Eschmeyer, R. van der Laan (Eds.). Electronic version accessed 14 March 2025. Available at: <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>
8. Kudryavtseva O. Yu. Structure of coastal fish communities in Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays (Eastern Murman). J. Ichthyology, 2018, Vol. 58, No. 4, pp. 508–518.

Информация об авторе

Оксана Юрьевна Кудрявцева – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
<https://orcid.org/0000-0001-7716-1134>

Information about the author

Oksana Yu. Kudryavtseva – PhD (Biology), Senior Researcher
<https://orcid.org/0000-0001-7716-1134>

Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 13.05.2025.
The article was submitted 24.03.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 13.05.2025.

Научная статья
УДК 595.122.2:594.3
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.008

ПАРАЗИТОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ММБИ РАН В 2020–2024 ГОДАХ

Вадим Владимирович Куклин, Марина Михайловна Куклина

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия

kuklin@mmbi.info, kuklina@mmbi.info

Аннотация

Представлены результаты паразитологических исследований Мурманского морского биологического института РАН с 2020 по 2024 гг.: анализ географического и гостального распределения гельминтов птиц Баренцева моря; сезонно-возрастные изменения гельминтофауны серебристых чаек (нелетающих птенцов, слетков и взрослых птиц) Кольского залива; основные тенденции многолетней динамики гельминтофауны и физиологического состояния моевок (на примере гнездовой колонии на п-ове Рыбачий) на фоне климатических изменений с 2006 по 2020 гг. Дана оценка современного состояния гельминтофауны моевок северной части Карского моря. Приведены результаты паразитологического обследования на литорали Мурманского побережья беспозвоночных животных (брюхоногих моллюсков и амфипод), служащих промежуточными хозяевами гельминтов морских птиц. Показано влияние гельминтной инвазии на активность пищеварительных ферментов морских птиц (обыкновенных гаг, гаг-гребенушек, серебристых чаек, атлантического глупыша). В результате экспериментальных и лабораторных исследований определена активность ферментов белкового обмена в кишечнике птенцов серебристой чайки при инвазии пятью видами цестод.

Ключевые слова:

морские птицы, брюхоногие моллюски, амфиподы, цестоды, трематоды, нематоды, скребни, Баренцево море, Карское море, Мурманское побережье

Original article

PARASITOLOGICAL RESEARCHES OF MMBI RAS IN 2020–2024

Vadim V. Kuklin, Marina M. Kuklina

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Science, Murmansk, Russia

kuklin@mmbi.info, kuklina@mmbi.info

Abstract

The results of parasitological studies of the Murmansk Marine Biological Institute Russian Academy of Sciences, in the period from 2020 to 2024 are presented: the analysis of the geographical and hostal distribution of helminthes of birds the Barents Sea; seasonal and age-related changes in the helminthes fauna of the herring gull (flightless chicks, fledglings, and adult birds) in the Kola Bay; the main trends of the long-term dynamics of the helminthes fauna and the physiological state of the black-legged kittiwake (on the example of a breeding colony on the Rybachy Peninsula) against the background of climatic changes in the period from 2006 to 2020. The current state of the helminthes fauna of the black-legged kittiwakes in the northern part of the Kara Sea has been assessed. The results of a parasitological examination of invertebrates (gastropods and amphipods) as intermediate hosts for seabirds helminthes on the littoral of the Murmansk coast are presented. The effect of helminthic infection on the activity of digestive enzymes of seabirds (common eiders, king eiders, herring gulls, northern fulmars) has been showed. As a result of experimental and laboratory studies, of the activity of protein metabolism enzymes in the intestines of herring gull chicks by infection of five different species of cestodes have been carried out.

Keywords:

seabirds, gastropods, amphipods, cestodes, trematodes, nematodes, acanthocephalans, Barents Sea, Kara Sea, Murmansk coast

За прошедшее пятилетие (2020–2024 гг.) сотрудники лаборатории орнитологии и паразитологии Мурманского морского биологического института РАН проводили активное исследование паразитов морских птиц в экосистемах северных морей, изучали их видовой состав и распределение, а также взаимоотношения в системе «паразит–хозяин».

Паразитологические исследования морских птиц

Анализ географического распространения и гостального распределения гельминтов птиц Баренцева моря, циркулирующих в пелагических и прибрежных биоценозах. В морских экосистемах (включая арктические) круг хозяев и географические ареалы паразитов исторически ограничены генеалогическими и экологическими связями. Формируясь по определенным законам во времени и пространстве, гельминтофауна каждого вида может иметь элементы с самым разным географическим распространением – от повсеместного и биполярного до локально-очагового. Особенности распределения могут быть связаны с относительным эволюционным возрастом паразито-хозяйинной системы, степенью подвижности хозяев и продолжительностью коэволюции паразитов и хозяев. Исследования в области познания путей и направлений расселения гельминтов и на региональном, и на глобальном уровнях представляют большой интерес.

Паразитофауне морских птиц в плане изучения исторической биогеографии до определенного времени уделялось незначительное внимание. Впоследствии рост объема первичного материала и использование современных методов эмпирических и филогенетических исследований позволили определить базовые временные рамки и эволюционно-экологические механизмы формирования паразитофауны птиц в Голарктике (концепция арктических рефугиумов) (Hoberg, Adams, 2000). Однако на тот момент информация о составе и структуре фауны гельминтов птиц Баренцева моря была неполной и фрагментарной. Анализ современных данных по паразитам баренцевоморской орнитофауны в рамках упомянутой концепции может существенно расширить представление о биогеографии гельминтов, циркулирующих в морских биоценозах.

По итогам исследований установлено, что из 53 видов гельминтов с морскими жизненными циклами в качестве единственного эндемика Баренцева моря можно выделить цестоду *Tetrabothrius morschtini* (Mugav'eva, 1968). 52 вида гельминтов зарегистрировано в Северной Атлантике, 48 – в Северной Пацифике (Kuklin, 2022). Встречаемость изученных паразитов в других регионах была не столь массовой (в Южной Атлантике и Австрало-Новозеландской области отмечено по 6 видов, в восточном секторе российской Арктики и Антарктике – по 5, в Южной Пацифике – 4, в бассейне Индийского океана – 3).

Амфибореальное распространение большинства паразитов, по всей видимости, – следствие существования единого трансарктического ареала многих промежуточных и окончательных хозяев гельминтов в плиоцене после открытия Берингова пролива, а также схожих абиотических условий в Северной Атлантике и Северной Пацифике в указанный период. В дальнейшем в связи с развитием в Арктическом бассейне ледников, восстановлением Берингийского моста суши и океанических трансгрессий атлантические и тихоокеанские популяции паразитов и хозяев оказались разделены, хотя поток генов между ними мог возобновляться в межледниковые периоды плейстоцена. Поэтому географическая изоляция не вызвала заметной диверсификации у большинства гельминтов. Ускоренное видообразование в Северной Атлантике происходило только у отдельных видов трематод (микрофаллид группы «*pygmaeus*»), для которых были характерны узкая специфичность к промежуточным хозяевам и короткие сроки жизни половозрелых стадий в окончательных хозяевах.

Биполярное распространение некоторых видов гельминтов может быть обусловлено и эволюционно-историческими, и экологическими причинами. Паразиты, специфичные для чаек, вероятно, были перенесены южнее экватора из Голарктики предковой формой доминиканской чайки, которая имеет североатлантическое происхождение, но в плейстоцене переселилась в Южное полушарие. В настоящее время аналогичные процессы могут иметь место в случаях дальних перелетов некоторых птиц (куликов, крачек) после гнездового периода в районы зимовки. Результаты исследования показали, что при наличии в новых регионах подходящих промежуточных хозяев гельминты могут впоследствии перейти к паразитированию уже у представителей аборигенной авифауны, использующих те же кормовые объекты, что и перелетные птицы.

Нельзя исключать, что некоторые виды гельминтов переселились вместе с окончательными хозяевами в обратном направлении – из приантарктических районов в Голарктику (например, нематоды родов *Seurattia* и *Stegophorus* с глупышами после дивергенции северного и южного видов в плиоцене).

Из общего числа изученных паразитов в Южном полушарии не отмечены виды, завершающие свое развитие в морских утках, а в бассейне Индийского океана – те формы, в циркуляции которых принимают участие ракообразные семейства Gammaridae. Очевидно, отсутствие окончательных (в первом случае) и промежуточных (во втором случае) хозяев служит непреодолимым барьером для распространения гельминтов со сложными жизненными циклами.

Гельминтофауна серебристых чаек *Larus argentatus* (Pontoppidan, 1763) Кольского залива. Изучены сезонно-возрастные изменения гельминтофауны серебристых чаек *Larus argentatus* (нелетающих птенцов, слетков и взрослых птиц) Кольского залива (Kuklin, Kuklina, 2021). Для оценки степени зараженности птиц использовали такие количественные показатели как экстенсивность инвазии (ЭИ) и индекс обилия (ИО). Экстенсивность инвазии определяли как отношение числа птиц, зараженных паразитом данного вида, к общему числу птиц в выборке, индекс обилия – отношение общего числа экземпляров каждого вида гельминтов к общему числу обследованных особей птиц. У серебристых чаек в районе исследований обнаружено 27 видов гельминтов (11 – трематод, 10 – цестод, 5 – нематод, 1 – скребней). У нелетающих птенцов в июне зарегистрировано 15 видов паразитических червей, у слетков в сентябре – 22 вида, у взрослых птиц в июне – 20 видов и в сентябре – 13 видов. Данные по видовому составу гельминтофауны и значения количественных параметров инвазии чаек представлены в табл. 1.

Изучение сезонно-возрастной динамики гельминтофауны морских птиц, гнездящихся вблизи урбанизированных территорий, позволило выявить ряд интересных аспектов. Птенцы серебристых чаек в гнездовых колониях островов Кольского залива в течение не менее 50 сут. с момента вылупления в плане питания полностью зависимы от родителей. Следствием этого можно считать тот факт, что птенцы и взрослые чайки имеют 11 общих видов паразитов. Однако в составе гельминтофауны взрослых птиц и нелетающих птенцов имеются и заметные качественные отличия. Для птенцов характерно практически полное отсутствие паразитов с пресноводными жизненными циклами, а также низкая зараженность гельминтами, циркулирующими в прибрежных морских экосистемах и использующих в качестве промежуточных хозяев относительно крупных беспозвоночных с твердыми наружными покровами. Вместе с тем у птенцов отмечена инвазия некоторыми паразитами, которые не встречаются у взрослых чаек, но являются обычными компонентами гельминтофауны других птиц (гаг и куликов). Основные причины обнаруженных различий – раздельный сбор кормов взрослыми чайками для себя и для птенцов и, возможно, слабое развитие иммунной системы молодых птиц.

Переход слетков к самостоятельному питанию приводит к тому, что видовой состав их гельминтофауны становится практически идентичным таковому у взрослых чаек (17 общих видов в июньской выборке и 13 – в сентябрьской выборке). При этом они не успевают полностью освободиться от инвазии некоторыми «детскими» гельминтами. Поэтому для слетков характерно наибольшее разнообразие паразитов. У молодых птиц по сравнению со взрослыми отмечены высокие значения количественных параметров инвазии гельминтами, использующими в качестве промежуточных хозяев малоподвижных беспозвоночных (мидий), и низкие показатели заражения паразитами, у которых эту роль играют мобильные организмы (ракообразные). Очевидно, эффективность сбора слетками разных кормовых объектов имеет заметные отличия. Вместе с тем к моменту подъема молодых птиц на крыло сезонная доступность некоторых пищевых объектов (в частности, морских полихет) уменьшается.

Возможно, что опосредованное влияние на инвазию чаек разных возрастных групп оказывает и использование птицами пищевых отходов. Такая кормовая стратегия, с одной стороны, исключает возможность заражения птенцов многими гельминтами, с другой – вызывает нарушения в физиологии молодых птиц и ослабляет их устойчивость к неспецифичным паразитам.

Таблица 1

Состав гельминтофауны и показатели заражения серебристых чаек Кольского залива

Table 1

Composition of the helminth fauna and rates of infestation in herring gulls from Kola Bay

Таксон	Июнь				Сентябрь			
	Нелетающие птенцы (n = 26)		Взрослые птицы (n = 22)		Слетки (n = 20)		Взрослые птицы (n = 9)	
	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.
Trematoda								
<i>Cryptocotyle lingua</i> (Lühe, 1899)	61.54	6.19	59.09	6.41	75.00	21.50	77.78	16.67
<i>Cryptocotyle concave</i> (Creplin, 1825)	–	–	–	–	5.00	31.65	–	–
<i>Himasthla larina</i> (Ishkulov, Kuklin, 1998)	23.08	98.47	31.82	21.09	85.00	193.45	77.78	476.78
<i>Gymnophallus deliciosus</i> (Olsson, 1893)	3.85	0.08	36.36	6.82	45.00	17.05	88.89	20.22
<i>Microphallus piriformes</i> (Odhner, 1905)	7.69	20.35	31.82	170.09	65.00	2335.60	66.67	1136.90
Galaktionov, 1983								
<i>Microphallus pygmaeus</i> (Levinsen, 1881)	3.85	0.58	–	–	–	–	–	–
Odhner, 1905								
<i>Microphallus similis</i> (Jaegerskioeld, 1900)	–	–	13.64	0.77	15.00	30.70	11.11	39.00
<i>Maritrema arenaria</i> (Hadley, Castle, 1940)	–	–	9.09	0.45	20.00	0.55	11.11	0.78
<i>Plagiorchis laricola</i> (Skrjabin, 1924)	–	–	13.64	3.27	5.00	0.10	–	–
<i>Diplostomum indistinctum</i> (Guberlet, 1923)	–	–	13.64	0.73	15.00	0.25	–	–
<i>Notocotylus</i> sp.	–	–	–	–	10.00	0.25	–	–
Cestoda								
<i>Alcataenia dominicana</i> (Railiet, Henry, 1912)	–	–	63.64	32.45	20.00	11.95	55.56	11.67
<i>Alcataenia larina</i> (Krabbe, 1869)	50.00	12.38	13.64	2.32	15.00	1.95	–	–
<i>Arctotaenia tetrabothrioides</i> (Loennberg, 1890)	19.23	15.35	–	–	5.00	0.05	–	–
<i>Anomotaenia micracantha micracantha</i> (Krabbe, 1869)	–	–	4.55	0.05	–	–	–	–
<i>Paricterotaenia porosa</i> (Rudolphi, 1810)	–	–	9.09	0.32	–	–	–	–
<i>Microsomacanthus ductilis</i> (Linton, 1927)	26.92	149.23	59.09	53.50	15.00	1.35	11.11	0.44
<i>Wardium cirrosa</i> (Krabbe, 1869)	30.77	7.69	50.00	99.55	15.00	25.65	11.11	0.11
<i>Wardium fryei</i> (Mayhew, 1925)	11.54	0.58	45.45	10.32	25.00	63.95	22.22	138.89
<i>Tetrabothrius erostris</i> (Loennberg, 1889)	38.46	3.15	63.64	4.73	40.00	3.45	66.67	11.11
<i>Tetrabothrius cylindraceus</i> (Rudolphi, 1819)	–	–	9.09	0.23	15.00	7.50	22.22	24.67
Nematoda								
<i>Anisakis</i> sp. 1	–	–	4.55	0.05	–	–	–	–
<i>Paracuaria adunca</i> (Creplin, 1846)	30.77	1.92	50.00	3.23	70.00	8.20	66.67	5.44
Anderson, Wong, 1981								
<i>Cosmocephalus obvelatus</i> (Creplin, 1825)	–	–	–	–	5.00	0.05	–	–
<i>Stegophorus stellaepolaris</i> (Parona, 1901)	19.23	1.38	4.55	0.09	15.00	0.50	–	–
<i>Streptocara crassicauda</i> (Creplin, 1829)	3.85	0.08	–	–	–	–	–	–
Acanthocephala								
<i>Polymorphus phippii</i> (Kostylew, 1922)	15.38	0.42	–	–	5.00	0.05	–	–

Основные тенденции гельминтофауны и физиологическое состояние моевок (на примере гнездовой колонии на п-ове Рыбачий) на фоне климатических изменений с 2006 по 2020 гг. Установлено, что состав гельминтофауны, соотношение доминирующих видов паразитов и значения большинства количественных показателей инвазии моевок в гнездовой колонии на п-ове Рыбачий в 2006–2008 и 2018–2020 гг. не претерпели заметных изменений (Kuklin, Kuklina, 2022). В 2006–2008 годах у моевок на Городецких базарах обнаружено 11 видов гельминтов (4 – трематод, 3 – цестод, 4 – нематод) (табл. 2). Наивысшие значения ЭИ и ИО были характерны для цестод *A. larina* и *T. erostris*, а также для нематод *P. adunca*. Находки 5 видов паразитических червей были

одноразовыми. В 2018–2020 годах у птиц в этом районе также зарегистрировано 11 видов паразитов (3 – трематод, 3 – цестод, 5 – нематод). При этом самые высокие количественные показатели заражения отмечены для тех же видов, что и в 2006–2008 гг. Единичными были находки 6 видов. В то же время в 2018–2020 гг. зафиксировано заметное уменьшение индекса обилия массовых видов цестод (*A. larina* и *T. erostris*) по сравнению с показателями в 2006–2008 гг.

Таблица 2

Гельминтофауна моевок в колониях п-ова Рыбачий (Западный Мурман) в 2006–2008 и 2018–2020 гг.

Table 2

**The helminth fauna of kittiwakes in the colonies of the Rybachy Peninsula (Western Murman)
in 2006–2008 and 2018–2020**

Таксон	2006–2008 гг. (n = 29)		2018–2020 гг. (n = 30)	
	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.
Trematoda				
<i>Cryptocotyle lingua</i>	10.34	0.41	3.33	0.03
<i>Cryptocotyle concava</i>	3.45	0.03	3.33	0.03
<i>Diplostomum nordmanni</i>	3.45	0.03	–	–
<i>Diplostomum</i> sp.	–	–	3.33	0.03
<i>Mesorchis pseudoechinatus</i>	3.45	0.07	–	–
Cestoda				
<i>Alcataenia larina</i>	44.83	11.83	60.00	1.77
<i>Anomotaenia micracantha micracantha</i>	–	–	3.33	0.07
<i>Tetrabothrius erostris</i>	31.03	3.62	33.33	0.73
<i>Tetrabothrius cylindraceus</i>	3.45	0.55	–	–
Nematoda				
<i>Anisakis</i> sp.	10.34	0.17	3.33	0.03
<i>Paracuaria adunca</i>	44.83	1.83	33.33	0.80
<i>Stegophorus stellaepolaris</i>	6.90	0.93	13.33	0.23
<i>Contracaecum</i> sp.	3.45	0.03	13.33	0.13
<i>Capillaria contorta</i>	–	–	3.33	0.03

Одновременно с изучением гельминтофауны нами у моевок была взята кровь для анализа. У моевок лимфоциты и гетерофилы были доминирующими типами лейкоцитов (табл. 3). Сравнительный анализ показал наличие достоверных отличий в содержании гетерофилов, эозинофилов и моноцитов в крови моевок в разные периоды исследований. Установлено, что содержание гетерофилов и моноцитов увеличивалось, а содержание эозинофилов снижалось у моевок в 2018–2020 гг. по сравнению с аналогичными показателями птиц в 2006–2008 гг. В то же время отношение гетерофилов к лимфоцитам (Г/Л) у моевок в 2018–2020 гг. превышало таковое у птиц в 2006–2008 гг.

Результаты изучения паразитофауны и физиологии моевок в гнездовой колонии на п-ове Рыбачий не выявили устойчивых и однозначных взаимосвязей между инвазией и физиологическим состоянием клеток крови птиц, многолетним снижением их численности и климатическими изменениями в районе проведения исследований. С одной стороны, повышение содержания гетерофилов и уменьшение количества эозинофилов у моевок в 2018–2020 гг. по сравнению с 2006–2008 гг. на фоне повышения температуры воды и воздуха в течение указанного периода могут свидетельствовать об ухудшении общего состояния гнездовой популяции птиц под влиянием потепления. С другой стороны, не обнаружено признаков усиления паразитарного пресса на моевок – видовой состав гельминтофауны и значения количественных показателей инвазии не претерпели заметных изменений. Вместе с тем снижение ИО массовых видов цестод (*A. larina* и *T. erostris*) можно считать косвенным подтверждением изменения размерной структуры популяций промежуточных хозяев паразитов – пелагических ракообразных – в сторону доминирования более мелких форм. Изменение климата в сторону потепления в высоких широтах часто стимулирует подобные последствия в зоопланктонных сообществах. Соответственно, климатические флуктуации

могли вызвать определенные изменения устойчивости паразито-хозяйинных связей, но при этом не нарушили структуру паразитарных систем. Нелинейные реакции на изменения климата и кормовых условий в целом характерны для морских птиц Арктики (Arctic ..., 2015) и обусловлены локальным воздействием определенной группы факторов в конкретном регионе. Поэтому для получения более полной мозаики фундаментальных последствий изменений климата необходимо учитывать особенности биологии птиц и абиотических условий в разных гнездовых районах.

Таблица 3

**Лейкоцитарная формула крови и соотношение Г/Л миевки в колониях
п-ова Рыбачий (Западный Мурман) в 2006–2008 и 2018–2020 гг., %**

Table 3

**The leucocyte formula of blood and profiles and H/L ratio of kittiwakes in the colonies
of the Rybachy Peninsula (Western Murman) in 2006–2008 and 2018–2020, %**

Клеточные элементы	2006–2008 гг. (n = 29)	2018–2020 гг. (n = 30)	F-тест
Лимфоциты	49.6 ± 1.6 27–64	45.7 ± 0.7 33–60	$F_{3,9} = 3.7, p = 0.06$
Моноциты	0.4 ± 0.1 1–3	1.8 ± 0.24 1–7	$F_{3,9} = 15.3, p < 0.001$
Базофилы	0.36 ± 0.1 1–3	1.25 ± 0.2 1–6	$F_{3,9} = 3.4, p < 0.01$
Эозинофилы	20.4 ± 1.6 14–42	15.2 ± 0.9 6–34	$F_{3,9} = 8.8, p < 0.01$
Гетерофилы	29.3 ± 1.2 14–42	36.1 ± 0.8 17–47	$F_{3,9} = 14.2, p < 0.001$
Г/Л	0.63 ± 0.04 0.26–1.3	0.76 ± 0.02 0.3–1.3	$F_{3,9} = 7.5, p < 0.01$

ПРИМЕЧАНИЕ. Числитель – среднее значение $\pm$ ошибка среднего, знаменатель – минимальное и максимальное значения.

Видовой состав и оценка современного состояния гельминтофауны миевок *Rissa tridactyla* в северной части Карского моря. Нами изучен видовой состав гельминтофауны миевок (10 взрослых птиц и 10 птенцов) в северной части Карского моря (архипелаг Северная Земля и о. Визе) (Kuklin et al., 2023). Обнаружено 8 видов паразитических червей (1 вид трематод, 4 – цестод и 3 – нематод). Состав гельминтофауны птиц и значения количественных параметров инвазии представлены в табл. 4. Отмечено наличие 5 общих видов в гельминтофауне миевок Карского моря и северной части Новой Земли: цестоды *A. larina*, *A. micracantha micracantha*, *T. erostris* и *T. morschtini*, а также нематоды *S. stellaepolaris* (Kuklin et al., 2020). Впервые у морских птиц в высоких широтах Арктики зарегистрированы гельминты с пресноводными жизненными циклами (трематоды рода *Diplostomum* и нематоды *P. adunca*). Установлены различия в зараженности птиц разного возраста цестодами семейств Dilepididae (преобладают у половозрелых особей) и Tetrabothriidae (доминируют у птенцов). Установлено, что у взрослых птиц доминируют гельминты, у которых роль промежуточных хозяев играют планктонные ракообразные, а у птенцов – паразиты, в циркуляции которых участвуют рыбы. В качестве причин выявленных особенностей заражения птиц выделены кормовые предпочтения, распределение очагов инвазии и влияние абиотических факторов.

На формирование гельминтофауны миевок в северной части Карского моря оказывает влияние целый комплекс экологических факторов. С одной стороны, благодаря воздействию притока атлантических вод, в указанном районе в течение гнездового периода птиц кормовые условия и пищевой спектр (пелагические рыбы и ракообразные) во многом схожи с теми, которые характерны для северо-восточного сектора Баренцева моря. Поэтому в составе паразитофауны миевок Северной Земли и о. Визе отмечены виды, найденные ранее у птиц, гнездящихся на севере Новой Земли. С другой стороны, флуктуации гидрологического режима в Карском море, влияющие на распространение распресненных вод речного стока, могут способствовать проникновению в районы гнездования

птиц промежуточных хозяев, инвазированных личинками гельминтов, которые циркулируют в пресноводных экосистемах. Это, в свою очередь, может приводить к заражению птиц паразитами, совершенно нетипичными для высокоширотной Арктики (в данном случае – трематодами рода *Diplostomum*). Кроме того, экстремальные параметры внешней среды влияют на общее физиологическое состояние и иммунный статус птиц. По этой причине моевки не всегда могут быстро освобождаться от инвазии гельминтами, которыми заразились на местах зимовки. Указанное обстоятельство – наиболее вероятная причина высоких значений ЭИ нематодами *P. adunca* у взрослых птиц в районе проведения исследований.

Таблица 4

**Гельминты москвок *Rissa tridactyla* в северной части Карского моря
(Северная Земля и о. Визе), 2019–2020 гг.**

Table 4

**Helminths of kittiwakes (*Rissa tridactyla*) in the northern part of the Kara Sea
(Severnaya Zemlya and Weise Island), 2019–2020**

Таксон	Взрослые птицы (<i>n</i> = 10)			Птенцы (<i>n</i> = 10)		
	ЭИ, %	ИИ, экз.	ИО, экз.	ЭИ, %	ИИ, экз.	ИО, экз.
Trematoda						
<i>Diplostomum</i> sp.	10.00	1	0.10	–	–	–
Cestoda						
<i>Alcataenia larina</i>	40.00	1–3	0.70	10.00	1	0.10
<i>Anomotaenia micracantha</i>	70.00	1–11	2.80	10.00	1	0.10
<i>Tetrabothrius erostris</i>	60.00	1–4	1.20	90.00	4–17	5.60
<i>Tetrabothrius morschtini</i>	–	–	–	20.00	3–11	1.40
Nematoda						
<i>Paracuarua adunca</i>	70.00	1–26	4.30	–	–	–
<i>Stegophorus stellaepolaris</i>	10.00	1	0.10	20.00	1	0.20
<i>Capillaria contorta</i>	10.00	1	0.10	–	–	–

**Паразитологические исследований беспозвоночных животных
как промежуточных хозяев гельминтов морских птиц**

По итогам анализа таксономической структуры гельминтофауны брюхоногих моллюсков и амфипод, а также показателей их инвазии установлены основные очаги заражения в различных районах Мурманского побережья Баренцева моря в мае–июле 2021 г. (рис. 1) (Плаксина, Куклина, 2022; Куклин, Куклина, 2024).



Рис. 1. Районы проведения паразитологической съемки литоральных брюхоногих моллюсков и ракообразных в прибрежье Мурман (май–июль 2021 г.):

1 – губа Печенга, 2 – Кольский залив, 3 – губа Териберская, 4 – губы Ярнышная и Зеленецкая, 5 – губа Дворовая, 6 – губа Дроздовка, 7 – губа Ивановская

Fig. 1. The geographical location of the study areas of littoral gastropods and crustaceans on the Murmansk coast (May–July 2021):

1 – Pechenga Bay, 2 – Kola Bay, 3 – Teriberskaya Bay, 4 – Yarnyshnaya and Zelenetskaya bays, 5 – Dvorovaya Bay, 6 – Drozdovka Bay, 7 – Ivanovskaya Bay

У четырех видов литоральных моллюсков [*Littorina saxatilis* (Olivi, 1792), *L. obtusata* (L., 1758), *L. littorea* (L., 1758), *Nucella lapillus* (L., 1758)] Мурманского побережья обнаружены представители 10 таксонов трематод (табл. 5). Повсеместно

в прибрежье Мурмана встречаются личинки и партениты трематод *M. pygmaeus*, *M. piriformes* и *P. atomon*. Наибольшее видовое разнообразие гельминтов отмечено в Кольском заливе и губе Ивановская, наименьшее – в губе Дворовая. В большинстве районов Мурманского побережья условия для циркуляции отмеченных гельминтов в целом достаточно однородны. Выраженных трендов в распределении очагов заражения не отмечено.

Таблица 5

**Гельминтофауна литоральных моллюсков
на побережье Кольского полуострова (май–июль 2021 г.), %**

Table 5

Helminth fauna of the intertidal snails on the Kola Peninsula (May–July 2021), %

Вид паразита	<i>Littorina saxatilis</i>	<i>Littorina obtusata</i>	<i>Littorina littorea</i>	<i>Nucella lapillus</i>
<i>Microphallus pygmaeus</i> (Levinsen, 1881)	24.73	12.90	4.35	–
<i>Microphallus piriformes</i> (Odhner, 1905)	9.08	6.79	–	–
<i>Microphallus pseudopygmaeus</i> (Galaktionov, 2009)	0.69	0.23	–	–
<i>Himasthla</i> sp.	0.59	–	–	–
<i>Cryptocotyle lingua</i> (Creplin, 1825)	0.40	–	1.28	–
<i>Renicola parvicaudatus</i> (Stunkard, Shaw, 1931)	0.22	0.23	–	7.07
<i>Parvatrema homoeotectum</i> (James, 1964)	0.81	0.23	–	–
<i>Paramonostomum chabaudi</i> (Van Strydonck, 1965)	0.09	–	–	–
<i>Parapronocephalum symmetricum</i> (Belopolskaya, 1952)	0.03	–	–	–
<i>Podocotyle atomon</i> (Rudolphi, 1802) Odhner, 1905	2.77	0.46	0.26	–
Общая зараженность	40.03	21.04	6.14	7.07

Отмечены некоторые особенности распределения экстенсивности инвазии трематодами *M. pygmaeus* и *P. atomon* для моллюсков *L. saxatilis* в губах Печенга и Ивановская соответственно. Заслуживает внимания низкая зараженность этих литоральных гастропод в губе Печенга наиболее массовым видом трематод – микрофаллидами *M. pygmaeus* (табл. 6). С учетом того, что для *M. pygmaeus* характерен 2-хозяинный жизненный цикл (окончательные хозяева – морские утки рода *Somateria*), влияние абиотических факторов на циркуляцию указанных гельминтов очень ограничено, поскольку единственной стадией цикла, попадающей во внешнюю среду, являются яйца, покрытые плотными защитными оболочками (Галактионов, 1993). Вероятно, основной причиной незначительной инвазии моллюсков можно считать невысокую численность окончательных хозяев в указанном районе в период проведения исследований. В губе Печенга созданы неблагоприятные условия для пребывания и гнездования гаг (значительное распреснение и недостаток пищевых ресурсов; небольшое количество пологих участков на побережье, пригодных для строительства гнезд; высокий уровень антропогенного пресса благодаря наличию и интенсивному функционированию объектов марикультуры). Поэтому численность уток в губе Печенга летом обычно невелика (Иваненко, 2013). Соответственно, поток инвазионного начала в период активной циркуляции гельминтов (так называемого «окна трансмиссии») незначителен, что и нашло отражение в показателях зараженности моллюсков.

В качестве другой отличительной особенности инвазии моллюсков на Мурманском побережье следует указать относительно высокую зараженность гастропод *L. saxatilis* в губе Ивановская трематодами с 3-хозяинными жизненными циклами (прежде всего за счет экстенсивности инвазии видом *P. atomon*) (табл. 6). Возможно, это связано с тем, что указанная губа относится к водоемам «ковшового» типа, у которых затруднен активный водообмен с внешней морской акваторией. При этом гидрологическая изоляция нарастает от устья к кутовой части, что способствует стабильности состояния литорально-сублиторальных экосистем в вершине губы (Бобков и др., 2010) и, соответственно, облегчает контакты между первыми и вторыми промежуточными хозяевами. Вместе с тем, высокая зараженность литорин в губе Ивановская трематодами *P. atomon* может быть

связана и с наличием здесь популяции реликтовой формы трески (Макеенко, 2016), которая играет роль окончательного хозяина этих гельминтов и обеспечивает стабильный поток инвазионного начала (яиц трематод). Вероятно, это обусловлено различной интенсивностью потоков инвазионного начала от окончательных хозяев.

Таблица 6

**Экстенсивность инвазии моллюсков *Littorina saxatilis*
личинками и паренитами трематод
в различных районах Мурманского побережья (май–июль 2021 г.), %**

Table 6

**Prevalence of digeneans in the periwinkle *Littorina saxatilis*
in various areas of the Murmansk coast (May–July 2021), %**

Вид паразита	Районы Мурманского побережья						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
<i>Microphallus pygmaeus</i>	2.40	28.57	9.54	64.87	25.15	29.31	14.74
<i>Microphallus piriformes</i>	23.56	16.29	2.70	3.59	0.58	4.48	8.24
<i>Microphallus pseudopygmaeus</i>	0.48	1.12	0.95	1.03	–	–	0.16
<i>Himasthla</i> sp.	–	0.56	0.64	1.28	–	0.69	0.48
<i>Cryptocotyle lingua</i>	–	1.12	–	–	–	–	0.48
<i>Renicola</i> sp. (церкария)	0.48	–	0.64	–	–	–	0.32
<i>Quadriramus</i> sp. (церкария)	–	0.22	–	0.77	–	3.45	1.74
<i>Notocotylus</i> sp. (церкария)	–	0.33	–	–	–	–	–
<i>Parapronocephalum symmetricum</i>	–	–	–	–	–	0.34	–
<i>Podocotyle atomon</i>	0.48	1.56	1.12	1.54	0.58	1.38	8.87

ПРИМЕЧАНИЕ. I – губа Печенга, II – Кольский залив, III – губа Териберская, IV – губы Ярнышная и Зеленецкая, V – губа Дворовая, VI – губа Дроздовка, VII – губа Ивановская.

Наряду с этим проведено паразитологическое обследование амфипод семейства Gammaridae [*Gammarus oceanicus* (Segerstråle, 1947) и *G. duebeni* (Lilljeborg, 1852)], обитающих на литорали губ Печенга, Териберская, Ярнышная и Ивановская (рис. 1). Установлено, что в состав гельминтофауны гаммарид входят личиночные стадии 6 видов гельминтов (табл. 7). Обнаружены и идентифицированы метацеркарии трематод *P. atomon* и *P. reflexa* (Creplin, 1825) Odhner, 1905, цистицеркоиды цестод *Microsomacantus* sp, личинки нематод сем. Spiruridae и акантеллы скребней *P. phippsi* и *E. gadi* (Müller, 1776). Окончательными хозяевами *P. atomon*, *P. reflexa* и *E. gadi* служат морские рыбы (Полянский, 1955; Успенская, 1963), а *Microsomacantus* sp. и *P. phippsi* завершают свое развитие в морских птицах – утках и чайках (Белопольская, 1952). Точную идентификацию нематод семейства Spiruridae провести не удалось, так как обнаруженные личинки представлены I и II стадиями.

В губе Печенга у гаммарид обнаружены исключительно гельминты, завершающие свое развитие в рыбах. В состав паразитофауны гаммарусов из районов губ Териберская, Ярнышная и Ивановская входят гельминты, которые используют в качестве окончательных хозяев как морских рыб, так и морских птиц (табл. 7). Максимальные значения параметров инвазии цистицеркоидами цестод *Microsomacantus* sp. зарегистрированы у гаммарусов обоих видов, обитающих на литорали губы Териберская. Наивысшие значения показателей инвазии акантеллами скребней *P. phippsi* отмечены у гаммарид обоих видов из района губы Ярнышная. Столь высокие показатели инвазии гаммарусов свидетельствуют об интенсивных трофических связях промежуточных (гаммарид) и окончательных хозяев (морских птиц) в вышеуказанных районах.

Таблица 7

Показатели зараженности гаммарусов *Gammarus oceanicus* и *Gammarus duebeni*, обитающих на литорали Мурманского побережья Баренцева моря, май–июль 2021 г.

Table 7

Parameters of infection of gammarus *Gammarus oceanicus* and *Gammarus duebeni* living on the littoral of the Murmansk coast of the Barents Sea, May–July 2021

Вид паразита	Губа Печенга			Губа Териберская			Губа Ярнышная			Губа Ивановская		
	ЭИ, %	ИИ, экз.	ИО, экз.	ЭИ, %	ИИ, экз.	ИО, экз.	ЭИ, %	ИИ, экз.	ИО, экз.	ЭИ, %	ИИ, экз.	ИО, экз.
<i>Gammarus oceanicus</i>												
<i>Podocotyle atomon</i>	60.1	1–23	2.9	42.7	1–16	1.1	60.0	1–12	1.8	63.2	1–27	2.3
<i>Podocotyle reflexa</i>	–	–	–	0.46	1	0.005	–	–	–	–	–	–
<i>Microsomacantus</i> sp.	–	–	–	15.1	2–248	9.4	8.0	6–186	6.2	0.8	38	0.32
<i>Spirurida</i> sp.	–	–	–	13.3	1–7	0.25	13.0	1–2	0.16	41.0	1–5	0.7
<i>Polymorphus phippsi</i>	–	–	–	1.4	1	0.014	4.0	1	0.04	–	–	–
<i>Echinorhynchus gadi</i>	3.5	1	0.03	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Gammarus duebeni</i>												
<i>Podocotyle atomon</i>	38.6	1–16	1.7	17.0	1–7	0.47	62.5	1–9	1.4	39.1	1–8	0.8
<i>Podocotyle reflexa</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Microsomacantus</i> sp.	–	–	–	6.4	12–56	2.2	1.8	184	3.29	0.75	158	1.2
<i>Spirurida</i> sp.	–	–	–	–	–	–	14.3	1–2	0.2	37.6	1–11	0.7
<i>Polymorphus phippsi</i>	–	–	–	–	–	–	1.8	1	0.028	–	–	–

Биохимические аспекты влияния гельминтов на птиц

Исследованы аспекты локализации, физиологии пищеварения и взаимоотношений с окончательными хозяевами скребней *P. phippsi* Kostylew, 1922 из кишечника морских птиц (обыкновенной гаги, гаги-гребенушки и серебристой чайки), обследованных в различных районах Баренцева моря (Kuklina, Kuklin, 2021).

Установлено, что скребни *P. phippsi* паразитируют в дистальном отделе кишечника у исследованных видов птиц. Высокие показатели интенсивности инвазии *P. phippsi* зарегистрированы для обоих видов гаг, в которых гельминты достигают половозрелого состояния. В кишечнике птенцов серебристой чайки обнаружены лишь неполовозрелые особи *P. phippsi* в небольшом количестве (1–4 экз.). Независимо от стадии зрелости и систематического статуса хозяина на поверхности тегумента скребней протекают процессы мембранного пищеварения с участием протеаз и гликозидаз. При инвазии скребнями в слизистой кишечника у всех видов птиц повышается активность протеаз, активируются процессы полостного и мембранного пищеварения с участием протеаз и гликозидаз.

Влияние инвазии скребнями на активность протеаз и гликозидаз в дистальном отделе тонкого кишечника морских птиц заслуживает отдельного рассмотрения. Известно, что хоботок скребней *P. phippsi* вооружен 14–18 рядами кутикулярных крючьев (по 5–7 крючьев в ряду), длина острия которых составляет 0.046–0.071 мм (Хохлова, 1986). При этом хоботок половозрелых особей внедряется в кишечник птиц вплоть до серозной оболочки (Taraschewski, 2000; Г. И. Атрашкевич, личное сообщение). Биохимический анализ показал, что в местах прикрепления скребней в слизистой кишечника у всех исследованных видов птиц (обыкновенной гаги, гаги-гребенушки и серебристой чайки) повышалась активность протеаз (рис. 2). Механическое повреждение мембран энтероцитов крючьями скребней способствует выходу внутриклеточных ферментов, что, видимо, в итоге и приводит к повышению значений активности протеаз в слизистой кишечника птиц. Аналогичные изменения активности пищеварительных ферментов ранее отмечены у позвоночных животных (рыб

и птиц), в кишечнике которых паразитировали ленточные черви, обладающие прикрепительным аппаратом заякоривающего типа (Извекова, Куклина, 2014). Динамика активности гликозидаз была более сложной – в слизистой оболочке тонкого кишечника гаг-гребенушек этот показатель увеличивался, у серебристых чаек снижался, у обыкновенных гаг не претерпевал статистически достоверных изменений (рис. 2). Возможно, это связано со степенью «притертости» взаимоотношений в системе паразит–хозяин, соотношением количества молодых и половозрелых скребней в каждой особи птиц и временем, прошедшем с момента заражения до начала проведения исследований.

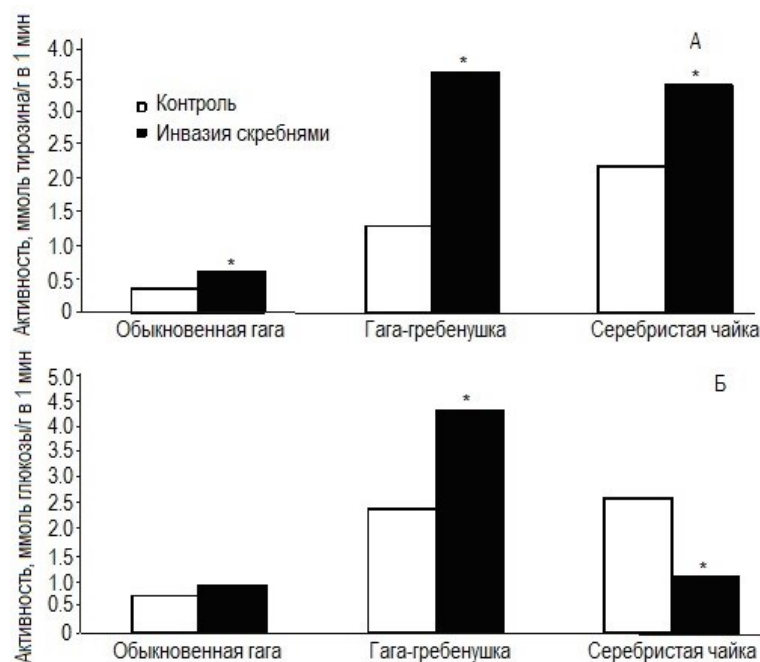


Рис 2. Активность протеаз (А) и гликозидаз (Б) в тонком кишечнике морских птиц ($p < 0.05$)
Fig. 2. The activity of proteases (A) and glycosidases (B) in the small intestine of seabirds ($p < 0.05$)

Паразитические черви, активно конкурируя с хозяевами-птицами за пищевые ресурсы и энергию, на сложных этапах годового цикла окончательных хозяев (миграции, насиживание яиц и вскармливание птенцов, зимовка в суровых условиях и т. д.) потенциально могут вызывать голодание, снижение пищевого статуса и даже гибель птиц. Благодаря наличию мощного прикрепительного аппарата, особую опасность для здоровья и жизни своих хозяев представляют скребни. Особенности инвазии и последствия паразитирования скребней *P. phippsi* определяются рационом питания хозяина, степенью физиологической «притертости» взаимоотношений в системе паразит–хозяин, а также пищеварительной активностью ферментов в кишечнике окончательных хозяев.

Нами также изучены особенности паразитирования (локализация, активность ферментов белкового и углеводного обмена на поверхности тела гельминтов, степень влияния на пищеварение хозяев) в кишечнике обыкновенной гаги цестод *Lateriporus teres* (Krabbe, 1869) Fuhrmann, 1907 и скребней *P. phippsi* при совместной инвазии, проведена оценка общей пищеварительной активности в желудочно-кишечном тракте зараженных птиц (Куклина, Куклин, 2021). Установлено, что активность гликозидаз в теле скребней в 6 раз превышала активность гликозидаз в стробиле цестод. В участках кишечника, где были локализованы цестоды *L. teres*, отмечено понижение активности протеаз и гликозидаз. В отделах, где паразитировали скребни *P. phippsi*, в слизистой кишечника повышалась активность протеаз.

При совместном паразитировании цестоды *L. teres* и скребни *P. phippsi* занимают определенные ниши: *L. teres* локализуются в проксимальном отделе кишечника, а *P. phippsi* – в дистальном.

Распределение цестод и скребней вдоль кишечника, по-видимому, связано с их различными пищевыми потребностями, пищеварительной активностью при гидролизе и поглощении углеводов, а также может определяться активностью пищеварительных ферментов хозяина. Несмотря на то, что *L. teres* и *P. phippsi* оказывают разное влияние на пищеварительную активность в различных отделах кишечника обыкновенных гаг, суммарная активность гликозидаз и протеаз у зараженных особей ниже контрольных значений. Снижение пищеварительной активности при инвазии гельминтами может иметь негативные последствия для физиологического состояния обыкновенных гаг.

Нами также рассмотрены особенности локализации цестоды *Tetrabothrius minor* (Lönnberg, 1893) Fuhrmann, 1899 в тонком кишечнике атлантического глупыша *Fulmarus glacialis* и цестод *Arctotaenia tetrabothrioides* (Loennberg, 1890), *Tetrabothrius erostris* (Loennberg, 1889), *Alcataenia larina* (Krabbe, 1869), *Microsomacanthus ductilus* (Linton, 1927) и *Wardium cirrosa* (Krabbe, 1869) в тонком кишечнике серебристой чайки *Larus argentatus* (Pontoppidan, 1763) (Kuklina, Kuklin, 2023; Куклина, Куклин, 2024). Следует отметить, что у атлантического глупыша зафиксирована моноинвазия цестодами *T. minor*, в то время как у серебристых чаек отмечены случаи совместного паразитирования вышеуказанными видами цестод.

Установлено, что в проксимальном фрагменте тонкого кишечника атлантического глупыша паразитировали неполовозрелые особи *T. minor* (табл. 8). В медиальном фрагменте обнаружены главным образом половозрелые цестоды *T. minor*, в их стробилах были членики со зрелыми яйцами. Цестоды *A. tetrabothrioides*, *T. erostris*, *A. larina* имели максимальную среднюю интенсивность инвазии в медиальных фрагментах тонкого кишечника птенцов серебристой чайки. В проксимальном фрагменте тонкого кишечника чаек в наибольшем количестве обнаружены *M. ductilus*, в дистальном фрагменте – *W. cirrosa*.

Таблица 8

Средняя интенсивность инвазии цестод в тонком кишечнике атлантического глупыша и птенцов серебристой чайки, экз.

Table 8

Mean intensity of cestodes in the small intestine of the northern fulmars and herring gull chicks, ind.

Вид цестод	Фрагменты тонкого кишечника		
	проксимальный	медиальный	дистальный
Атлантический глупыш			
<i>Tetrabothrius minor</i>	325.8±62.4	40.3±13.4	5.9±4.2
Серебристая чайка			
<i>Arctotaenia tetrabothrioides</i>	0.2±0.02	95.4±50.7	14.2±9.0
<i>Tetrabothrius erostris</i>	1.4±0.7	7.8±3.4	1.3±0.8
<i>Alcataenia larina</i>	3.2±1.8	16.1±6.4	3.1±1.4
<i>Microsomacanthus ductilus</i>	176.2±25.3	2.8±1.6	1.9±1.4
<i>Wardium cirrosa</i>	0.4±0.03	0.7±0.3	9.9±4.6

ПРИМЕЧАНИЕ. Приведена стандартная ошибка.

Установлено, что в местах локализации *T. minor* в тонком кишечнике атлантического глупыша протеолитическая активность снижена за счет уменьшения активности сериновых протеаз и металлопротеаз (Kuklina, Kuklin, 2023). В местах максимального скопления ленточных червей *M. ductilus*, *A. tetrabothrioides*, *T. erostris*, *A. larina* и *W. cirrosa* в тонком кишечнике птенцов серебристой чайки отмечено также достоверное уменьшение активности сериновых протеаз и повышение активности цистеиновых протеаз при инвазии цестодами *M. ductilus*, *A. larina* и *W. cirrosa* (Куклина, Куклин, 2024).

Экспериментальные исследования показали, что гомогенаты цестод *A. tetrabothrioides*, *T. erostris*, *A. larina* и *W. cirrosa* ингибировали активность коммерческого трипсина (Куклина, Куклин, 2024). Отмечена способность гомогенатов *T. minor* ингибировать активность протеаз из слизистой

оболочки кишечника глупыша и активность коммерческого трипсина разной концентрации (Kuklina, Kuklin, 2023). Более того, установлено, что все исследованные цестоды из тонкого кишечника серебристой чайки способны адсорбировать на поверхности тегумента протеолитические ферменты. Во всех фракциях, смытых с поверхности червей, определена активность протеаз. Следует отметить, что активность сериновых протеаз во всех десорбированных фракциях превышала активность металлопротеаз.

Снижение активности сериновых протеаз в тонком кишечнике атлантического глупыша и птенцов серебристой чайки отмечено в местах массовой локализации. Указанная тенденция (снижение сериновых протеаз в слизи хозяина при инвазии цестодами с максимальными значениями средней интенсивности инвазии) не зависела от морфометрических параметров червей и строения его прикрепительного аппарата. Аналогичные результаты зарегистрированы при заражении синца цестодами *Proteocephalus torulosus* (Batsch, 1786) (Фролова, Извекова, 2018), и, как предположили авторы, снижение активности сериновых протеаз связано с адсорбцией сериновых протеаз хозяина на поверхности тегумента цестод. Установлено, что цестоды *M. ductilus*, *A. tetrabothrioides*, *T. erostris*, *A. larina* и *W. cirrosa* адсорбировали на своей поверхности протеазы, большую часть из которых представляли сериновые протеазы. Известно, что на протяжении всей своей жизни паразиты, в том числе и цестоды, используют ресурсы, производимые хозяином (Dalton et al., 2004). Ленточные черви, лишённые пищеварительной системы, в тонком кишечнике позвоночных животных абсорбируют нутриенты (аминокислоты, моносахариды и др.) и адсорбируют на поверхности тегумента пищеварительные ферменты хозяина (Dalton et al., 2004; Izvekova et al., 2017).

Уменьшение активности сериновых протеаз в тонком кишечнике хозяина может быть вызвано ингибированием цестодами их активности. Экспериментальные исследования показали, что *T. minor*, *M. ductilus*, *A. tetrabothrioides*, *T. erostris*, *A. larina* и *W. cirrosa* способны инактивировать коммерческий трипсин, а гомогенат *T. minor* ингибирует активность протеаз из слизистой оболочки кишечника глупыша. Аналогичные результаты получены при изучении влияния цестод *E. rugosum*, *C. laticeps* и *T. nodulosus* из кишечника налима, леща и щуки соответственно на активность протеаз (Activity ..., 2019). Более того, авторами установлено, что не только экстракты цестод, но и инкубационная среда, в которой содержались цестоды, блокировала активности протеаз хозяина и коммерческого трипсина (Frolova, Izvekova, 2023). Из гомогената *T. nodulosus* выделили и описали два новых белка типа Кунитца, которые потенциально могут выступать в роли ингибиторов сериновых протеаз хозяина (Isolation ..., 2019).

Также повышение активности цистеиновых протеаз зафиксировано в медиальном фрагменте тонкого кишечника при инвазии *M. ductilus* и *A. larina*, в дистальном фрагменте при инвазии *W. cirrosa* и *A. larina*. Ранее установлено, что при инвазии цестодами *A. larina* моевки и *W. cirrosa* серебристой чайки в местах локализации общая протеолитическая активность также увеличивалась в слизи оболочки тонкого кишечника хозяина (Kuklina, Kuklin, 2011; Кукулина, Кукулин, 2017). Можно сделать предположение, что увеличение активности цистеиновых протеаз, в состав которых входят лизосомальные ферменты, происходит вследствие повреждения клеток эпителия крючьями прикрепительного аппарата вышеперечисленных цестод. Обнаруженное повышение активности цистеиновых протеаз согласуются с полученными данными при изучении инвазии щуки ленточными червями *T. nodulosus* (Izvekova, Solov'yev, 2016).

Работа выполнена по теме «Экология, физиология и паразитология птиц Арктического бассейна в условиях климатических и антропогенных трансформаций среды обитания (№ госрегистрации 124013000721-1) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Белопольская М. М. Паразитофауна морских водоплавающих птиц // Учен. зап. ЛГУ. 1952. Вып. 28, № 141. С. 127–180.
2. Бобков А. А., Стрелков П. П., Ильина А. Н. Приливная изменчивость океанологических условий сублиторали губы Ивановской // Вестн. СПбГУ. 2010. Сер. 7. Вып. 1. С. 86–99. URL: http://vestnik.unipress.ru/pdf10/s07/s07v1_10_S.pdf

3. Галактионов К. В. Жизненные циклы трематод как компоненты экосистем (опыт анализа на примере представителей семейства Microphallidae). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1993. 198 с.
4. Иваненко Н. Ю. Орнитофауна Западного Мурмана на примере губы Печенга и Айновых островов // Птицы северных и южных морей России: фауна, экология / Отв. ред. П. Р. Макаревич. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013. С. 64–102.
5. Извекова Г. И., Куклина М. М. Заражение цестодами и активность пищеварительных гидролаз позвоночных животных // Успехи совр. биол. 2014. Т. 134, № 3. С. 304–315.
6. Куклин В. В., Куклина М. М. Распределение очагов инвазии литоральных моллюсков партенитами и личинками трематод в губах и заливах Мурманского побережья в мае–июне 2021 г. // Тр. Кольского науч. центра РАН. Сер. Естественные и гуманитарные науки. 2024. Т. 3, № 3. С. 104–117. URL: <https://doi:10.37614/2949-1185.2024.3.3.010>
7. Куклина М. М., Куклин В. В. *Wardium cirrosa* (Cestoda: Aploparaksidae): локализация в кишечнике серебристой чайки и влияние на пищеварительную активность хозяина // Паразитология. 2017. Т. 51, № 3. С. 213–223.
8. Куклина М. М., Куклин В. В. Совместное паразитирование *Lateriporus teres* (Cestoda: Dilepididae) и *Polymorphus phippii* (Palaeacanthocephala: Polymorphidae) в тонком кишечнике обыкновенной гаги // Рос. паразитол. журн. 2021. Т. 15, № 1. С. 32–41. URL: <https://doi:10.31016/1998-8435-2021-15-1-32-41>
9. Куклина М. М., Куклин В. В. Влияние цестод, паразитирующих в тонком кишечнике птенцов серебристой чайки, на активность протеаз хозяина // Паразитология. 2024. Т. 58, № 4. С. 277–292. URL: <https://doi:10.31857/S0031184724040021>
10. Макеенко Г. А. Генетическая изменчивость атлантической трески (*Gadus morhua* L.) на северо-востоке ареала: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 22 с.
11. Пласина М. П., Куклина М. М. Гельминтофауна гаммарид *Gammarus oceanicus*, *Gammarus duebeni* Мурманского побережья Баренцева моря // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2022. Т. 4, № 13. Сер. Океанология. Вып. 10. С. 78–86. URL: <https://doi:10.37614/2307-5252.2022.4.10.008>
12. Полянский Ю. И. Материалы по паразитологии рыб северных морей СССР. Паразиты рыб Баренцева моря // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. 1955. Т. 19. С. 5–170.
13. Успенская А. В. Паразитофауна бентических ракообразных Баренцева моря. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 128 с.
14. Фролова Т. В., Извекова Г. И. Влияние заражения цестодой *Proteocephalus torulosus* Batsch, 1786 на активность ферментов в кишечнике синца (*Ballerus ballerus*) // Паразитология. 2018. Т. 52, № 4. С. 292–303. URL: <https://doi:10.7868/S0031184718040042>
15. Хохлова И. Г. Акантоцефалы наземных позвоночных фауны СССР. М.: Наука, 1986. 277 с.
16. Activity of proteolytic enzymes in the intestine of bream *Abramis brama* infected with cestodes *Caryophyllaeus laticeps* (Cestoda, Caryophyllidae) / T. V. Frolova, E. I. Izvekov, M. M. Solovyev, G. I. Izvekova // Comp. Biochem. Physiol., Part B. 2019. Vol. 235. P. 38–45. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2019.05.009>
17. Arctic warming: nonlinear impacts of sea-ice and glacier melt on seabird foraging / D. Gremillet, J. Fort, F. Amelineau, E. Zakharova, T. Le Bot, E. Sala, M. Gavrilo // Global Change Biol. 2015. Vol. 21, iss. 3. P. 1116–1123. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.12811>
18. Dalton J. P., Skelly P., Halton D. W. Role of the tegument and gut in nutrient uptake by parasitic platyhelminths // Can. J. Zool. 2004. Vol. 82. P. 211–232. URL: <https://doi.org/10.1139/z03-213>
19. Frolova T. V., Izvekova G. I. Metabolic adaptation of fish intestinal helminthes: inhibitory ability towards proteases in cestodes *Triaenophorus nodulosus* // J. Evol. Biochem. Physiol. 2023. Vol. 59, iss. 5. P. 370–377. URL: <https://doi.org/10.31857/S0044452923050042>
20. Hoberg E. P., Adams A. Phylogeny, history and biodiversity: understanding faunal structure and biogeography in the marine realm // Bull. Scand. Soc. Parasitol. 2000. Vol. 10, iss. 2. P. 19–37.
21. Isolation and partial structural characterization of new Kunitz-type trypsin inhibitors from the pike cestode *Triaenophorus nodulosus* / E. A. Rogozhin, M. M. Solovyev, T. V. Frolova, G. I. Izvekova // Mol. Biochem. Parasitol. 2019. Vol. 233. Article: 111217. URL: <https://doi.org/10.1016/j.molbiopara.2019.111217>

22. Izvekova G. I., Solovyev M. M. Characteristics of the effect of cestodes parasitizing the fish intestine on the activity of the host proteinases // Biol. Bull. 2016. Vol. 43, iss. 2. P. 146–151. URL: <https://doi.org/10.1134/S1062359016010076>
23. Izvekova G. I., Frolova T. V., Izvekov E. I. Adsorption and inactivation of proteolytic enzymes by *Triaenophorus nodulosus* (Cestoda) // Helmintologia. 2017. Vol. 54, iss. 1. P. 3–10. URL: <https://doi.org/10.1515/helm-2017-0001>
24. Kuklin V. V. Biogeographical aspects of helminths parasitizing Barents Sea birds: spatial distribution and host preferences // Biol. Bull. 2022. Vol. 49, № 9. P. 1570–1592. URL: <https://doi.org/10.1134/s1062359022090175>
25. Kuklin V. V., Kuklina M. M. Age dynamics of helminth fauna of the herring gull (*Larus argentatus*) in Kola Bay, Barents Sea // Biol. Bull. 2021. Vol. 48, № 8. P. 1160–1169. URL: <https://doi.org/10.1134/S1062359021080173>
26. Kuklin V. V., Kuklina M. M. Dynamics of helminth fauna of black-legged kittiwake in the Russian Arctic in the context of climate changes // J. Helminthology. 2022. Vol. 96. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1017/S0022149X22000219>
27. Kuklin V. V., Kuklina M. M., Ezhov A. V. Helminths of the black-legged kittiwake (*Rissa tridactyla* Linnaeus, 1758) and the brünnich's guillemot (*Uria lomvia* Linnaeus, 1758) in Russkaya Gavan Bay, Severny Island, Novaya Zemlya Archipelago // Rus. J. Mar. Biol. 2020. Vol. 46, № 6. P. 441–451. URL: <https://doi.org/10.1134/S1063074020060073>
28. Kuklin V. V., Kuklina M. M., Ezhov A. V. Helminth fauna of black-legged kittiwakes (*Rissa tridactyla*, Laridae, Charadriiformes) in the northern part of the Kara Sea // Biol. Bull. 2023. Vol. 50, № 9. P. 2147–2154. URL: <https://doi.org/10.1134/S1062359023090194>
29. Kuklina M. M., Kuklin V. V. Peculiarities of protein hydrolysis on the digestive transport surfaces of the intestine of the kittiwake *Rissa tridactyla* and *Alcataenia larina* (Cestoda, Dilepididae) parasitizing it // Biol. Bull. 2011. Vol. 38, iss. 5. P. 470–475. URL: <https://doi.org/10.1134/S1062359011050098>
30. Kuklina M. M., Kuklin V. V. The peculiarities of parasiting of *Polymorphus phippisi* (Palaeacanthocephala: Polymorphidae) in the intestines of seabirds from the Barents Sea // Biol. Bull. 2021. Vol. 48, № 6. P. 770–776. URL: <https://doi.org/10.1134/S1062359021060121>
31. Kuklina M. M., Kuklin V. V. Protease activity in the small intestine of the northern fulmar *Fulmarus glacialis* infested with *Tetrabothrius minor* (Cestoda, Tetrabothriidae) // J. Evol. Biochem. Physiol. 2023. Vol. 59, iss. 5. P. 1479–1487. URL: <https://doi.org/10.1134/S0022093023050022>
32. Taraschewski H. Host-parasite interactions in Acanthocephala, a morphological approach // Adv. Parasitol. 2000. Vol. 46. P. 1–179. URL: [https://doi.org/10.1016/s0065-308x\(00\)46008-2](https://doi.org/10.1016/s0065-308x(00)46008-2)

References

1. Belopol'skaya M. M. Parazitofauna morskikh vodoplavayushchikh ptits [Parasitofauna of marine waterfowl]. *Uchenye zapiski LGU* [Scientific notes of the Leningrad State University], 1952, Iss. 28, No. 141, pp. 127–180 (In Russ.).
2. Bobkov A. A., Strelkov P. P., Il'ina A. N. Prilivnaya izmenchivost' okeanologicheskikh usloviy sublitorali guby Ivanovskoy [Tidal variability of oceanological conditions of submarine landscapes on sublittoral of the Inlet Ivanovskaya]. *Vestnik SPbGU* [Bulletin of St. Petersburg State University], 2010, Series 7, No. 1, pp. 86–99 (In Russ.). Available at: http://vestnik.unipress.ru/pdf10/s07/s07v1_10_S.pdf
3. Galaktionov K. V. *Zhiznennye tsikly trematod kak komponenty ekosistem (opyt analiza na primere predstaviteley semeystva Microphallidae)* [Digenean life cycles as a components of ecosystems (an attempt of analysis by example of representatives of family Microphallidae)], Apatity, Publ. KSC RAS, 1993, 198 p. (In Russ.).
4. Ivanenko N. Yu. Ornitofauna Zapadnogo Murmana na primere guby Pechenga i Aynovykh ostrovov [Avifauna of West Murman by the example of Pechenga Bay and Islands of Ainov]. *Ptitsy severnykh i yuzhnykh morey Rossii: fauna, ekologiya* [Birds of northern and southern Russian seas: fauna, ecology], Apatity, Publ. KSC RAS, 2013, pp. 64–102 (In Russ.).

5. Izvekova G. I., Kuklina M. M. Zarazhenie tsestodami i aktivnost' pishchevaritel'nykh gidrolaz pozvonochnykh zhivotnykh [Infection with cestodes and activity of digestive hydrolases in vertebrates]. *Uspekhi sovremennoy biologii* [The successes of modern biology], 2014, Vol. 134, No. 3, pp. 304–315 (In Russ.).
6. Kuklin V. V., Kuklina M. M. Raspredelenie ochagov invazii litoral'nykh mollyuskov partenitami i lichinkami trematod v gubakh i zalivakh Murmanskogo poberezh'ya v mae–iyune 2021 g. [Distribution of foci of invasion of littoral mollusks by parthenites and larvae of trematodes in the lips and bays of the Murmansk coast in May–June 2021]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Estestvennye i gumanitarnye nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities], 2024, Vol. 3, No. 3, pp. 104–117 (In Russ.). Available at: <https://doi:10.37614/2949-1185.2024.3.3.010>
7. Kuklina M. M., Kuklin V. V. *Wardium cirrosa* (Cestoda: Aploparaksidae): lokalizatsiya v kishechnike serebristoy chayki i vliyaniye na pishchevaritel'nyuyu aktivnost' khozyaina [*Wardium cirrosa* (Cestoda: Aploparaksidae): localization in the intestine of the silver gull and influence on the digestive activity of the host]. *Parazitologiya* [Parasitology], 2017, Vol. 51, No. 3, pp. 213–223 (In Russ.).
8. Kuklina M. M., Kuklin V. V. Sovmestnoye parazitirovaniye *Lateriporus teres* (Cestoda: Dilepididae) i *Polymorphus phippii* (Palaeacanthocephala: Polymorphidae) v tonkom kishechnike obyknovennoy gagi [Co-parasitizing *Lateriporus teres* (Cestoda: Dilepididae) *Polymorphus phippii* of the year (Palaeacanthocephala: Polymorphidae) as a small intestine of the common eider]. *Rossiyskiy parazitologicheskii zhurnal* [Russ. J. Parasitol.], 2021, Vol. 15, No. 1, pp. 32–41 (In Russ.). Available at: <https://doi:10.31016/1998-8435-2021-15-1-32-41>
9. Kuklina M. M., Kuklin V. V. Vliyaniye tsestod, parazitiruyushchikh v tonkom kishechnike ptentsov serebristoy chayki, na aktivnost' proteaz khozyaina [The effect of cestodes parasitizing the small intestine of herring gull chicks on the activity of host proteases]. *Parazitologiya* [Parasitology], 2024, Vol. 58, No. 4, pp. 277–292 (In Russ.). Available at: <https://doi:10.31857/S0031184724040021>
10. Makeenko G. A. *Geneticheskaya izmenchivost' atlanticheskoy treski (Gadus morhua L.) na severo-vostoke areala*. Avtoreferat diss. kand. biol. nauk [Genetic variability of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) in the northeast of the areal. PhD (Biology) diss.]. Moscow, 2016, 22 p. (In Russ.).
11. Plaksina M. P., Kuklina M. M. Gel'mintofauna gammarid *Gammarus oceanicus*, *Gammarus duebeni* Murmanskogo poberezh'ya Barentseva morya [Helminthofauna of gammarids *Gammarus oceanicus*, *Gammarus duebeni* of the Murmansk coast of the Barents Sea]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Okeanologiya, vypusk 10* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Oceanology. Iss. 10], 2022, Vol. 4, No. 13, pp. 78–86 (In Russ.). Available at: <https://doi:10.37614/2307-5252.2022.4.10.008>
12. Polyanskiy Yu. I. Materialy po parazitologii ryb severnykh morey SSSR. Parazity ryb Barentseva morya [Materials on the parasitology of fishes of the northern seas of the USSR. Fish parasites of the Barents Sea]. *Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR* [Transactions of the Zoological Institute of USSR Academy of Sciences], 1955, Vol. 19, pp. 5–170 (In Russ.).
13. Uspenskaya A. V. *Parazitofauna benticheskikh rakoobraznykh Barentseva morya* [Parasitic fauna of benthic crustaceans of the Barents Sea]. Moscow, Leningrad, Publ. AS USSR, 1963, 128 p. (In Russ.).
14. Frolova T. V., Izvekova G. I. Vliyaniye zarazheniya cestodoy *Proteocephalus torulosus* Batsch, 1786 na aktivnost' fermentov v kishechnike sintsa (*Ballerus ballerus*) [The effect of infection with the cestode *Proteocephalus torulosus* Batsch, 1786 on the activity of enzymes in the intestines of the chinese (*Ballerus ballerus*)]. *Parazitologiya* [Parasitology], 2018, Vol. 52, No. 4, pp. 292–303 (In Russ.). Available at: <https://doi:10.7868/S0031184718040042>
15. Khokhlova I. G. *Akantotsefaly nazemnykh pozvonochnykh fauny SSSR* [Acanthocephalus of terrestrial vertebrates of the fauna of the USSR]. Moscow, Nauka, 1986, 277 p. (In Russ.).
16. Frolova T. V., Izvekov E. I., Solovyev M. M., Izvekova G. I. Activity of proteolytic enzymes in the intestine of bream *Abramis brama* infected with cestodes *Caryophyllaeus laticeps* (Cestoda, Caryophyllidae). *Comp. Biochem. Physiol., Part B*, 2019, Vol. 235, pp. 38–45. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2019.05.009>

17. Gremillet D., Fort J., Amelineau F., Zakharova E., Le Bot T., Sala E., Gavrilov M. Arctic warming: nonlinear impacts of sea-ice and glacier melt on seabird foraging. *Global Change Biol.*, 2015, Vol. 21, iss. 3, pp. 1116–1123. Available at: <https://doi.org/10.1111/gcb.12811>
18. Dalton J. P., Skelly P., Halton D. W. Role of the tegument and gut in nutrient uptake by parasitic platyhelminths. *Can. J. Zool.*, 2004, Vol. 82, pp. 211–232. Available at: <https://doi.org/10.1139/z03-213>
19. Frolova T. V., Izvekova G. I. Metabolic adaptation of fish intestinal helminthes: inhibitory ability towards proteases in cestodes *Triaenophorus nodulosus*. *J. Evol. Biochem. Physiol.*, 2023, Vol. 59, iss. 5, pp. 370–377. Available at: <https://doi.org/10.31857/S0044452923050042>
20. Hoberg E. P., Adams A. Phylogeny, history and biodiversity: understanding faunal structure and biogeography in the marine realm. *Bull. Scand. Soc. Parasitol.*, 2000, Vol. 10, iss. 2, pp. 19–37.
21. Rogozhin E. A., Solovyev M. M., Frolova T. V., Izvekova G. I. Isolation and partial structural characterization of new Kunitz-type trypsin inhibitors from the pike cestode *Triaenophorus nodulosus*. *Mol. Biochem. Parasitol.*, 2019, Vol. 233, Article: 111217. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.molbiopara.2019.111217>
22. Izvekova G. I., Solovyev M. M. Characteristics of the effect of cestodes parasitizing the fish intestine on the activity of the host proteinases. *Biol. Bull.*, 2016, Vol. 43, iss. 2, pp. 146–151. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1062359016010076>
23. Izvekova G. I., Frolova T. V., Izvekov E. I. Adsorption and inactivation of proteolytic enzymes by *Triaenophorus nodulosus* (Cestoda). *Helminthologia*, 2017, Vol. 54, iss. 1, pp. 3–10. Available at: <https://doi.org/10.1515/helm-2017-0001>
24. Kuklin V. V. Biogeographical aspects of helminths parasitizing Barents Sea birds: spatial distribution and host preferences. *Biol. Bull.*, 2022, Vol. 49, No. 9, pp. 1570–1592. Available at: <https://doi.org/10.1134/s1062359022090175>
25. Kuklin V. V., Kuklina M. M. Age dynamics of helminth fauna of the herring gull (*Larus argentatus*) in Kola Bay, Barents Sea. *Biol. Bull.*, 2021, Vol. 48, No. 8, pp. 1160–1169. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1062359021080173>
26. Kuklin V. V., Kuklina M. M. Dynamics of helminth fauna of black-legged kittiwake in the Russian Arctic in the context of climate changes. *J. Helminthol.*, 2022, Vol. 96, pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0022149X22000219>
27. Kuklin V. V., Kuklina M. M., Ezhov A. V. Helminths of the black-legged kittiwake (*Rissa tridactyla* Linnaeus, 1758) and the Brünnich's guillemot (*Uria lomvia* Linnaeus, 1758) in Russkaya Gavan Bay, Severny Island, Novaya Zemlya Archipelago. *Rus. J. Mar. Biol.*, 2020, Vol. 46, No. 6, pp. 441–451. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1063074020060073>
28. Kuklin V. V., Kuklina M. M., Ezhov A. V. Helminth fauna of black-legged kittiwakes (*Rissa tridactyla* Laridae, Charadriiformes) in the northern part of the Kara Sea. *Biol. Bull.*, 2023, Vol. 50, No. 9, pp. 2147–2154. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1062359023090194>
29. Kuklina M. M., Kuklin V. V. Peculiarities of protein hydrolysis on the digestive transport surfaces of the intestine of the kittiwake *Rissa tridactyla* and *Alcataenia larina* (Cestoda, Dilepididae) parasitizing it. *Biol. Bull.*, 2011, Vol. 38, iss. 5, pp. 470–475. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1062359011050098>
30. Kuklina M. M., Kuklin V. V. The peculiarities of parasitism of *Polymorphus phippsi* (Palaeacanthocephala: Polymorphidae) in the intestines of seabirds from the Barents Sea. *Biol. Bull.*, 2021, Vol. 48, No. 6, pp. 770–776. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1062359021060121>
31. Kuklina M. M., Kuklin V. V. Protease activity in the small intestine of the northern fulmar *Fulmarus glacialis* infested with *Tetrabothrius minor* (Cestoda, Tetrabothriidae). *J. Evol. Biochem. Physiol.*, 2023, Vol. 59, iss. 5, pp. 1479–1487. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0022093023050022>
32. Taraschewski H. Host-parasite interactions in Acanthocephala, a morphological approach. *Adv. Parasitol.*, 2000, Vol. 46, pp. 1–179. Available at: [https://doi.org/10.1016/s0065-308x\(00\)46008-2](https://doi.org/10.1016/s0065-308x(00)46008-2)

Информация об авторах

Куклин Вадим Владимирович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-7517-2056>

Куклина Марина Михайловна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0003-3293-6383>

Information about the authors

Vadim V. Kuklin – PhD (Biology), Principal Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7517-2056>

Marina M. Kuklina – PhD (Biology), Principal Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3293-6383>

Статья поступила в редакцию 26.03.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2025; принята к публикации 25.04.2025.
The article was submitted 26.03.2025; approved after reviewing 14.04.2025; accepted for publication 25.04.2025.

Научная статья
УДК 551.46.07
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.009

МОРСКИЕ ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ММБИ РАН В 2020–2024 ГОДАХ

Павел Робертович Макаревич

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
makarevich@mmbi.info

Аннотация

Приведены итоги морских научных экспедиционных работ по изучению природы морей Арктики Мурманским морским биологическим институтом РАН в 2020–2024 гг. В результате выполнения научно-исследовательских работ получен большой объем оригинальной информации о современном состоянии морских арктических экосистем. Собранный материал пополнит базовую основу теоретических и практических разработок, осуществляемых в институте.

Ключевые слова:

морские экосистемы, экспедиционные исследования, Арктика

Original article

RESULTS OF MARINE EXPEDITION RESEARCH OF MMBI RAS IN 2020–2024

Pavel R. Makarevich

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
makarevich@mmbi.info

Abstract

The results of multidisciplinary marine scientific expeditionary work on studying the nature of the Arctic seas by the Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences in the period 2020–2024 are presented. As a result of the research work, a large amount of original information on the current state of marine Arctic ecosystems was obtained. The collected material will supplement the basic foundation of all theoretical and practical developments carried out at the institute.

Keywords:

marine ecosystems, expeditionary research, Arctic

Проведение систематических экосистемных исследований в арктических морях является основой фундаментальных и прикладных научных исследований, проводимых в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации. Исследования современного состояния экосистем Арктического региона, а также оценка возможного воздействия на биоценозы природных и техногенных факторов – актуальные задачи современной океанологии. Подобные работы позволяют пополнять имеющиеся базы данных по структуре и особенностям функционирования морских арктических экосистем, охватывая все уровни экосистемной организации, как абиотических составляющих (гидрологических, гидрометеорологических и гидрохимических характеристик), так и биотических – от исследования организмов, осуществляющих первичное продуцирование органического вещества (бактериопланктон, фитопланктон) до представителей высших звеньев трофических цепей (морские млекопитающие и птицы). Полученные новые знания дают возможность прогнозировать ответные реакции арктической природной среды и биоты на внешнее воздействие естественного и антропогенного происхождения.

Мурманский морской биологический институт РАН в 2020–2024 гг. в рамках национального проекта «Наука и университеты» продолжил активное проведение multidisciplinary морских научных экспедиционных работ по изучению природы морей Арктики (рис. 1). Актуальность исследований продиктована необходимостью сохранения и рационального использования минерального и биологического потенциала морей, обеспечения экологической безопасности морских акваторий, находящихся под воздействием глобальных климатических и техногенных процессов.

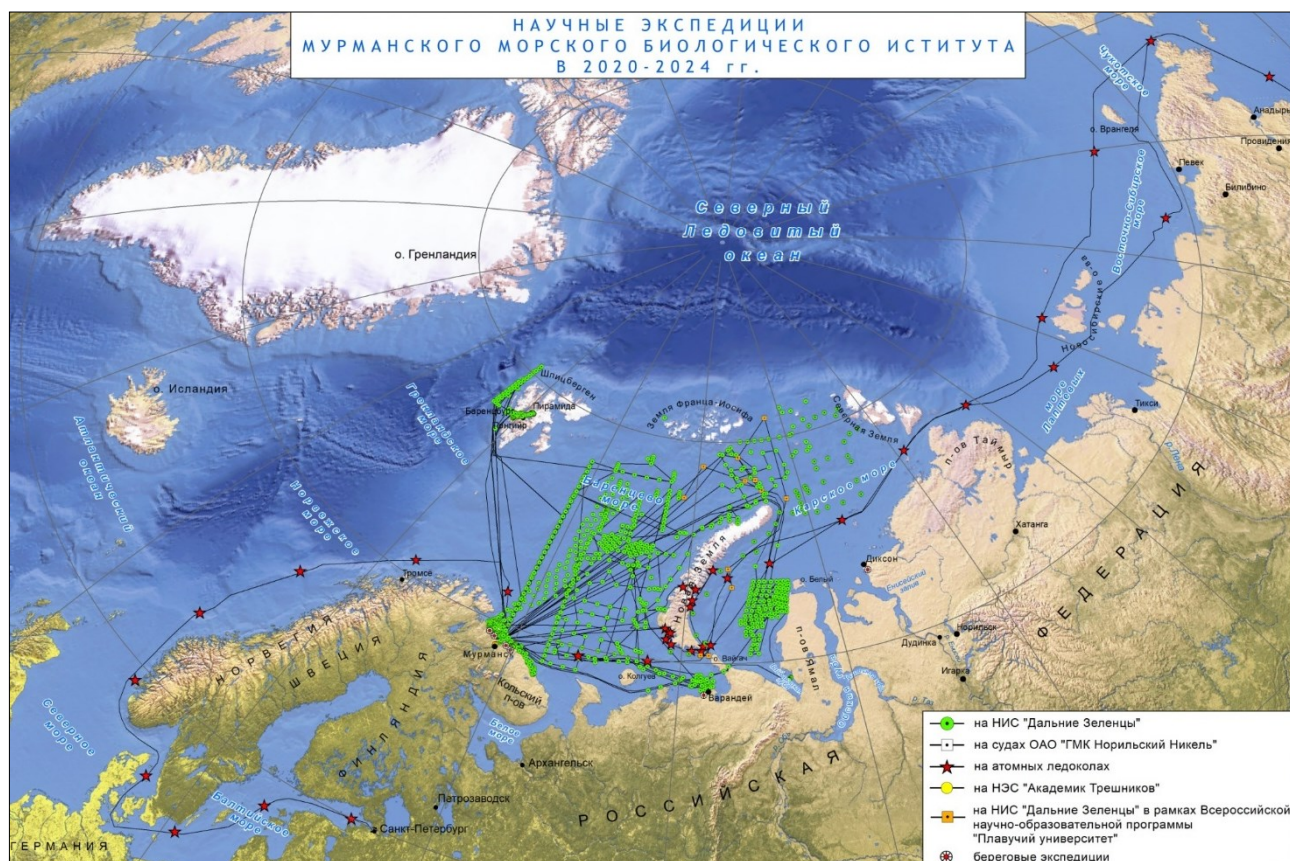


Рис. 1. Карта-схема научных экспедиций ММБИ РАН в 2020–2024 гг.
Fig. 1. Map-scheme of scientific expeditions of MMBI RAS in 2020–2024

Экспедиционные исследования ММБИ в Арктике в этот период были непосредственно связаны с решением фундаментальных задач в области изучения природы Мирового океана. Содержание исследований было определено экспедиционной программой, утвержденной Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, и темами государственного задания ММБИ РАН:

- «Структурно-динамические трансформации пелагических экосистем морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды»;
- «Донные биоценозы Баренцева моря, его водосборного бассейна и сопредельных вод в современных условиях»;
- «Экология рыб и биоразнообразие рыбной части сообществ арктических морей»;
- «Экология, физиология и паразитология птиц Арктического бассейна в условиях климатических и антропогенных трансформаций среды обитания»;
- «Териофауна арктических морей: физиология, экология и этология»;
- «Многодисциплинарные исследования морских и наземных экосистем в районе архипелага Шпицберген».

Основные цели экспедиционных исследований:

- получение новых данных о фоновом состоянии экосистем морей российской Арктики;
- анализ многолетних трендов изменчивости абиотических и биотических показателей в динамично меняющейся природной морской среде.

В соответствии с поставленной целью решались следующие основные задачи:

- оценка особенностей гидрологического режима морей Арктики;
- мониторинг современного состояния и продуктивности планктонных сообществ;

- проведение комплексных экосистемных исследований биоразнообразия и обилия зообентоса;
- исследования разнообразия и структуры рыбной части сообществ экосистем открытых и прибрежных районов морей Арктики;
- оценка современного состояния популяций морских птиц и млекопитающих;
- получение данных об уровнях химического и радиоактивного загрязнения биоты, вод и донных грунтов.

География морских экспедиционных походов судна охватывала практически все моря российского сектора Арктики. Работы проводились как в прибрежных, эстуарных зонах, так и в открытых частях морей. Каждый из перечисленных типов биотопов обладает своей специфической пространственно-временной структурой и в значительной степени зависит от общих закономерностей протекания климатических процессов. В ходе исследований были установлены особенности структуры и динамики планктонных, бентосных и рыбных сообществ, обусловленные многолетними изменениями гидрологических условий и ледяного покрова, проведены наблюдения за морскими птицами и млекопитающими. Выявлены данные о загрязнении атмосферы, морских водных масс, криосферы и уровнях загрязняющих веществ в морских организмах.

В ходе экспедиционных исследований получены уникальные данные о морских экосистемах в желобах Святой Анны в Карском море, Франц-Виктория в Северном Ледовитом океане, у кромки морского льда в Баренцевом море и в зоне высокоширотных архипелагов Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. Проведены экспедиции в прибрежную часть, фьорды и заливы Кольского побережья Баренцева моря.

Были продолжены научно-исследовательские экспедиционные работы, начатые еще в 1996 г., по трассе Северного морского пути на борту судов сторонних организаций — ледоколов ФГУП «Атомфлот» и Росгидромета. Не прерывался и ряд мониторинговых наблюдений за гидрологическими и гидробиологическими параметрами водных масс Баренцева моря на вековом разрезе «Кольский меридиан», который проходит с юга на север по меридиану 33°30' через Баренцево море. Океанографические исследования здесь проводят с 1898 г., поэтому по их результатам можно судить о климатической изменчивости как в Баренцевом море, так и Арктики в целом.

Особый интерес вызывали труднодоступные для экспедиционных работ из-за ледовой обстановки районы Баренцева и Карского морей. Результаты научных исследований этих вод позволили получить информацию о современном состоянии бентосных и рыбных сообществах и оценить, в какой степени и как изменилась их структура под влиянием крупномасштабных последствий климатических флуктуаций, наблюдаемых в последние десятилетия.

В последние годы институтом активизировались работы, связанные с изучением биотических и абиотических процессов в биотопах пелагиали и морского льда в краевой ледовой зоне арктических морей, исследования функционирования арктических морских экосистем в условиях полярной ночи — в самый малоизученный сезон и сложный для морских экспедиционных исследований период.

Экспедиционные изыскания ММБИ РАН имеют не только фундаментальную направленность. Так, в рамках научно-образовательной программы «Плавучий университет» на НИС «Дальние Зеленцы» наряду с научно-исследовательскими работами осуществлялась подготовка молодого кадрового резерва в области морских наук. Были продолжены научно-прикладные исследования, связанные с освоением нефтегазовых ресурсов шельфа арктических морей. Так проведены исследования в рамках производственного экологического мониторинга в районе расположения МЛСП «Приразломная», мониторинг состояния окружающей среды на лицензионных участках Баренцева моря (Демидовском, Ферсмановском, Медвеьем, Ледовом, Лудловском), инженерно-экологические изыскания на Скуратовском и Ленинградском лицензионных участках в Карском море, ихтиологические исследования в акватории Карского моря на Русановском лицензионном участке.

В целом основной объем экспедиционных работ ММБИ РАН в 2020–2024 гг. был осуществлен на НИС «Дальние Зеленцы» (рис. 2). В этот период на исследовательском судне была проведена 21 научная экспедиция, общая продолжительность составила 526 сут. Выполнено 1095 станций отбора проб среды и биоты, 155 донных ихтиологических тралений, 325 трансект наблюдений за морскими птицами и млекопитающими общей протяженностью 5960 км. Вместе с тем в экспедициях изучалась загрязненность биоты, морских вод и донных отложений (Макаревич, Моисеев, 2023; Комплексные ..., 2024; Океанологические ..., 2024).



Рис. 2. Научно-исследовательское судно «Дальние Зеленцы» (ММБИ РАН)
Fig. 2. R/V «Dalnie Zelentsy» (MMBI RAS)

По материалам морских экспедиционных исследований сотрудниками института было опубликовано 112 научных статей, среди которых 46 публикаций в российских и 50 в зарубежных журналах, включенных в «Белый список» Минобрнауки России.

За прошедший период на НИС «Дальние Зеленцы», кроме сотрудников ММБИ, выполняли исследования и ученые сторонних организаций – Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Арктического и антарктического НИИ, Полярного геофизического института, Мурманского арктического университета, Русского географического общества, Центра морских исследований МГУ им. М. В. Ломоносова, Института экологического проектирования и изысканий.

Полученные новые знания о состоянии морских арктических экосистем могут быть использованы для решения следующих практических задач:

- оценка продукционного потенциала и состояния промысловых и перспективных объектов промысла гидробионтов;
- разработка научно обоснованных рекомендаций для сохранения, восстановления и рационального использования биологических ресурсов морей на основе экосистемного мониторинга;
- проведение экологического сопровождения хозяйственной деятельности на морских акваториях;
- проведение экологической экспертизы по оценке экологического ущерба морским арктическим экосистемам от хозяйственной деятельности, техногенных и климатических катастроф. Комплексная оценка экологических рисков;
- средне- и долгосрочный прогноз эволюции биологических сообществ в условиях климатических флуктуаций и активизации промышленно-хозяйственной деятельности.

Таким образом, в результате выполнения научно-исследовательских работ ММБИ РАН в 2020–2024 гг. был получен большой объем оригинальной информации о современном состоянии морской среды, биологических компонентах, биопродуктивности и ресурсном потенциале морских

арктических экосистем, источниках и уровнях антропогенных нагрузок. Собранный материал пополнит базовую основу всех теоретических и практических разработок, осуществляемых в институте.

Автор выражает признательность научным группам и экипажу НИС «Дальние Зеленцы», участвовавшим в проведении морских экспедиционных исследований в 2020–2024 гг.

Работа выполнена в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Макаревич П. Р., Моисеев Д. В. 45 лет научно-исследовательскому судну «Дальние Зеленцы» // Наука Юга России. 2023. Т. 19, № 2. С. 94–98. doi:10.7868/S25000640230211
2. Комплексные экосистемные исследования ММБИ РАН на НИС «Дальние Зеленцы» в 2023 г. / П. Р. Макаревич, Д. В. Моисеев, Д. Г. Ишкулов, М. П. Венгер, А. В. Ежов, О. В. Карамушко, Т. М. Максимовская, Л. В. Павлова // Морские экспедиционные исследования России в 2023 году: Тез. докл. конф. «Итоги экспедиционных исследований в 2023 году в Мировом океане и внутренних водах, на архипелаге Шпицберген и полуострове Камчатка». М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. С. 107–109. URL: <https://ocean-and-we.ru/ru/marine-expeditionary-research-article>
3. Океанологические исследования на высокоширотных разрезах у архипелага Шпицберген в период полярной ночи / П. Р. Макаревич, Д. В. Моисеев, М. П. Венгер, Т. М. Максимовская, З. Ю. Румянцева // Океанология. 2024. Т. 64, № 5. С. 846–848. doi:10.31857/S0030157424050112

References

1. Makarevich P. R., Moiseev D. V. 45 let nauchno-issledovatel'skomu sudnu «Dal'nie Zelentsy» [45 years of the scientific research vessel «Dalniye Zelentsy»]. *Nauka Yuga Rossii* [Science of the South of Russia], 2023, Vol. 19, No. 2, pp. 94–98 (In Russ.). doi:10.7868/S25000640230211
2. Makarevich P. R., Moiseev D. V., Ishkulov D. G., Venger M. P., Ezhov A. V., Karamushko O. V., Maksimovskaya T. M., Pavlova L. V. Kompleksnye ekosistemnye issledovaniya MMBI RAN na NIS «Dal'nie Zelentsy» v 2023 g. [Integrated ecosystem research on board R/V «Dalnie Zelentsy» in 2023]. *Morskie ekspeditsionnye issledovaniya Rossii v 2023 godu. Tezisy dokladov konferentsii «Itogi ekspeditsionnykh issledovaniy v 2023 godu v Mirovom okeane i vnutrennikh vodakh, na arhipelage Shpitsbergen i poluostrove Kamchatka»* [Marine expeditionary research in Russia in 2023. Abstracts of the conference «Results of expeditionary research in 2023 in the World Ocean and inland waters, in the Svalbard Archipelago and the Kamchatka Peninsula»]. Moscow, 2024, pp. 107–109 (In Russ.). Available at: <https://ocean-and-we.ru/ru/marine-expeditionary-research-article>
3. Makarevich P. R., Moiseev D. V., Venger M. P., Maksimovskaya T. M., Rumyantseva Z. Yu. Okeanologicheskie issledovaniya na vysokoshirotnykh razrezakh u arhipelaga Shpitsbergen v period polyarnoy nochi [Oceanological research on high-latitude sections off the Svalbard Archipelago during the polar night]. *Okeanologiya* [Oceanology], 2024, Vol. 64, No. 5, pp. 846–848 (In Russ.). doi:10.31857/S0030157424050112

Информация об авторе

Павел Робертович Макаревич – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7581-862X>

Information about the author

Pavel R. Makarevich – Dr. Sci. (Biology), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7581-862X>

Статья поступила в редакцию 03.04.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2025; принята к публикации 28.04.2025.
The article was submitted 03.04.2025; approved after reviewing 14.04.2025; accepted for publication 28.04.2025.

Научная статья
УДК 551.462:551.248.2 (268.45)
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.010

ВЕРТИКАЛЬНАЯ РАСЧЛЕНЕННОСТЬ РЕЛЬЕФА И ЛИНЕАМЕНТЫ ПОЛУОСТРОВОВ РЫБАЧИЙ И СРЕДНИЙ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Максим Валентинович Митяев

*Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
mityaev@mmbi.info*

Аннотация

В результате морфоструктурного исследования территории на границе Балтийского щита и Кольской микроплиты, на которой расположены полуострова Средний и Рыбачий, было выявлено, что на Среднем энергия рельефа почти в 1.5 раза больше, чем на Рыбачьем. При этом на территории п-ова Рыбачий тектонические напряжения примерно на 20 % превышают аналогичные показатели на п-ове Средний. Установлено, что средняя глубина базиса эрозии на Среднем составляет 69 ± 3 м/км², густота линейных элементов рельефа – 0.96 ± 0.03 км/км², а на Рыбачьем – 49 ± 1 м/км² и 1.23 ± 0.01 км/км² соответственно. Основные напряжения земной коры на обоих полуостровах возникают при сжатии в двух направлениях – с северо-запада (от Срединно-Атлантического хребта) и с северо-востока (от хребта Гаккеля).

Ключевые слова:

вертикальная расчлененность рельефа, глубина базиса эрозии, линеаменты, полуостров Средний, полуостров Рыбачий, морфоструктуры

Original article

VERTICAL DISDICTION OF THE RELIEF AND LINEAMENTS OF THE RYBACHY AND SREDNY PENINSULAS (KOLA PENINSULA)

Maxim V. Mityaev

*Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
mityaev@mmbi.info*

Abstract

As a result of morphostructural study of the territory on the border of the Baltic Shield and the Kola microplate, covering the Sredny and Rybachy peninsulas, it was revealed that on the Sredny Peninsula the relief energy is almost one and a half times greater than on the Rybachy Peninsula. At the same time, on the territory of the Rybachy Peninsula tectonic stresses are almost 20 % higher than similar indicators on the Sredny Peninsula. It was established that the average depth of the erosion base on the Sredny Peninsula is 69 ± 3 m/km², on the Rybachy Peninsula – 49 ± 1 m/km². The density of linear relief elements on the Rybachy Peninsula on average is 1.23 ± 0.01 km/km², on the Sredny Peninsula – 0.96 ± 0.03 km/km². The main stresses of the Earth's crust on both peninsulas arise from compressive forces in two directions – from the northwest (from the Mid-Atlantic Ridge) and from the northeast (from the Gakkel Ridge).

Keywords:

vertical dissection of relief, depth of erosion base, lineaments, Sredny Peninsula, Rybachy Peninsula, morphostructures

Введение

Неотектонический этап структурного развития Земли необычайно важен тем, что иллюстрирует насколько за короткий промежуток времени (с геологической точки зрения) может измениться ее морфологический лик. При этом затрагивается широкий круг актуальных проблем геологии, геоморфологии и других смежных наук – абсолютные скорости движений земной коры по разным векторам, амплитуды движений, формирование различного рода линейных и нелинейных деформаций, сопровождающихся разрывом сплошности литосферы в целом и отдельных ее горизонтов, что связано с вулканической, сейсмической опасностью и другими геоэкологическими катастрофами.

Рассмотрим орографические особенности, вертикальную расчлененность рельефа и линейные элементы рельефа на территории, сформированной в активной тектонической зоне «живых» дизъюнктивных структур на границе Балтийского щита и Баренцевоморской плиты. Большинство

линейных элементов рельефа полуостровов Рыбачий и Средний тектонической природы, они продолжают развиваться в современное время и контролируют блоковые морфоструктуры территории. Большая вертикальная расчлененность рельефа на границах полуостровов свидетельствуют о высокой энергии рельефообразования территории и возможной сейсмической опасности всей зоны сопряжения морфоструктур региона.

Материал и методы

Объект исследования – зона сопряжения территории северо-западной части Балтийского щита и эпибайкальской Кольской микроплиты шельфа Баренцева моря в районе выхода на дневную поверхность земли горных пород позднего протерозойского возраста (Объяснительная ..., 1996). Морфоструктурный анализ выполнен на территории полуостровов Рыбачий и Средний, географически расположенных на Кольском полуострове между Мурманским берегом и открытой акваторией шельфа Баренцева моря (рис. 1). Исследовали вертикальную расчлененность рельефа, густоту линейных элементов рельефа и их простирание.

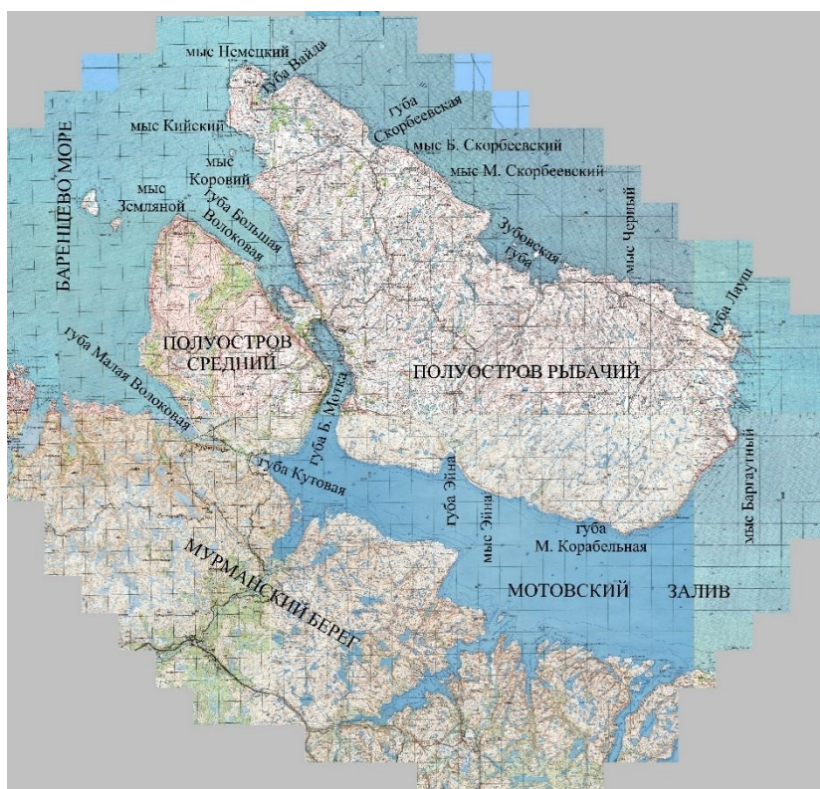


Рис. 1. Схема географического положения района исследований

Fig. 1. Scheme of the geographical location of the research area

Район исследований относится к территории с завершенным геологическим развитием и длительным процессом планации, поэтому ее современный морфоструктурный облик определяют позднекайнозойские тектонические движения (неотектонические) блокового типа (Кошечкин, 1969; Мусатов, 1996; Митяев, 2001, 2014 и др.).

На первом этапе мы проводили анализ топографических карт. Было выполнено разделение территорий на районы с единой морфологией и ориентацией орогидрографических элементов рельефа. В пределах выделенных орогидрографических районов определялась минимальная разница высотных отметок водораздельных пространств, достаточная для отнесения двух сопредельных

участков территории к различным структурно-тектоническим блокам (Морфоструктурные ..., 1968). Для определения этой величины был проведен анализ высотных отметок водораздельных пространств (для каждого полуострова в отдельности). В орогидрографических районах рассчитывалась амплитуда рельефа в блоках площадью 4 км^2 (ячейка $2 \times 2 \text{ км}$) и ее среднеарифметическая величина.

На п-ове Средний высота водораздельных поверхностей в среднем составляет $188 \pm 9 \text{ м}$ над уровнем моря $[(110 \pm 10) - (245 \pm 15) \text{ м}]$. Амплитуда рельефа изменяется от 43 до 137 м, при средней величине $90 \pm 20 \text{ м}$. Следовательно, разделение территории полуострова на морфоструктурные блоки возможно при разности вершинных поверхностей в 30 м. На п-ове Рыбачий средняя высота водоразделов составляет $146 \pm 3 \text{ м}$ над уровнем моря $[(70 \pm 5) - (190 \pm 8) \text{ м}]$. Амплитуда рельефа изменяется от 33 до 95 м, при средней величине $55 \pm 5 \text{ м}$. Следовательно, разделение территории на морфоструктурные блоки возможно при разности вершинных поверхностей в 40 м. Полученные значения меньше, чем для пенепленизированного и активизированного в неотектонический этап сопредельного Мурманского побережья Кольского полуострова (Митяев, 2014).

Было принято, что на обоих полуостровах орогидрографические районы с разницей высоты наддолинного рельефа в 40 м и более следует отнести к разным морфоструктурным блокам. Нами выделено 14 морфоструктурных блоков (9 – на п-ове Рыбачий, 4 – на п-ове Средний и 1 – соединяющий полуострова).

Вертикальная расчлененность рельефа – один из наиболее ярких признаков современной активности неотектонических структур, легко определяемых при анализе картографического материала. При анализе территории топографическая карта масштаба 1:100 000 разбивалась на элементарные ячейки площадью 1 км^2 , в пределах которой определялась амплитуда рельефа (разность максимальных и минимальных гипсометрических высот рельефа – глубина локального базиса эрозии) и относилась к центру квадрата. Далее элементарная ячейка сдвигалась на $1/3$ по горизонтальной, а затем и вертикальной оси, и операция повторялась заново. Затем выделялись области с одинаковой вертикальной расчлененностью (потенциальной энергией) рельефа.

Далее определяли рельефообразующие линеаменты (мегатрещины) – все прямолинейные, дугообразные и кольцевые элементы рельефа и растительного покрова, четко выделяемые в результате дешифрирования топографической основы. Выделение линеаментов проводилось по сгущению горизонталей трассирующих уступы рельефа, спрямленным участкам долин водотоков и берегов озер, коленообразным изгибам русел водотоков, линейно расположенным или вытянутым в одном направлении цепочке озерных котловин, по морским берегам губ и заливов. На топографическую карту наносились только четкие контролирующие особенности рельефа линеаменты. Соблюдалось правило гомогенности, т. е. линеамент, разделяя единую гипсометрическую поверхность на две части (левую и правую), должен сохранять соотношение высотных отметок между этими двумя частями территории на всем своем протяжении. В результате строилась схема рельефообразующих линеаментов, которая подвергалась дальнейшему исследованию. В первую очередь анализировалась густота линеаментов. Для определения этой величины схема рельефообразующих линеаментов разбивалась на ячейки площадью 1 км^2 , в пределах ячейки определялась общая длина линеаментов и относилась к центру ячейки. Далее ячейка сдвигалась на $1/3$ по горизонтальной оси, и операция повторялась заново, потом ячейки сдвигались на $1/3$ по вертикальной оси, и в каждой ячейке вновь замерялась общая длина линеаментов. Полученное в результате измерений поле длин линеаментов усреднялось по круговой палетке с радиусом автокорреляции 4 км (около 0.5 % от исследуемой территории). Затем проводились изолинии равных значений густоты линеаментов.

На втором этапе мы исследовали направление простираения линеаментов. Для этого строились розы-диаграммы (при построении учитывалось как направление линеаментов, так и их протяженность). Осреднение направления простираения линеаментов проводили через 15 град., ввиду зеркальности сводные розы-диаграммы для каждого полуострова и всей территории в целом строились только в северном секторе (от запада до востока). Для каждого морфоструктурного блока строилась своя роза-диаграмма простираения линеаментов.

Результаты и обсуждение

Орогидрографические особенности территории. Площадь п-ова Рыбачий около 900 км², рельеф характеризуется преобладанием линейных элементов (озерно-речных долин и водоразделов) северо-восточного и северо-западного направлений. Водоразделы узкие, с крутыми ступенчатыми склонами. Депрессии рельефа линейно-вытянутые корытообразного поперечного профиля, в депрессиях располагаются озерно-речные (озерно-ручьевые) системы. Большинство понижений рельефа заболочено. Озерные котловины небольшие, площадь водного зеркала S_w менее 1 км², встречаются озера линейно вытянутые и овальной формы. Руслу водотоков прямые, нередко с резкими коленообразными изгибами. Средняя высота наддолинного рельефа 145 ± 3 м ($n = 280$), максимальные высоты водоразделов не превышают 300 м (сопка Эйна – 299.5 м). На Рыбачьем господствует тундровый (гольцовый) ландшафт. Нами выделено 9 орографических районов (блоков, рис. 2).

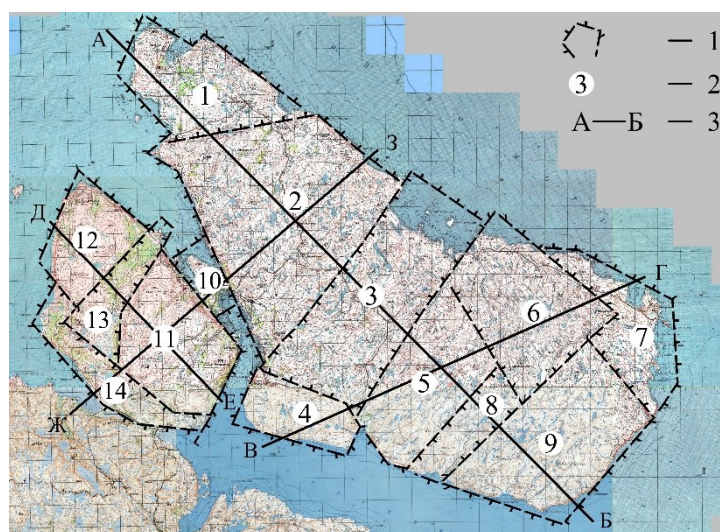


Рис. 2. Схема орографического районирования полуостровов Средний и Рыбачий:

1 – границы районов, 2 – номера районов, 3 – линии профилей рельефа

Fig. 2. Scheme of orographic zoning, Sredny and Rybachy peninsulas:

1 – boundaries of orographic regions, 2 – numbers of orographic regions, 3 – lines for constructing relief profiles

Вайдагубский орографический район – площадь около 80 км², расположен северо-западнее долины ручья Лохи по линии между устьями ручьев Лохи и Скорбеевский. Средняя высота наддолинного рельефа составляет 70 ± 5 м ($n = 24$), максимальная – 120 м, преобладают небольшие озерные котловины ($S_w < 0.2$ км²) овальной формы. Склоны прямые пологие, к морю рельеф обрывается почти отвесным уступом (рисунки 2, 3). Берега озер и ручьев сильно заболочены, в вершине губы Вайда господствует лесотундровый ландшафт, на остальной территории – гольцовый тундровый ландшафт. Глубина базиса эрозии небольшая и в среднем составляет 41 ± 3 м/км² ($n = 110$), что ниже, чем в средний показатель на полуострове.

С юго-востока к Вайдагубскому району примыкает Скорбеевский орографический район площадью около 220 км² (рис. 2). Его юго-восточная граница проведена по линии соединяющей северо-западный борт Зубовской губы и мыс Рокапахта (губа Большая Мотка; рис. 1). Средняя высота наддолинного рельефа составляет 164 ± 7 м ($n = 65$), максимальная – 245 м. Наддолинный рельеф широкий структурный, часто наблюдаются гребневидные вершины, склоны водоразделов прямые ступенчатые от почти отвесных обрывов до пологих структурных поверхностей (рис. 3). Озерные котловины небольшие ($S_w < 0.6$ км²), преобладают линейно вытянутые озера северо-восточной и северо-западной ориентировки. Практически все понижения рельефа заболочены, в районе господствует гольцовый тундровый ландшафт, но в долинах ручьев изредка встречается древесная

растительность. Глубина базиса эрозии небольшая – в среднем 54 ± 2 м/км² ($n = 249$), что больше чем средний показатель на п-ове Рыбачий. Руслу водотоков прямые, с коленообразными изгибами.

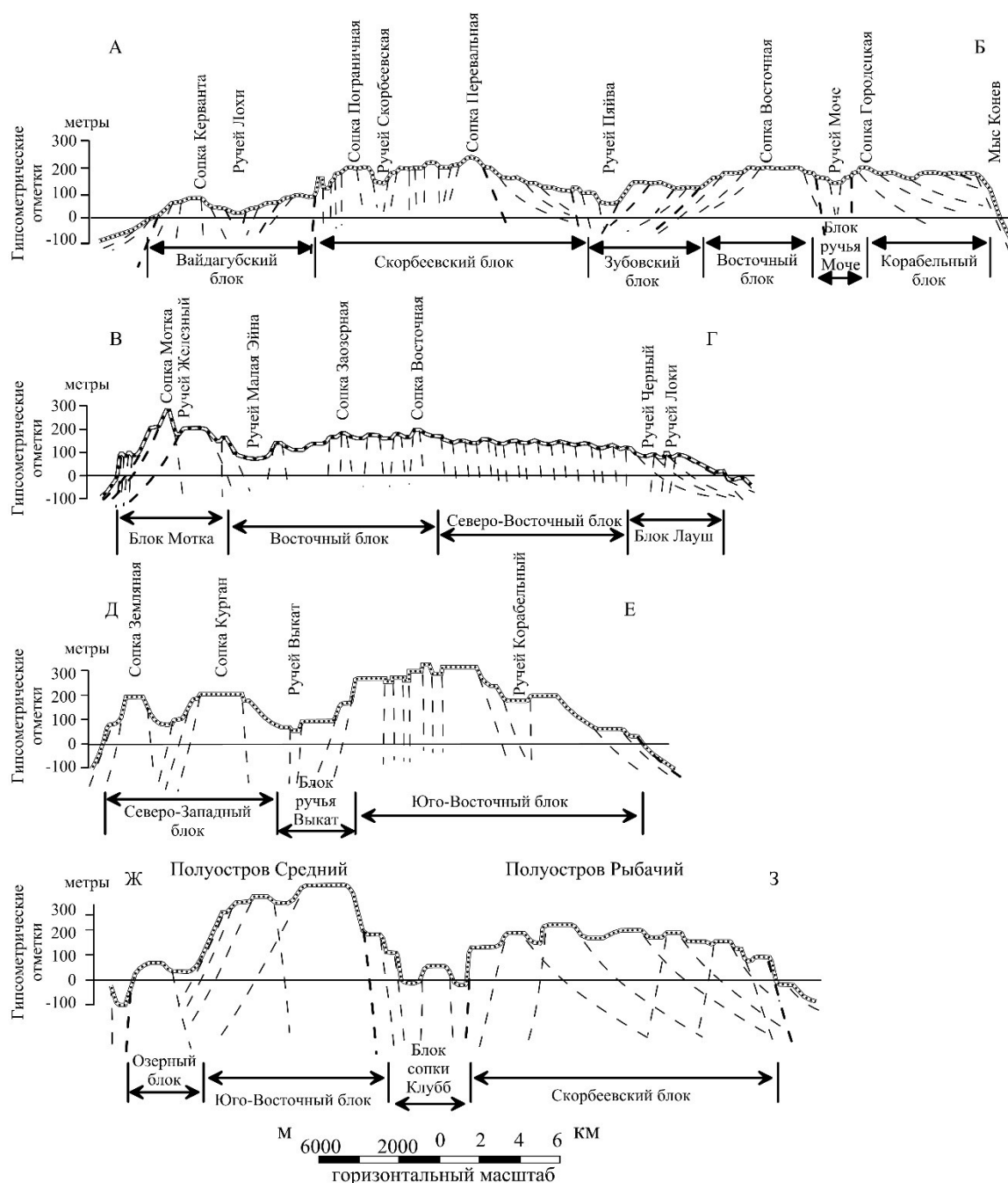


Рис. 3. Профили рельефа полуостровов Рыбачий и Средний. Пунктирные линии – предполагаемые вертикальные проекции линементов

Fig. 3. Relief profiles of the Rybachy and Sredny peninsulas. The dotted lines are the assumed vertical projections of the lineaments

С юго-востока к Скорбеевскому району примыкает Zubovskiy орографический район площадью около 135 км² (рис. 2), юго-восточная граница которого проведена по долине ручьев Средний и Малая Эйна, линия, соединяющая северо-восточный борт Zubovskoy губы и устьевую зону ручья Малая Эйна

(губа Эйна – южный берег п-ова Рыбачий). С юга орографический район упирается в возвышенность с крутыми склонами – от сопки Рокапахта (на западе) до вершины губы Эйна (на востоке; рис. 1). В районе средняя высота наддолинного рельефа 120 ± 5 м ($n = 40$), максимальная – 188 м. Наддолинный рельеф широкий, с плоскими структурными вершинами, склоны водоразделов прямые – от средней крутизны до пологих структурных поверхностей на севере (рисунки 2, 3). В западной части района много крупных озерных котловин ($S_w > 0.8$ км²), резко преобладают линейные озера северо-восточной и северо-западной ориентировки. Отмечается высокая заболоченность района, особенно южной части, на водоразделах повсеместно развит гольцовый тундровый ландшафт. Глубина базиса эрозии небольшая – в среднем 35 ± 1 м/км² ($n = 137$). Руслу водотоков прямые, изредка наблюдаются коленообразные изгибы, ручей Пяйва почти полностью пересекает полуостров.

С юго-востока к Зубовскому району примыкает Восточный орографический район площадью около 110 км² (рис. 2). Его юго-восточная граница проведена по 200-метровой горизонтали – линии соединяющей сопку Центральную и мыс Эйна (Мотовский залив; рис. 1). На севере он сочленяется с северо-восточным районом (рис. 2), в котором происходит резкая смена ориентировки элементов рельефа. Граница блока проводится от нижнего течения ручья Средний (на западе) до сопки Центральной (на востоке; рис. 1). В районе средняя высота наддолинного рельефа составляет 190 ± 5 м ($n = 40$), максимальная – 299.5 м. Наддолинный рельеф широкий, с плоскими структурными вершинами на юге и гребневидными вершинами на севере (рис. 2), резко преобладает северо-восточная ориентировка водораздельных пространств. Склоны водоразделов прямые ступенчатые, средней крутизны (рис. 3), к морю рельеф срезается крупной дизъюнктивной структурой, образуя отвесный уступ (рис. 2). Озерные котловины небольшие ($S_w < 0.3$ км²), в основном встречаются линейно вытянутые озера северо-восточной ориентировки. Северная часть района сильно заболочена. На водоразделах господствует гольцовый тундровый ландшафт, и только в устье ручья Большая Эйна встречается лесотундра. Глубина базиса эрозии в среднем 40 ± 3 м/км² ($n = 89$), что меньше чем математическое ожидание средней глубины местного базиса эрозии на п-ове Рыбачий. Руслу водотоков прямые с коленообразными изгибами. В районе находятся истоки трех крупных водотоков (ручьи Средний, Восточный и Зубовка), впадающих в Баренцево море.

С юго-востока к Восточному району примыкает орографический район ручья Моче площадью около 35 км² (рис. 2). Район представлен водосборным бассейном ручья. Северо-восточная граница проведена по водоразделу между ручьями Моче и Аникиева. Средняя высота долинного рельефа составляет 155 ± 15 м ($n = 11$), максимальная – 210 м. Долина ручья корытообразная троговидная, на высоте 130 м над уровнем моря выявляется характерное троговое плечо, склоны долины прямые ступенчатые средней крутизны (рис. 3). Ниже 100-метровой горизонтали развиты древние береговые линии (до 8 уровней; Митяев, 2014). Озерные котловины с очень маленькой площадью водного зеркала (всего 2 озера с $S_w > 0.05$ км² – Моче и у подножия сопки Центральной), резко преобладают озера овальной формы. Озеро Моче линейной формы с северо-восточной ориентировкой длинной оси. Отмечается небольшая заболоченность района (наиболее заболочена северная часть), повсеместно развит гольцовый тундровый ландшафт и только в устье ручья встречается древесная растительность. Руслу ручья Моче и всех его притоков прямые, очень редко наблюдаются их резкие изгибы, его базис эрозии в среднем составляет 54 ± 4 м/км² ($n = 52$).

С востока к району ручья Моче примыкает Корабельный орографический район площадью около 130 км² (рис. 2). Северо-восточная и северо-западная граница района проходит по резкой смене ориентировки элементов рельефа (с северо-восточного на северо-западное). Северо-западная граница проведена по долине ручья Аникиева, а северо-восточная по линии соединяющей мыс Башенка (восточный берег п-ова Рыбачий) через сопку Пузырева до долины ручья Аникиева (рис. 2). Средняя высота наддолинного рельефа составляет 185 ± 5 м ($n = 34$), максимальная – 233 м. Наддолинный рельеф широкий, с плоскими структурными вершинами, склоны прямые пологие (рис. 3). К морю рельеф обрывается почти отвесным уступом высотой более 100 м (рисунки 2, 3). Основное количество озерных котловин сосредоточено на западе района, они небольшие – $S_w < 0.2$ км², в основном линейной формы с северо-восточной ориентировкой длинной оси. Заболоченность района небольшая, господствует гольцовый тундровый ландшафт. Глубина базиса эрозии в среднем 44 ± 3 м/км² ($n = 110$),

что сопоставимо с математическим ожиданием среднего значения этого показателя на п-ове Рыбачий. Руслу всех ручьев прямые с резкими коленообразными изгибами.

К северу от Восточного района и района ручья Моче, между Zubовским и Корабельным районами, выделяется Северо-Восточный орографический район площадью 115 км^2 (рис. 2). Он выделен по резкой смене плановой ориентировки орографических элементов рельефа с северо-восточной (за пределами района) на северо-западную (в районе). Северная и северо-восточная граница района проводятся по перегибу рельефа, за которым трансэлювиальный ландшафт средней крутизны сменяется пологой прибрежной низменностью (рисунки 2, 3). Средняя высота наддолинного рельефа $130 \pm 5 \text{ м}$ ($n = 46$), максимальная – 213 м . Наддолинный рельеф узкий, с гребневидными вершинами, склоны прямые пологие (рис. 3). Озерные котловины небольшие – $S_w < 0.3 \text{ км}^2$, резко преобладают озера линейной формы с северо-западной ориентировкой длинной оси. Заболоченность района небольшая, повсеместно развит гольцовый тундровый ландшафт. Глубина базиса эрозии минимальная на п-ове Рыбачий – в среднем $33 \pm 1 \text{ м/км}^2$ ($n = 151$). Руслу ручьев прямые, изредка наблюдаются резкие коленообразные изгибы.

Границы орографического района губы Лауш ($S = 40 \text{ км}^2$) проводятся по вогнутым перегибам рельефа (рисунки 2, 3). Находится он севернее Северо-Восточного района. С южной стороны перегиб рельефа отделяет трансэлювиальный ландшафт от прибрежной низменности, с северной и северо-восточной стороны – береговой склон от субгоризонтальной равнины шельфа. Средняя высота наддолинного рельефа $70 \pm 5 \text{ м}$ ($n = 16$), максимальная – 128 м . Наддолинный рельеф широкий структурный, склоны прямые, пологие (рис. 3). Основное количество озерных котловин сосредоточено в восточной части, озера небольшие ($S_w < 0.1 \text{ км}^2$), есть и линейно вытянутые и овальные котловины. Отмечается небольшая заболоченность района, повсеместно развит гольцовый тундровый ландшафт. Глубина базиса эрозии в среднем $44 \pm 2 \text{ м/км}^2$ ($n = 56$), что сопоставимо с математическим ожиданием средней глубины местного базиса эрозии на п-ове Рыбачий. Руслу ручьев прямые, изредка наблюдаются коленообразные изгибы.

На Рыбачьем выделяется еще один орографический район сопки Мотка площадью 35 км^2 , резко отличающийся от остальной территории полуострова. Границы района проводятся по крупным рельефообразующим дизъюнктивным структурам, активированным в неотектонический этап и проявленным в рельефе уступом высотой от 50 до 250 м . Средняя высота наддолинного рельефа $165 \pm 15 \text{ м}$ ($n = 17$), максимальная – 286 м . Водораздел района купольного типа с широкими плоскими структурными вершинами, склоны прямые ступенчатые, иногда S-образные – от пологих до отвесных уступов (рисунки 2, 3). Озерные котловины небольшие ($S_w < 0.3 \text{ км}^2$), встречаются овальные и линейно вытянутые котловины без преобладающей ориентировки длинных осей. Водотоки опоясывающие (на севере) и оперяющие купольную структуру. В южной части района все нижние течения водотоков заключены в узкие открытые тектонические трещины (каньоны). Район слабо заболочен, господствует гольцовый тундровый ландшафт, у подножия сопки Рокапахты и в устье ручья Малая Эйна встречается древесная растительность. Глубина базиса эрозии в среднем $101 \pm 6 \text{ м/км}^2$ ($n = 60$), что сопоставимо с аналогичным показателем в низкогорных странах.

Необходимо отметить, что Zubовский орографический район разделяет п-ов Рыбачий на две части (рис. 2). Западная часть полуострова в плане имеет треугольную форму с вершиной на западе (участок берега между мысами Немецкий и Китский; рис. 1). Средняя высота наддолинного рельефа $140 \pm 7 \text{ м}$ ($n = 89$), с генеральным уклоном на запад, глубина базиса эрозии в среднем $50 \pm 2 \text{ м/км}^2$ ($n = 359$), протяженность водотоков менее 10 км . Береговая линия прямая, предопределена дизъюнктивными структурами, береговой склон крутой, часто наблюдаются отвесные скалы. Восточная часть полуострова в плане имеет почти квадратную форму. Средняя высота наддолинного рельефа $157 \pm 5 \text{ м}$ ($n = 134$), с генеральным уклоном на север. Глубина базиса эрозии в среднем $45 \pm 3 \text{ м/км}^2$ ($n = 817$). Длина водотоков достигает $10\text{--}15 \text{ км}$. На юге и юго-востоке (губа Эйна – мыс Баргаутный; рис. 1) береговая линия прямая, предопределена дизъюнктивными структурами, коренной склон крутой скалистый. На севере и северо-востоке береговая линия сильно изрезана мысами и губами разного масштаба, береговая зона пологая структурная, с широкими мелководными участками в подводной части.

Полуостров Средний (площадь 235 км^2) характеризуется нелинейными элементами наддолинного рельефа (водоразделов). Водоразделы широкие структурные купольного типа, склоны

прямые ступенчатые (рис. 3), от почти отвесных скал до полого наклонных поверхностей. Депрессии рельефа в плане дугообразной формы и с корытообразным поперечным сечением. Южная часть полуострова сильно заболочена, на ней много озер, в основном небольшой овальной формы ($S_w < 0.2 \text{ км}^2$), озера Палви, Питкяярви, Поропеллон, Земляное имеют площадь водного зеркала более 0.7 км^2 . Руслу большинства водотоков прямые оперяющие водоразделы. Долина ручья Выкат опоясывающего типа, отделяет юго-восточный водораздел купольного типа от Северо-Западного района. Долина ручья Корабельный секущего типа – расчленяет юго-восточный водораздел на две части. Средняя высота наддолинного рельефа $190 \pm 10 \text{ м}$ ($n = 75$), максимальная – около 350 м. Средняя глубина базиса эрозии $69 \pm 3 \text{ м/км}^2$ ($n = 215$), что в 1.5 раза больше, чем на п-ове Рыбачий. На водоразделах господствует гольцовый тундровый ландшафт, в депрессиях рельефа – лесотундровый. На Среднем выделяется четыре орографических района (рис. 2), ниже приведено обоснование их выделения.

Северо-Западный орографический район площадью 55 км^2 находится западнее долины ручья Выкат (рис. 2). Границы района проводятся по перегибам рельефа. Северо-восточная, западная и юго-западная граница – это уступ высотой 50–200 м, юго-восточная – перегиб рельефа в подножии склона, отделяющий трансэлювиальный ландшафт от субаквального. Средняя высота наддолинного рельефа $170 \pm 10 \text{ м}$ ($n = 17$), максимальная – 222 м. Наддолинный рельеф широкий структурный. Склоны прямые ступенчатые средней крутизны, к морю рельеф обрывается почти отвесным уступом (рис. 3). Озерных котловин немного, в основном овальной формы и небольшого размера ($S_w < 0.5 \text{ км}^2$). В депрессиях рельефа господствует лесотундровый ландшафт, на водоразделах – гольцовый тундровый ландшафт. Все ручьи в районе оперяющие. Глубина базиса эрозии $66 \pm 4 \text{ м/км}^2$ ($n = 56$), это ниже, чем в среднем на полуострове, хотя отличия недостоверные.

С востока к Северо-Западному району примыкает орографический район ручья Выкат площадью 40 км^2 (рис. 2). Восточная граница района проведена по перегибу рельефа в подножии крутого склона, отделяющего трансэлювиальный ландшафт от субаквального, южная граница – по смене ориентировки линейных элементов рельефа с северо-восточного на северо-западное направление. Средняя высота долинного рельефа $130 \pm 15 \text{ м}$ ($n = 11$), максимальная – 187 м. Долина ручья широкая трогообразная, до 100-метровой горизонтали встречаются выровненные субгоризонтальные структурные и террасовые поверхности (рис. 3; Митяев, 2014). Озерные котловины сосредоточены в южной части района, они овальной формы и небольшого размера ($S_w < 0.3 \text{ км}^2$). В северной части района господствует лесотундровый ландшафт, в южной части – болотно-тундровый, на возвышенностях – гольцовый тундровый ландшафт. Русло ручья Выкат (и его притоков) прямое, только в нижнем течении встречаются резкие изгибы. Долина ручья Выкат опоясывает восточный купольно-блоковый водораздел. Средняя глубина базиса эрозии $71 \pm 5 \text{ м/км}^2$ ($n = 32$), что сопоставимо с математическим ожиданием среднего значения этого показателя на Среднем.

С востока к району ручья Выкат примыкает Юго-Восточный орографический район площадью 95 км^2 (рис. 2). Северо-восточная и юго-восточная граница района – уступ высотой до 200 м, южная и западная граница – перегиб рельефа, отделяющий трансэлювиальный ландшафт от субаквального. Средняя высота наддолинного рельефа $245 \pm 15 \text{ м}$ ($n = 34$), максимальная – 344 м. Наддолинный рельеф широкий структурный, склоны прямые ступенчатые средней крутизны, к морю рельеф обрывается почти отвесным уступом (рис. 3). Озерные котловины овальной формы небольшого размера ($S_w < 0.1 \text{ км}^2$), заболоченность территории небольшая. В долинах ручьев и на берегу губы Большая Мотка господствует лесотундровый ландшафт, на остальной территории гольцовый. Ручей Корабельный разделяет купольно-блоковый водораздел на западную и восточную части. Восточная часть – это линейный водораздел северо-восточной ориентировки, западная – купольно-блоковый водораздел (рис. 3). Остальные ручьи относятся к оперяющим водотокам. Глубина базиса эрозии в среднем $79 \pm 6 \text{ м/км}^2$ ($n = 87$), это максимальная амплитуда рельефа на полуострове.

В южной части п-ова Средний выделяется Озерный орографический район площадью 45 км^2 (рис. 2). Юго-западная граница района – это уступ высотой до 100 м, северо-восточная – резкий перегиб рельефа в подножии склона, отделяющий трансэлювиальный ландшафт от субаквального. Средняя высота долинного рельефа $110 \pm 10 \text{ м}$ ($n = 13$), максимальная – 191 м. Долинный рельеф

широкий структурный, много локальных депрессий и выровненных поверхностей (выделяется до 9 уровней морских террас; Митяев, 2014), к морю рельеф обрывается почти отвесным уступом (рис. 3). Много озерных котловин овальной формы, но встречаются и линейно-вытянутые озера с ориентировкой длинной оси на северо-запад. Озера в основном небольшие ($S_w < 0.2 \text{ км}^2$), но озера Палви, Питкяярви, Поропеллон крупные ($S_w > 0.7 \text{ км}^2$). На северо-западе района господствует лесотундровый ландшафт, на остальной территории – озерно-тундровый. Ручьи короткие, объединяют озера в озерно-ручьевые системы, русла ручьев прямые, иногда с резкими изгибами. Глубина базиса эрозии $51 \pm 4 \text{ м/км}^2$ ($n = 40$), это минимальная амплитуда рельефа на п-ове Средний.

Между полуостровами Средний и Рыбачий выделяется орографический район сопки Клубб площадью около 15 км^2 (рис. 2). Все границы района проводятся по рельефообразующим дизъюнктивным структурам, активированным в неотектонический этап и выраженные в рельефе крутым уступом высотой до 250 м. Средняя высота наддолинного рельефа $75 \pm 20 \text{ м}$ ($n = 4$), максимальная – 105 м. Водораздел района купольно-блокового типа с широкой структурной поверхностью, наклоненной на север-запад. Склоны прямые крутые, иногда ступенчатые (рис. 3). Озерные котловины маленькие ($S_w < 0.01 \text{ км}^2$), встречаются только озера овальной формы, южная часть района заболочена. На северо-западе района господствует гольцовый тундровый ландшафт, на юго-востоке – лесотундровый. Глубина базиса эрозии в среднем $105 \pm 5 \text{ м/км}^2$ ($n = 33$), это наибольшее значение на территории исследования, сопоставимо с амплитудой рельефа в блоке сопки Мотка и с аналогичными показателями в низкогорных странах.

Вертикальная расчлененность территории. Исследуя рельеф северо-запада Балтийского щита, автор априори принимает следующую концепцию: глубины местных базисов эрозии (вертикальная расчлененность рельефа) находятся в тесной связи с неотектоническим поднятием Фенноскандии (со всеми типами тектонических движений на территории) и мало зависят от географического положения территории.

В среднем вертикальная расчлененность территории полуостровов составляет $55 \pm 1 \text{ м/км}^2$ ($n = 1289$). Глубина базиса эрозии на Рыбачьем ($49 \pm 1 \text{ м/км}^2$, $n = 1050$) в среднем в 1.5 раза меньше, чем на Среднем ($69 \pm 3 \text{ м/км}^2$, $n = 206$). Во всех орографических районах вертикальная расчлененность рельефа закономерно увеличивается от центральных частей к периферии (рис. 4).

Фоновые значения глубины базиса эрозии для п-ова Средний составляют $60\text{--}85 \text{ м/км}^2$, максимальная амплитуда рельефа достигает $250\text{--}270 \text{ м/км}^2$. Повышенные (часто аномальные) значения вертикальной расчлененности рельефа почти полностью опоясывают полуостров (рис. 4) и парагенетически связаны с рельефообразующими дизъюнктивными структурами. Границы выделенных на Среднем орографических районов подчеркиваются повышенными значениями вертикальной расчлененности рельефа. В каждом выделенном орографическом районе значения глубины местного базиса эрозии отличаются от аналогичного показателя в сопредельном районе (таблица).

Северо-Западный и Юго-Восточный орографические районы – это купольно-блоковые морфоструктуры, опоясанные зонами повышенных значений вертикальной расчлененности рельефа. В Юго-Восточном районе глубина базиса эрозии больше ($79 \pm 6 \text{ м/км}^2$), чем среднее значение для полуострова, а в Северо-Западном ($66 \pm 4 \text{ м/км}^2$) сопоставима с математическим ожиданием среднего значения этого показателя для полуострова. Разделяет купольные морфоструктуры грабеновидная морфоструктура ручья Выкат, где средняя вертикальная расчлененность рельефа ($71 \pm 5 \text{ м/км}^2$) сопоставима с математическим ожиданием этого показателя на полуострове, но во внутренней области глубина базиса эрозии небольшая – в среднем $53 \pm 4 \text{ м/км}^2$. Озерный орографический район представляет собой прогиб на стыке двух мегаструктур: Мурманского блока Балтийского щита и Кольской микроплиты. Прогиб сформирован в сбросо-сдвиговой зоне Кольско-Канинского разлома (Сенин, Шипилов, 1993) и представляет собой не до конца раскрытую рифтовую структуру, соединяющую Варангер-фьорд и Мотовский залив. В прогибе средняя глубина базиса эрозии небольшая – $44 \pm 3 \text{ м/км}^2$ (минимум на п-ове Средний; таблица), несмотря на высокие значения на границе морфоструктуры с Мурманским берегом.

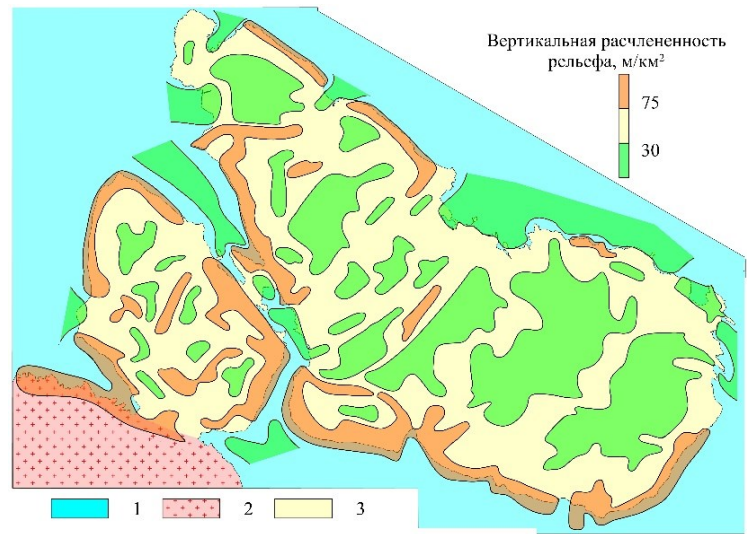


Рис. 4. Вертикальная расчлененность рельефа полуостровов Средний и Рыбачий:
1 – шельф Баренцева моря, 2 – Мурманский берег (архейский гранит-мigmatитовый пояс), 3 – полуострова Рыбачий и Средний (позднепротерозойский комплекс осадочных пород)
Fig. 4. Vertical dissection of the relief, Sredny and Rybachy peninsulas:
1 – Barents Sea shelf, 2 – Murmansk coast (Archean granite-migmatite belt), 3 – Rybachy and Sredny peninsulas (Late Proterozoic sedimentary rock complex)

Вертикальная расчлененность рельефа и густота линейментов на полуостровах Средний и Рыбачий
Vertical dissection of the relief and lineament density, Sredny and Rybachy peninsulas

Орографический район		Расчлененность рельефа, м/км ²	Количество линеаментов	Средняя густота линеаментов, км/км ²
номер	название			
Полуостров Рыбачий				
1	Вайдагубский ($n = 110$)	41±3	26	0.93±0.06
2	Скорбеевский ($n = 249$)	54±2	69	1.15±0.03
3	Губы Зубовская ($n = 137$)	35±1	34	1.05±0.05
4	Сопки Мотка ($n = 60$)	101±6	18	1.46±0.14
5	Восточный ($n = 89$)	40±3	34	1.28±0.07
6	Северо-Восточный ($n = 151$)	33±1	46	1.27±0.04
7	Губы Лауш ($n = 56$)	44±2	17	1.41±0.10
8	Ручья Моче ($n = 52$)	54±4	16	1.66±0.08
9	Корабельный ($n = 110$)	44±3	41	1.25±0.05
10	Сопки Клуб ($n = 33$)	105±6	15	1.46±0.24
Полуостров Средний				
11	Северо-Западный ($n = 47$)	66±4	18	0.94±0.05
12	Юго-Восточный ($n = 87$)	79±6	38	0.91±0.06
13	Ручья Выкат ($n = 32$)	71±5	15	1.06±0.03
14	Озерный ($n = 40$)	51±4	15	0.99±0.04

Территория п-ова Рыбачий более неоднородна по наблюдаемым амплитудам рельефа. В целом фоновые значения глубины базиса эрозии составляют 46–52 м/км², максимально наблюдаемая амплитуда рельефа превышает 300 м/км². В Вайдагубском и Скорбеевском орографических районах фоновые значения глубины базиса эрозии 47–57 м/км², амплитуда рельефа не превышает 150 м/км². В орографических районах Восточном, Северо-Восточном, Корабельном, ручья Моче и губы Лауш, несмотря на большое количество ураганно высоких показателей амплитуд рельефа, фоновые значения глубины базиса эрозии небольшие – 39–51 м/км².

Для западной части п-ова Рыбачий характерны повышенные значения вертикальной расчлененности рельефа (кроме северо-западного берега; рис. 4), парагенетически связанные с дизъюнктивными структурами.

В восточной части п-ова Рыбачий повышенные значения вертикальной расчлененности рельефа приурочены к южному и юго-восточному берегу, где амплитуда рельефа достигает 300 м и подчеркивается отвесными уступами. На северном и северо-восточном берегу Рыбачьего амплитуда рельефа редко превышает 100 м, вертикальная расчлененность рельефа постепенно снижается в направлении моря с 40–60 на полуострове до 10–20 м/км² на шельфе, что, вероятно, свидетельствует об отсутствии активных дизъюнктивных структур в этой зоне сочленения суши и моря.

Исходя из поля вертикальной расчлененности рельефа и орогидрографических особенностей п-ова Рыбачий, можно сделать предположение, что западная часть территории (включая Зубовский район) в новейшее время представляет собой ассиметричную блок-антиклинальную структуру северо-западного простираения. Западное крыло формирует Вайдагубский морфоструктурный блок с высотой наддолинного рельефа 70 ± 5 м ($n = 24$), наклоненного на северо-запад под углом 15–20 м/км. Восточное крыло формирует Зубовская морфоструктурная зона с высотой наддолинного рельефа 120 ± 5 м ($n = 40$), наклоненного на юго-восток под углом 10–12 м/км. Замок структуры располагается в Скорбеевском морфоструктурном блоке с уклоном поверхности наддолинного рельефа на северо-запад и юго-восток (под углом 5–6 и 3–5 м/км соответственно). Следовательно, блок-антиклинальная структура ассиметрична, имеет более короткое и пологое восточное крыло. Это активный тектонический блок Кольской микроплиты, где амплитуда поднятия фундамента превышает 3 км (Сенин, Шипилов, 1993), границы блока прослеживаются по рельефообразующим дизъюнктивным структурам.

Восточная часть п-ова Рыбачий в новейшее время, вероятно, представляет собой морфоструктурный блок северо-восточного простираения, который с южной стороны срезан рельефообразующей дизъюнктивной структурой. Возможно, это либо замок блок-антиклинали, либо верхнее крыло флексуры, кровля которой срезана денудационными процессами на 150–175 м. Может быть, что эта полого наклонная часть Кольской микроплиты является остатком древнего надвига, который на границе с Балтийским щитом срезан разломом Карпинского.

С аномальной (в регионе) вертикальной расчлененностью рельефа на исследуемой территории выделяются еще морфоструктурные блоки сопки Клубб и Мотка (таблица). Они блокового поднятия. Блок сопки Клубб – относительно поднятая морфоструктура внутри грабена, формирующего губу Большая Волоковая и бухту Озерко (губа Большая Мотка). Блоково-купольное поднятие сопки Мотка, возможно, было отчленено от п-ова Средний и присоединено к п-ову Рыбачий в результате раздвигания земной коры при формировании грабена губы Большая Мотка. При этом в результате бокового давления со стороны рифтовой структуры Мотовского залива произошло вдавливание блока в структуры п-ова Рыбачий и формирование на границе блока дугового поднятия (от вершины губы Эйна до сопки Рокапахта), сложенного брекчиями и конгломератами (Геология ..., 1958; Геологическая ..., 2001).

Линейные элементы рельефа. Известно, что чем интенсивнее тектонические движения литосферы, тем больше образуется дизъюнктивных структур различного масштаба. Особенно интенсивно разрывы сплошности земной коры формируются на границах структур с разнонаправленными движениями (либо однонаправленными, но с различными скоростями). Поэтому в поле густоты линеаментов выделяются структуры с различной новейшей тектонической активностью земной коры (Морфоструктурные ..., 1968). При этом главное направление линеаментов (в конкретной структуре) перпендикулярно основным напряжениям в земной коре (Пермяков, 1954), что неоднократно отмечалось для севера Кольского полуострова (Рихтер, 1936; Никонов, 1967; Кошечкин, 1969; Кошечкин, Кудлаева, 1969; Орлова, 1975; Mitiaev, Gierasimova, 1994; Митяев, 2001, 2014).

В выделенных морфоструктурных блоках на полуостровах Рыбачий и Средний (рис. 2) анализировалась густота линеаментов (рис. 5) выделенных на топокарте и их пространственная ориентировка.

Густота линеаментов в среднем для исследуемой территории составляет 1.17 ± 0.02 км/км² ($n = 392$). На Рыбачьем этот показатель равен 1.23 ± 0.01 км/км² ($n = 301$), на Среднем – 0.96 ± 0.03 км/км² ($n = 86$). Значения густоты линеаментов изменяются от 0.3 до 3.0 км/км². Максимальные значения густоты линеаментов наблюдаются в морфоструктурной зоне ручья Моче и по периферии Корабельного морфоструктурного блока (рис. 6), где средняя густота линеаментов составляет 2.16 ± 0.04 км/км² (максимум – 2.88 км/км², $n = 8$).

Границы всех морфоструктур приурочены к зонам повышенных/пониженных значений густоты линеаментов (рис. 6; границы блоков по зонам низких значений густоты линеаментов прослеживаются только на северо-востоке п-ова Рыбачий). Внутренние области 12 морфоструктур характеризуются низкими значениями густоты линеаментов, что свидетельствует о жесткости блоков земной коры и разрядке напряжения на границах структур, что подчеркивает блоковую тектонику региона (Кошечкин, 1969; Орлова, 1975; Митяев, 2001, 2014). В двух морфоструктурах поле густоты линеаментов имеет иной характер. В морфоструктурной зоне ручья Моче густота линеаментов распределена равномерно при высоких значениях, что подчеркивает ее тектоническую природу, но часть линейных элементов рельефа, возможно, экзогенного происхождения. В морфоструктурном блоке губы Лауш густота линеаментов увеличивается к внешней границе, расположенной на шельфе. Вероятно, количество линеаментов увеличивается на внешней границе блока в результате сочетания линейных эндогенных и экзогенных элементов рельефа (за счет разрушения сланцев, выходящих на дневную поверхность только в этой части полуострова; Геологическая ..., 2001; рис 7).



Рис. 5. Схема линеаментов (мегатрещин) полуостровов Рыбачий и Средний
Fig. 5. Scheme of lineaments (megacracks), Rybachy and Sredny peninsulas

По густоте линейных элементов рельефа сильно различаются западная и восточная части п-ова Рыбачий. В восточной части этот показатель в среднем составляет 1.32 ± 0.03 км/км² ($n = 129$), в западной – 1.08 ± 0.03 км/км² ($n = 154$).

В губе Зубовская на Рыбачьем и ручье Выкат на Среднем, которые разделяют полуострова на части, значения густоты линеаментов аналогичны (таблица). Но в первой зоне этот показатель достоверно меньше, а во второй – достоверно больше, чем в сопредельных блоках. Повышенные значения густоты линеаментов (помимо блоков ручья Моче и губы Лауш) выявляются в морфоструктурных блоках (сопок Мотка и Клубб; таблица), расположенных в зоне рельефообразующей дизъюнктивной структуры.

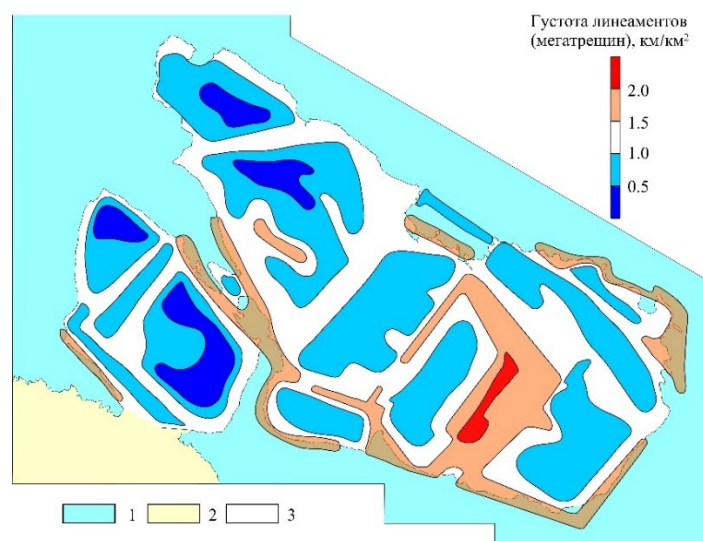


Рис. 6. Схема густоты линеаментов полуостровов Рыбачий и Средний:

1 – шельф Баренцева моря, 2 – Мурманский берег (архейский гранит-мigmatитовый пояс), 3 – полуострова Рыбачий и Средний (позднепротерозойский комплекс осадочных пород)

Fig. 6. Lineament density diagram, Rybachy and Sredny peninsulas:

1 – Barents Sea shelf, 2 – Murmansk coast (Archean granite-migmatite belt), 3 – Rybachy and Sredny peninsulas (Late Proterozoic sedimentary rock complex)

На всей исследуемой территории резко преобладают линеаменты диагональной системы, особенно северо-восточного направления (рис. 8). Менее широко развиты линеаменты северо-западного и субмеридионального направления (в 9 морфоструктурах; рис. 9), а линейные элементы рельефа субширотного простирания встречаются редко. При переходе от одной морфоструктуры к сопредельной генеральное направление линеаментов меняется (рис. 9). Однолучевые розы-диаграммы ориентировки линеаментов выявлены в морфоструктурах сопки Клубб, губы Лауш, ручьев Выкат и Озерной. Многолучевые розы-диаграммы (более 4 лучей) наблюдаются в юго-восточной части п-ова Рыбачий (зона ручья Моче, Восточный и Карабельный блоки), где, вероятно, происходили (или происходят?) разнонаправленные вертикальные и горизонтальные движения. В других морфоструктурах розы-диаграммы имеют 2–3 луча, но с одним главным направлением (рис. 9).

Таким образом, в поле густоты линеаментов четко выделяются морфоструктуры (рис. 6), границы которых во многом совпадают с таковыми орографических районов. На полуострове Средний хорошо выражена линейная грабенноидная зона ручья Выкат. Зона разделяет купольные морфоструктурные блоки полуострова (Северо-Западный и Юго-Восточный) с разной скоростью поднятия. Если последняя активизация поднятия блоков гляциоизостатическая (нет никаких объективных факторов о другом времени активизации), а амплитуда поднятия различается на 150–175 м, то это соответствует разнице в скорости на 1–2 мм в год за послеледниковое время (средняя скорость эпейрогенического поднятия Кольского полуострова в голоцене; Митяев, 2001). Аналогичный морфоструктурный блок сопки Мотка хорошо выделяется на южном берегу п-ова Рыбачий, по амплитуде поднятия он занимает промежуточное положение между Юго-Восточным и Северо-Западным блоками п-ова Средний. Относительно первой амплитуда поднятия меньше на 50–60 м, а второй – больше на 100–120 м. Морфоструктурный блок сопки Мотка отделен от Юго-Восточного блока п-ова Средний линейной зоной губы Большая Мотка, которая представляет собой район опускания с амплитудой более 200 м. Эта зона имеет сходство с зоной ручья Выкат, которая вовлечена в поднятие п-ова Средний. Северная часть Среднего (Юго-Восточный, Северо-Западный блоки и зона ручья Выкат) с севера и юга ограничена линейными морфоструктурными зонами сопки Клубб и Озерной. Морфоструктурная зона сопки Клубб – это поднятая часть грабенноидной зоны губы Большая Волоковая – бухта Озерко. Озерная морфоструктурная зона – это прогиб, расположенный на границе поднимающихся морфоструктурных блоков (Мурманский берег, п-ов Средний), парагенетически связанный с грабенноидной морфоструктурной зоной губ Малая Волоковая и Кутвая.



Рис. 7. Схема литологического строения полуостровов Рыбачий и Средний (по: Геология ..., 1958; Геологическая ..., 2001):

1 – глинистые сланцы; 2 – полевошпато-кварцевые песчаники, алевриты, глинистые и песчано-глинистые сланцы; 3 – кварц-полимиктовые и конгломератовые песчаники с линзообразными прослоями глинистых и песчано-глинистых сланцев; 4 – межформационные конгломераты и брекчии; 5 – тонкозернистые, тонкоплитчатые, кварц-полевошпатовые, кварцевые и полимиктовые песчаники с пачками черных глинистых сланцев; 6 – аркозовые песчаники с конгломератом; 7 – мелкозернистые, слоистые кварц-полевошпатовые и полимиктовые песчаники с пачками глинистых песчаников; 8 – среднезернистые, массивные, тонкоплитчатые кварцевые песчаники; 9 – тонкозернистые, тонкоплитчатые кварцевые песчаники с прослоями глинистых сланцев и глауконитовых песчаников; 10 – геологические границы; 11 – крупные дизъюнктивные структуры, хорошо выраженные в рельефе

Fig. 7. Scheme of the lithological structure of the Rybachy and Sredny peninsulas (Geology ..., 1958; Geological ..., 2001):

1 – clay shales; 2 – feldspar-quartz sandstones, siltstones, clayey and sandy-clayey shales; 3 – quartz-polymictic and conglomerate sandstones with lens-shaped interlayers of clayey and sandy-clayey shales; 4 – interformational conglomerates and breccias; 5 – fine-grained, fine-platy, quartz-feldspar, quartz and polymictic sandstones with beds of black clayey shales; 6 – arkosic sandstones with conglomerate; 7 – fine-grained, laminated quartz-feldspar and polymictic sandstones with beds of clayey sandstones; 8 – medium-grained, massive, fine-platy quartz sandstones; 9 – fine-grained, thin-plated quartz sandstones with interlayers of clay shales and glauconitic sandstones; 10 – geological boundaries; 11 – large disjunctive structures, well expressed in relief

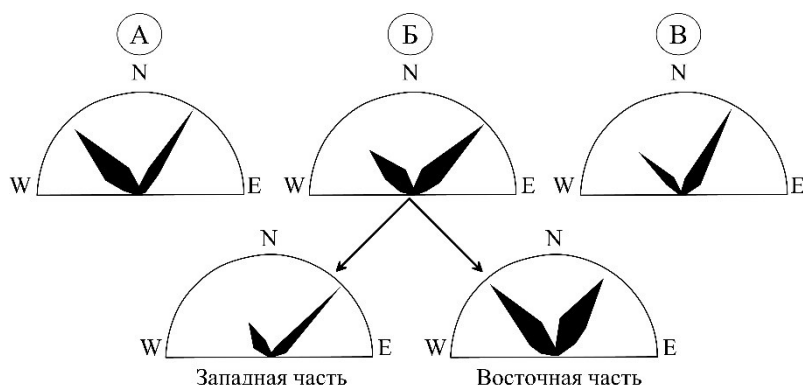


Рис. 8. Сводные розы-диаграммы ориентировки линейментов:

А – вся территория исследований; Б – п-ов Рыбачий (запад – западная часть, восток – восточная часть); В – п-ов Средний

Fig. 8. Summary rose diagrams of lineament orientation:

А – the entire research area; Б – Rybachy Peninsula (west – the western part, east – the eastern part); В – the Sredny Peninsula

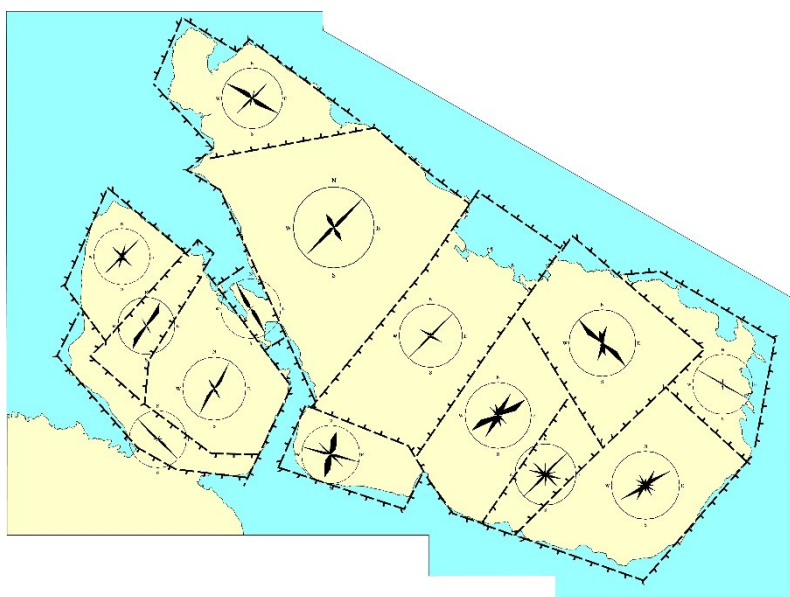


Рис. 9. Розы-диаграммы ориентировки линейных элементов рельефа в орографических районах полуостровов Средний и Рыбачий

Fig. 9. Rose diagrams of the orientation of linear relief elements in the orographic regions of the Sredny and Rybachy peninsulas

Анализируя розы-диаграммы ориентировки линеаментов п-ова Средний и поле их густоты, можно допустить, что купольные морфоструктурные блоки испытывают поднятие при всестороннем сжатии, а разделяющая их зона – опускание при растяжении (при этом борта прогиба опущены ассиметрично).

Поле густоты линеаментов на п-ове Рыбачий (рис. 6) позволяет выделить западную и восточную части. В западной части наиболее интенсивное поднятие испытал Скорбеевский морфоструктурный блок, в пределах которого можно выделить северо-восточный, юго-западный и центральный районы (рис. 6). Разница в амплитудах наддолинного рельефа в этих частях менее 20 м, что дает основание считать Скорбеевский морфоструктурный блок единым. Амплитуда поднятия Скорбеевского морфоструктурного блока больше, чем сопредельных с ним структур – Вайдагубского блока и зоны губы Зубовская. С Вайдагубским блоком разница амплитуд наддолинного рельефа составляет 120–130 м (следовательно, скорость поднятия различаются менее чем на 1 мм в год в послеледниковое время), а с зоной губы Зубовская – менее 60 м, что, возможно, связано с инверсией движения зоны (поднятие сменилось опусканием). По розам-диаграммам линеаментов можно допустить, что Скорбеевский и Вайдагубский блоки испытывают сжатие и вследствие этого поднимаются, а зона губы Зубовская – растяжение и опускание.

В восточной части п-ова Рыбачий наиболее сильные напряжения испытывает морфоструктурная зона ручья Моче, возможно, это закрывающийся прогиб, в результате двухстороннего сжатия Восточным и Корабельным блоками. В свою очередь морфоструктурные блоки испытывают сжатие, в результате чего поднимаются. Скорость поднятия этих морфоструктурных блоков больше, чем поднятие в восточной части п-ова Рыбачий, в результате наддолинный рельеф на 20–30 м выше.

В морфоструктурных блоках губы Лауш и Северо-Восточном наддолинный рельеф резко ассиметричен. Возможно, перекося рельефа отражает напряжения, возникающие при давлении со стороны шельфа Баренцева моря и жесткостью юго-восточной части п-ова Рыбачий. В результате морфоструктурный Северо-Восточный блок испытал нелинейную деформацию рельефа (скупивание), возможно, без разрыва сплошности, и в силу того, что этот морфоструктурный блок наиболее пластичный на п-ове Рыбачий. Эти два морфоструктурных блока отстают в поднятии от южных блоков, но их амплитуда поднятия сопоставима с амплитудами поднятия в западной части полуострова

(Северо-Восточного блока с зоной губы Зубовская, а блока губы Лауш с Вайдагубским блоком). Совместно эти морфоструктурные блоки формируют флексуру с замком в зоне сочленения блоков, слабонаклонную поверхность вдоль линии, соединяющей устье ручья Аникиева и мыс западнее мыса Черный (северный берег полуострова). На эти морфоструктурные блоки основное давление приходится с шельфа Баренцева моря, в результате оба блока поднимаются и, возможно, надвигаются на южную часть п-ова Рыбачий.

Заключение

В тектоническом плане фундамент п-ова Средний опущен относительно основания п-ова Рыбачий примерно на 350 м (Геология ..., 1958). Поэтому в пределах п-ова Средний сохранились горные породы вендского и позднее рифейского возраста, которых нет на п-ове Рыбачий (рис. 7). Опускание фундамента фиксируется по крупному сбросу между полуостровами. Падение плоскости сброса северо-восточное, угол 65–75 град., что позволяет рассматривать его как зону надвига (Геология ..., 1958). В позднем кайнозое полуострова Средний и Рыбачий устойчиво поднимаются, но амплитуда поднятия купольных морфоструктурных блоков п-ова Средний больше, чем общее поднятие п-ова Рыбачий, что, вероятно, отражает разную скорость поднятия.

Полуостров Средний – это единая поднимающаяся мегаструктура с блоковой делимостью верхней части литосферы, в которой сформирован структурный рельеф купольного типа. Полуостров Рыбачий – это мегаструктура из двух частей (западной и восточной), где западная часть – мегаструктура блоковой делимостью земной коры, и где наддолинный рельеф сформирован блок-антиклинальным поднятием. Мегаструктура восточной части в свою очередь также состоит из частей (южной и северной). Южная часть – интенсивно поднимающийся морфоструктурный блок, северная – нелинейная (флексура или надвиг) структура, возможно, надвинутая на южную часть п-ова Рыбачий.

Необходимо отметить, что в современное время энергия рельефа п-ова Средний больше, а тектоническая раздробленность меньше, чем на п-ове Рыбачий. Если в целом тектоническая раздробленность п-ова Средний в среднем на 20 % меньше, чем п-ова Рыбачий (от восточной части отличается на 30 %, а от западной – на 10 %). Следовательно, фундамент мегаструктуры п-ова Средний более жесткий, но в современное время дневная поверхность эродируется быстрее, чем на п-ове Рыбачий. При этом амплитуда послеледникового поднятия мегаструктуры п-ова Средний на 100–140 м больше, чем амплитуда поднятия мегаструктуры п-ова Рыбачий. Следовательно, можно предположить, что на п-ове Рыбачий часть тектонической активности направлена не на вертикальное перемещение блоков земной коры, а на латеральное перемещение структур. Основные напряжения земной коры на обоих полуостровах возникают при сжимающих усилиях с двух сторон – с северо-запада (со стороны Срединно-Атлантического хребта) и северо-востока (хребта Гаккеля).

Работа выполнена по теме «Структурно-динамические трансформации морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ госрегистрации 124013000709-9) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. *Геология СССР*. Т. 27. Ч. I. Мурманская область. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 714 с.
2. *Геологическая карта Кольского региона* / Под ред. Ф. П. Митрофанова. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001.
3. *Кошечкин Б. И.* Дифференцированные новейшие тектонические движения верхнеплейстоценового и голоценового времени в северо-восточной Фенноскандии // *Современные движения и глубинное строение Кольского полуострова*. Л.: Наука, 1969. С. 8–18.
4. *Кошечкин Б. И., Кудлаева А. Л.* Анализ расчлененности рельефа Кольского полуострова в целях изучения новейших тектонических движений // *Основные проблемы геоморфологии и стратиграфии антропогена Кольского полуострова*. Л.: Наука, 1969. С. 141–145.
5. *Митяев М. В.* Морфотектоника и позднечетвертичная история формирования Мурманского побережья и прилегающего шельфа Баренцева моря: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. М., 2001. 22 с.

6. Митяев М. В. Мурманское побережье (геолого-геоморфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. 226 с.
7. Мусатов Е. Е. Кайнозойская геодинамика материкового обрамления Евразийского суббассейна Северного Ледовитого океана // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1996. С. 91–101.
8. Морфоструктурные методы изучения тектоники закрытых платформенных нефтегазоносных областей / И. Г. Гольбрайх, В. В. Забалуев, А. Н. Ласточкин и др. Л.: Недра, 1968. 151 с.
9. Никонов А. А. Проблемы неотектоники северо-восточной части Балтийского щита // Тектонические движения и новейшие структуры земной коры. М.: Наука, 1967. С. 57–71.
10. Объяснительная записка к тектонической карте Баренцева моря и северной части Европейской России. М 1:2 500 000 / В. И. Богацкий, Н. А. Богданов, С. Л. Костюченко, Б. В. Сенин, С. Ф. Соболев, Э. В. Шипилов, В. Е. Хаин. М.: Изд-во ИЛ РАН, 1996. 94 с.
11. Орлова А. В. Блоковые структуры и рельеф. М.: Недра, 1975. 232 с.
12. Пермяков Е. Н. Основы методики использования трещиноватости горных пород для изучения тектоники платформенных областей // Тр. ВНИГРИ. 1954. Вып. 2. С. 43–48.
13. Рихтер Г. Д. Орографические районы Кольского полуострова // Тр. Ин-та физической географии АН СССР. 1936. Вып. 19. С. 7–11.
14. Сенин Б. В., Шипилов Э. В. Классификация и номенклатура региональных структурных элементов метаплатформы // Осадочный чехол Западно-Арктической метаплатформы. Мурманск: Север, 1993. С. 16–25.
15. Mitiaev M. V., Gierasimova M. V. Morphological structure and neotectonics of coastal zone of the Murmansk east sea-shore (Watershed zone of the Voronia and Rynda Rivers) // Wyprawq Geograficzne na Spitsbergen. Sesja Polarna. Poland, Lublin, 1994. P. 79–87.

References

1. *Geologiya SSSR. T. 27. Ch. I. Murmanskaya oblast'* [Geologiya USSR. Vol. 27, Part I. Murmanskaya oblast']. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1958, 714 p. (In Russ.).
2. *Geologicheskaya karta Kol'skogo regiona* [Geological map of the Kola region]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2001 (In Russ.).
3. Koshechkin V. I. *Differentsirovannye noveyshie tektonicheskie dvizheniya verkhnepleystotsenovogo i golotsenovogo vremeni v severo-vostochnoy Fennoskandii* [Differentiated recent tectonic movements of the Upper Pleistocene and Holocene time in northeastern Fennoscandia]. *Sovremennye dvizheniya i glubinnoe stroenie Kol'skogo poluostrova* [Modern movements and deep structure of the Kola Peninsula]. Leningrad, Nauka, 1969, pp. 8–18 (In Russ.).
4. Koshechkin B. I., Kudlaeva A. L. *Analiz raschlenennosti rel'efa Kol'skogo poluostrova v tselyakh izucheniya noveyshikh tektonicheskikh dvizheniy* [Analysis of the dissection of the relief of the Kola Peninsula for the purpose of studying the latest tectonic movements]. *Osnovnye problemy geomorfologii i stratigrafii antropogena Kol'skogo poluostrova* [Main problems of geomorphology and stratigraphy of the anthropogene of the Kola Peninsula]. Leningrad, Nauka, 1969, pp. 141–145 (In Russ.).
5. Mityaev M. V. *Morfotektonika i pozdnechetvertichnaya istoriya formirovaniya Murmanskogo poberezh'ya i prilgayushchego shel'fa Barentseva morya*. Avtoreferat diss. kand. geol.-mineral. nauk [Morphotectonics and late Quaternary history of the formation of the Murmansk coast and the adjacent shelf of the Barents Sea. PhD (Geology and Mineralogy) diss.]. Moscow, MGGA, 2001, 22 p. (In Russ.).
6. Mityaev M. V. *Murmanskoe poberezh'e (geologo-geomorfologicheskie i klimaticheskie osobennosti, sovremennye geologicheskie protsessy)* [Murmansk coast (geological, geomorphological and climatic features, modern geological processes)]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2014, 226 p. (In Russ.).
7. Musatov E. E. *Kaynozoyetskaya geodinamika materikovogo obramleniya Evraziyskogo subbasseyna Severnogo Ledovitogo okeana* [Cenozoic geodynamics of the continental frame of the Eurasian sub-basin of the Arctic Ocean]. *Geologo-geofizicheskie kharakteristiki litosfery Arkticheskogo regiona* [Geological and geophysical characteristics of the lithosphere of the Arctic region]. Saint Petersburg, Publ. VNIIOkeangeologiya, 1996, pp. 91–101 (In Russ.).

8. Golbraykh I. G., Zabaluev V. V., Lastochkin A. N. et al. *Morfostrukturnye metody izucheniya tektoniki zakrytykh platformennykh neftegazonosnykh oblastey* [Morphostructural methods for studying the tectonics of closed platform oil and gas bearing regions]. Leningrad, Nedra, 1968, 151 p. (In Russ.).
9. Nikonov A. A. *Problemy neotektoniki severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo shchita* [Problems of neotectonics of the north-eastern part of the Baltic shield]. Tektonicheskie dvizheniya i noveyshie struktury zemnoy kory [Tectonic movements and the latest structures of the earth's crust]. Moscow, Nauka, 1967, pp. 57–71 (In Russ.).
10. Bogackiy V. I., Bogdanov N. A., Kostyuchenko S. L., Senin B. V., Sobolev S. F., Shipilov E. V., Hain V. E. *Ob'yasnitel'naya zapiska k tektonicheskoy karte Barentseva morya i severnoy chasti Evropeyskoy Rossii. M 1:2 500 000* [Explanatory note to the tectonic map of the Barents Sea and the northern part of European Russia. Scale 1:2 500 000]. Moscow, Publ. IL RAS, 1996, 94 p. (In Russ.).
11. Orlova A. V. *Blokovye struktury i rel'ef* [Block structures and relief]. Moscow, Nedra, 1975, 232 p. (In Russ.).
12. Permyakov E. N. *Osnovy metodiki ispol'zovaniya treshchinovatosti gornykh porod dlya izucheniya tektoniki platformennykh oblastey* [Fundamentals of the methodology of using rock fracturing to study the tectonics of platform regions]. *Trudy VNIGRI* [Transactions of VNIGRI], 1954, Iss. 2, pp. 43–48 (In Russ.).
13. Richter G. D. *Orograficheskie rayony Kol'skogo poluostrova* [Orographic regions of the Kola Peninsula]. *Trudy IFG AN SSSR* [Transaction of the Institute Physical Geography of Academy Sciences USSR], 1936, Vol. 19, pp. 7–11 (In Russ.).
14. Senin B. V., Shipilov E. V. *Klassifikatsiya i nomenklatura regional'nykh strukturnykh elementov metaplatforny* [Classification and nomenclature of regional structural elements of the metaplatforny]. *Osadochnyy chekhol Zapadno-Arkticheskoy metaplatforny* [Sedimentary cover of the West Arctic metaplatforny]. Murmansk, Sever, 1993, pp. 16–25 (In Russ.).
15. Mitiaev M. V., Gierasimova M. V. *Morphological structure and neotectonics of coastal zone of the Murmansk east sea-shore (Watershed zone of the Voronia and Rynda Rivers)*. *Wyprawq Geograficzne na Spitsbergen, Sesja Polarna*, Poland, Lublin, 1994, pp. 79–87.

Информация об авторе

Максим Валентинович Митяев – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3059-6469>

Information about the author

Maxim V. Mityaev – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3059-6469>

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 07.04.2025.
The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 07.04.2025.

Научная статья
УДК 57.024+57.084.2
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.011

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕТНЕЙ ТОНАЛЬНОЙ АУДИОМЕТРИИ СЕРЫХ ТЮЛЕНЕЙ

**Мирон Владимирович Пахомов, Александр Алексеевич Зайцев,
Андрей Петрович Яковлев, Александр Родионович Трошичев,
Юрий Владимирович Литвинов**

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
pachomov@mmbi.info, zaytsev@mmbi.info, yakovlev@mmbi.info,
troshichev@mmbi.info, litvinov@mmbi.info

Аннотация

Летом 2020–2024 гг. у самок серых тюленей методом тональной аудиометрии выполнены работы по проверке слуха. В качестве акустического стимула использовали звук синусоидальной формы чистого тона одной из 32 частот, рекомендованных для проведения пороговой тональной аудиометрии. Установлено, что у рожающих самок тюленей время реакции на звуки с частотой 2, 2.5, 3.15, 3.2 и 4 кГц значительно меньше, чем у нерожающих.

Ключевые слова:

серый тюлень, слух, аудиометрия, беременность, щенок

Original article

RESULTS OF SUMMER TONAL AUDIOMETRY OF GRAY SEALS

**Miron V. Pakhomov, Alexander A. Zaytsev, Andrey P. Yakovlev,
Alexander R. Troshichev, Yuri V. Litvinov**

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
pachomov@mmbi.info, zaytsev@mmbi.info, yakovlev@mmbi.info,
troshichev@mmbi.info, litvinov@mmbi.info

Abstract

In the summer of 2020–2024, female gray seals underwent hearing testing using tonal audiometry. A sinusoidal sound of a pure tone was used as an acoustic stimulus, one of the 32 frequencies recommended for threshold tonal audiometry. It was found that the reaction time to sounds with frequencies of 2, 2.5, 3.15, 3.2 and 4 kHz was significantly shorter in female seals who gave birth than in those who did not give birth.

Keywords:

grey seal, hearing, audiometry, pregnancy, puppy

Введение

Серые тюлени *Halichoerus grypus* Fabricius, 1791 используют акустические сигналы для общения как в воздухе, так и под водой. В воздухе они редко издают коммуникационные сигналы, но под водой у них богатый «вокальный репертуар» (Nowak, 2020). Возможно, тюлени не так сильно зависят от своей слуховой системы, чтобы выжить во взрослом состоянии (Hidrodynamic ..., 2001), но воспроизведение и восприятие звуков важны при общении матери и детеныша, а также в брачных играх животных (Dudzinski et al., 2009). Самки серых тюленей часто рожают детенышей в плотных колониях и регулярно оставляют их одних, чтобы отправиться в море, поэтому для них важно взаимное распознавание звуков. Тем не менее, отмечено, что в больших популяциях, таких как крупные лежки серых тюленей на о. Мэй в Шотландии (McCulloch, Boness, 2000) и на о. Большой Лицкий в Баренцевом море (Caudron et al., 1998), самки плохо распознают своих детенышей как по акустическим, так и по обонятельным сигнатурам и часто кормят чужих щенков, в то время как в относительно малых и изолированных популяциях, таких как лежка на о. Сейбл в Новой Шотландии (McCulloch, Boness, 2000) или на Оркнейских островах (Fogden, 1971), самки никогда не подходят к чужим щенкам. Поэтому вопрос акустической коммуникации между щенком и самкой представляет особый интерес, учитывая возрастающую хозяйственную деятельность человека в Арктике, приводящую к увеличению акустической нагрузки на тюленей в период вскармливания, когда мать и щенок наиболее уязвимы.

Наиболее информативным методом исследований слуха ластоногих является аудиография с фиксацией реакции на звуковой стимул определенной частоты (обычно из стандартного и расширенного наборов). Реакцию фиксируют либо с помощью поведенческих паттернов (The effect ..., 2010; Sills et al., 2014, 2015), либо методом вызванных потенциалов спинного мозга (In-air ..., 2014). Таким образом получены аудиограммы обыкновенных тюленей *Phoca vitulina* Linnaeus, 1758 (The effect ..., 2010), лагр *Phoca largha* Pallas, 1811 (Sills et al., 2015), кольчатых нерп *Pusa hispida* Schreber, 1775 (Sills et al., 2014) и серых тюленей (In-air ..., 2014). Но вышеперечисленные исследования носили разовый характер с неполовозрелыми особями. Для изучения влияния беременности, родов и последующего вскармливания необходимо сравнение аудиограмм самки тюленя до беременности, во время беременности и после родов. Это представляет значительные трудности, так как фактически невозможно в течение долгого времени отслеживать аудиограммы диких тюленей, а в условиях неволи случаи рождения серых тюленей единичны и не прогнозируемы. Сложности возникают также с измерением показателей слуха. Согласно стандартной методике проведения тональной аудиометрии, пороговым показателем слуха является минимальное звуковое давление, при котором фиксируется реакция на звуковой раздражитель. В подавляющем большинстве исследований слуха ластоногих используется именно этот показатель. Но по методике требуется обеспечить звукоизоляцию испытуемого от воздействия внешних акустических шумов. Это можно достичь помещением испытуемого в изолированное помещение. Например, исследовали слух обыкновенных тюленей (The effect ..., 2010), лагр (Sills et al., 2015) и кольчатых нерп (Sills et al., 2014), где эксперименты проводили в специальном помещении, оборудованном бассейном. Достичь звукоизоляции можно и с помощью специальных наушников, либо введением звуководных зондов в слуховой канал. Последние использовали при исследовании слуха балтийских серых тюленей (In-air ..., 2014).

Следует отметить, что при подготовке к проведению данной работы осуществлялись попытки надеть на тюленя накладные полноразмерные звукоизолирующие наушники разных конструкций. При этом было отмечено, что если амбушюры наушников слабо прилегали к голове, то они не выполняли звукоизолирующей функции. Если же прилегали плотно, то у тюленя рефлекторно запирались слуховые каналы. В условиях открытого вольерного комплекса было затруднительно поместить исследуемого тюленя в звукоизолированное помещение, оборудованное достаточно просторным и глубоким бассейном. В то же время, некоторые исследования продемонстрировали достоверную корреляционную зависимость между значениями минимального звукового давления и величиной времени реакции на звук чистого тона одинаковой частоты (Schlittenlacher, Ellermeier, 2015), что позволяет использовать время реакции вместо минимального звукового давления при проведении аудиометрических исследований.

В декабре 2019 г. 15-летняя самка, содержащаяся на аквакомплексе ММБИ РАН (г. Полярный) родила, а затем успешно выкормила щенка (Birth ..., 2021). При проведении аудиометрии по частотам стандартного и расширенного диапазона летом 2020 г. было установлено, что у данной самки, а также у другой особи, которая рожала, но не выкармливала, скорость реакции на частоты в 3.0, 3.1 и 3.2 кГц достоверно выше, чем у двух яловых сверстниц (Применение ..., 2023). В связи с этим, а также для общего ветеринарного обследования и с учетом высокой вероятности беременности других самок было принято решение проводить данное исследование каждое лето. В январе 2024 г. молодая самка в возрасте 8 лет родила и раскормила щенка.

Материал и методы

С июня 2020 г. 6 самок серого тюленя, находящихся в аквакомплексе Института (г. Полярный), проходили в течение лета процедуру аудиометрии. Все исследуемые животные принадлежат одной популяции и были отловлены на о. Большой Кий в декабре 2005 г. (им дали название «зрелые») и 2016 г. («молодые») тюлени были условно разделены на две группы, в каждую входила рожавшая самка и две нерожавшие сверстницы. На начало работ (июнь 2020 г.) возраст самок в группе «зрелые» составлял 15 лет, в группе «молодые» – 4 года.

Исследования проводили на разработанной в лаборатории морских млекопитающих ММБИ автоматической установке (рис. 1; Применение ..., 2023). Тюленьям демонстрировались 32 чистых тона из стандартного и расширенного наборов частот рекомендованных для проведения тональной пороговой аудиометрии под номерами: 1 – 125 Гц, 2 – 160 Гц, 3 – 200 Гц, 4 – 250 Гц, 5 – 315 Гц, 6 – 400 Гц, 7 – 500 Гц, 8 – 630 Гц, 9 – 750 Гц, 10 – 800 Гц, 11 – 1000 Гц, 12 – 1250 Гц, 13 – 1500 Гц, 14 – 1600 Гц, 15 – 2000 Гц, 16 – 2500 Гц, 17 – 3000 Гц, 18 – 3150 Гц, 19 – 3200 Гц, 20 – 4000 Гц, 21 – 5000 Гц, 22 – 6000 Гц, 23 – 6300 Гц, 24 – 8000 Гц, 25 – 9 кГц, 26 – 10 кГц, 27 – 11.2 кГц, 28 – 12.5 кГц, 29 – 14 кГц, 30 – 16 кГц, 31 – 18 кГц, 32 – 20 кГц.

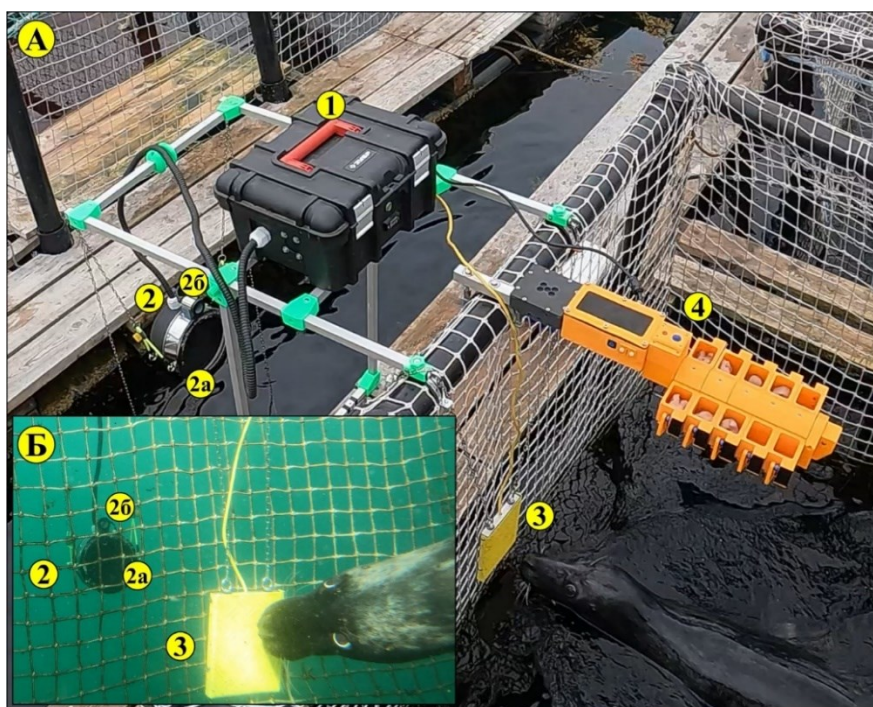


Рис. 1. Схема экспериментальной установки в надводном (А) и подводном (Б) положении:
1 – блок питания, генерации и усиления звукового сигнала; 2 – блок динамиков (2а – низкочастотный, 2б – высокочастотный);
3 – клавиша для взаимодействия с тюленем; 4 – система автоматической подачи пищевого поощрения
Fig. 1. Experimental installation scheme in the air environment (A) and in the aquatic environment (B):
1 – power, generation and amplifying unit; 2 – acoustic speaker's complex (2a – low frequency, 2b – hi frequency); 3 – key for interacting with a seal; 4 – automatic food promotion system

Звуковой сигнал создавался в генераторе частоты на основе микросхемы AD9833 по команде с микроконтроллера Arduino UNO R3 и проходил предусиление на цифровом широкодиапазонном усилителе на базе чипа TDA2050, а затем передавался на усилитель Ural BV 2.70. Звуки на частотах до 1000 Гц включительно воспроизводились на подводной колонке Aquasonic AQ339 (2а), звуки на частотах свыше 1000 Гц – с помощью акустического излучателя на основе пьезоэлектрической диафрагмы SVC2065BAL (2б). Блок динамиков (2) и клавишу (3) размещали на высоте 30 см от уровня воды и под водой на глубине 2 м на расстоянии 1 м друг от друга в воздухе.

В качестве показателя реакции использовалась разница во времени между началом демонстрации звука и нажатием животного на клавишу (3). Уровень звукового давления был постоянен и составлял 50 дБ (отн. 20 мкПа) на расстоянии 1 м от источника для всех используемых частот как в воздушной, так и в водной среде. Значение уровня звукового давления в 50 дБ было выбрано нами потому, что данный уровень значительно выше такового естественного шума в районе проведения работ, составляющего в среднем 34.28 дБ в воздушной среде и 38.12 дБ в водной.

Работы проводили по парадигме «стимул–реакция», где стимулом служил звук чистого тона на различных частотах, а реакцией – нажатие тюленем специальной клавиши. Верная реакция подкреплялась пищевым поощрением в виде кусочка рыбы, масса одной порции рассчитывалась индивидуально для каждого тюленя. Когда звуковой сигнал не воспроизводился, но тюлень нажимал на клавишу, то система подавала звуковой бридж-сигнал наказания (два коротких свиста) и начисляла к времени ожидания «штрафные» 10 с. Пропуск звукового сигнала не наказывался, система выдерживала временной интервал в диапазоне 10–20 с и снова проигрывала звуковой сигнал. Полученные данные микроконтроллер записывал на SD-карту, формируя файл протокола тренировки каждого тюленя.

Работы выполнялись с июня по сентябрь два раза в сутки – утром (с 6:00 до 8:00) и вечером (с 20:00 до 22:00), когда уровень естественного акустического шума минимален и не превышает 40 Дб (отн. 20 мкПа) над и под водой. К исследованиям приступали в солнечную или облачную погоду при отсутствии осадков или тумана, так как данные факторы являются источниками шума, влияют на распространение акустического сигнала и непосредственно на физиологический статус исследуемых животных. Для контроля погодных условий, влияющих на распространение звуковой волны в среде, перед проведением каждого эксперимента проводили измерения температуры воздуха, атмосферного давления, относительной влажности с помощью портативной метеостанции Brunton ADC Pro и температуры воды на глубине 2 м с помощью электронного термометра с выносным датчиком Espada TPM-10. Полученные данные вносились в протокол тренировки.

Для статистической обработки данных был написан скрипт в среде разработки IDLE (Integrated Development and Learning Environment) на языке программирования Python версии 3.12.0 с использованием пакета stats в составе библиотеки SciPy. Скрипт считывал данные из файлов протоколов тренировок, формировал для каждого исследуемого тюленя выборки по каждой демонстрируемой частоте, проводил статистическую обработку и с помощью управления API-функциями строил диаграмму в графическом редакторе векторной графики CorelDRAW 2017 (64-bit). В статистическую обработку входило определение нормальности распределения для выборок с помощью теста Шапиро-Уилка, выявление корреляций между значениями времени реакции на определенную частоту и измеряемыми погодными параметрами с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена, попарное сравнение выборок по критерию Манна-Уитни. Если по критерию Манна-Уитни при критическом уровне значимости 0.05 выборки предыдущего и текущего лета достоверно не отличались, то такая пара отображалась прямой линией, если выборки достоверно отличались – в виде треугольника, где основанием было медианное значение выборки предыдущего лета, а вершиной – медианное значение выборки текущего лета.

Результаты и обсуждение

Для каждого исследуемого тюленя были получены 320 выборок по 100 опытов в каждой для всех 32 демонстрируемых частот в воздушной и водной средах в летний период 2020–2024 гг. Влияния измеряемых погодных показателей на результаты опытов не отмечено. Для демонстрируемых частот годовые выборки сравнивались по критерию Манна-Уитни с критическим уровнем значимости 0.05. Результаты анализа представлены на рис. 2, где для каждой частоты отображены летние медианные значения выборок.

У молодой рожавшей самки (тюлень № 1) отчетливо видно уменьшение времени реакции в летний период 2022, 2023 и 2024 гг. по частоте 2.5, 3, 3.15, 3.2 и 4 кГц. Однако время реакции не изменялось летом 2020, 2021, 2022 и 2023 гг. При этом летом 2022 и 2023 гг. отмечалось небольшое уменьшение времени реакции, в 2024 г. наблюдалось интенсивное уменьшение времени реакции, особенно на частоте 4 кГц – с 1.1 с в 2022 г. до 0.64 с в 2024 г. У ее ровесниц было зафиксировано незначительное уменьшение времени реакции летом 2020 и 2021 гг. на частотах 3 и 3.2 у тюленя № 1 и на частоте 2.5 кГц у тюленя № 5. В последующие годы изменений времени реакции зафиксировано не было. Следует отметить, что рожавшая самка № 1 изначально имела более быструю реакцию на большинство частот, летом 2024 г. время реакции на частоты в диапазоне 2.5–4 кГц стало приблизительно равно времени реакции многократно рожавшей самки № 2.

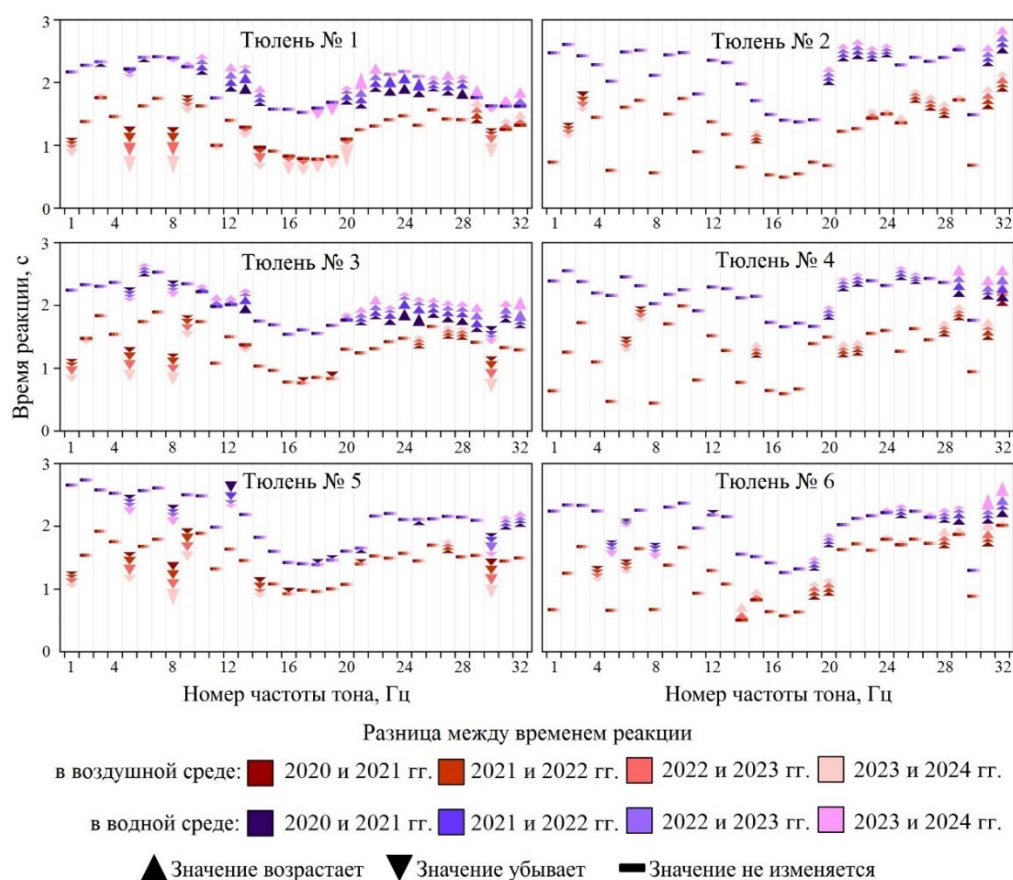


Рис. 2. Индивидуальные аудиограммы серых тюленей в летний период с 2020 по 2024 гг.
Fig. 2. Individual audiograms of gray seals in the summer period from 2020 to 2024

У группы «зрелых» самок (тюлени № 2, 4, 6) за весь период исследований изменений времени реакции на частоты 2.5, 3 и 3.15 не зафиксировано. Но время реакции на данные частоты у рожавшей самки (тюлень № 2) стабильно ниже, чем у нерожавших ровесниц. У всех «зрелых» самок зафиксировано постепенное увеличение времени реакции на частоту 2 кГц и заметная разница во времени реакции на частоты 3.2 и 4 кГц: у рожавшей самки № 1 время реакции на данные частоты значительно ниже, чем у самок № 4 и № 6, при этом, у самки № 6, время реакции которой изначально было ниже, чем у самки № 4, постепенно увеличилось во время исследований до сопоставимых с самкой № 4 значений.

Как мы указывали выше, все исследуемые самки принадлежат небольшой популяции, обитающей в районе Кийских островов, входящих в гряду Айновых островов, и насчитывает около 150–300 особей (The status ..., 1994), поэтому можно предположить, что самки данной популяции способны отличать собственных щенков от чужих. Согласно исследованиям, посвященных вокализации серых тюленей в период лактации, представленных в аналитической работе А. К. Каудрона и соавторов (Caudron et al., 1998), коммуникация самки со щенком происходит на частотах 3–4 кГц. Снижение времени реакции на звук с частотой 4 кГц, вероятно, можно объяснить возможностью кормящей самки реагировать на крики чаек, у которых в спектре криков присутствует пик на частотах близких к 4 кГц (Burton et al., 1975). Учитывая, что самка № 1 родила щенка в начале января 2024 г. и тот факт, что беременность у серых тюленей протекает около 11 мес., можно предположить, что зачатие произошло в феврале 2023 г. Таким образом, на момент начала проведения аудиометрических процедур в июле 2023 г. самка была на 7 месяце беременности. При этом снижение времени реакции в летние месяцы 2022 и 2023 гг. было значительно меньше, чем между 2023 и 2024 гг., но больше, чем разница между 2020 и 2021 гг., а также между 2021 и 2022 гг., что позволяет предположить, что изменения слуха происходят либо после рождения, либо на поздних стадиях

беременности. Такие изменения слуха на поздних стадиях беременности зафиксированы и хорошо изучены у человека, экспериментально доказаны у крыс, птиц, рыб и бесхвостых земноводных. Главной причиной является резкое повышение уровня эстрогенов и в первую очередь прогестерона, который воздействует как на тонус волосковых клеток во внутреннем ухе, так и на нейроны слуховых центров головного мозга (Caras, 2013).

У всех исследуемых животных зафиксировано значительное увеличение времени реакции на частоты 18 и 20 кГц в водной среде. В воздушной среде увеличение времени реакции зарегистрировано только у взрослых самок, у молодых животных изменений на данных частотах не наблюдалось. У молодых самок отмечено постепенное увеличение времени реакции на частоты выше 5 кГц в водной среде за исключением самки № 5, у которой время реакции и так было высоко относительно ровесниц. Можно предположить, что причина заключается в возрастном ухудшении слуха или пресбикузисе, описанном у многих видов млекопитающих, при котором характерно ухудшение слуха, которое обычно начинается на высоких частотах (Haung, Tang, 2010).

Все самки группы «зрелые» обладают стабильно быстрой реакцией на частоты 125, 315, 630, 1000 Гц и 16 кГц. У самок группы «молодые» было отмечено интенсивное снижение времени реакции на данные частоты за весь период исследований как в воздушной, так и в водной среде. Пики на частотах 125, 315, 630 и 1000 Гц присутствуют во многих вокальных сигналах серых тюленей (Dudzinski et al., 2001) и могут являться формантными частотами «местного диалекта» тюленей из одной популяции (Stansbury, Janik, 2021). Быструю реакцию на звук с частотой 16 кГц можно объяснить реакцией на хлопки ластами, характерные для половозрелых самцов серого тюленя в период размножения, частотный пик которых приходится именно на 16 кГц (Percussive ..., 2020). При этом исследования показали, что время реакции у молодых самок постоянно снижается, что можно объяснить их половым созреванием, которое у серых тюленей начинается примерно с 5 лет, когда звуки данной частоты приобретают с каждым годом все большую значимость.

Выводы

Исследования показали, что у рожавших самок серого тюленя время реакции на звуки чистого тона синусоидальной формы с частотами в 2, 2.5, 3.15, 3.2 и 4 кГц значительно ниже, чем у нерожавших сверстниц. Время реакции начинает изменяться в период беременности и в дальнейшем сохраняет более низкие значения, чем у нерожавших самок. Отмечено возрастание времени реакции на частоты 18 и 20 кГц, что может свидетельствовать о возрастном снижении верхнего порога частотного слуха. Подтверждена значимость звуков на частотах 125, 315, 630, 1000 Гц и 16 кГц для слуха серых тюленей.

Работа выполнена по теме «Териофауна арктических морей: физиология, экология и этология» (№ госрегистрации 124013000720-4) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. Применение методов тональной аудиометрии для оценки слуха серых тюленей в воздушной и водной среде / М. В. Пахомов, А. А. Зайцев, Ю. В. Литвинов, А. Р. Трошичев // Тр. Мурм. гос. техн. ун-та. 2023. Т. 26, № 2. С. 121–130. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130
2. Birth of a *Halichoerus grypus atlantica* (Nehring, 1866) pup at the biotechnical aquacomplex of MMBI RAS / A. A. Zaytsev, Y. V. Litvinov, M. V. Pakhomov, A. R. Troshichev, A. P. Yakovlev, P. A. Zavoloka // Aquatic Mammals. 2021. Vol. 47, iss. 1. P. 36–42. doi:10.1578/AM.47.1.2021.36
3. Burton R. W., Anderson S. S., Summers C. F. Perinatal activities in the grey seal (*Halichoerus grypus*) // J. Zool. 1975. Vol. 177. P. 197–201. doi:10.1111/j.1469-7998.1975.tb05978.x
4. Caras M. L. Estrogenic modulation of auditory processing: A vertebrate comparison // Front. Neuroendocrinol. 2013. Vol. 34, iss. 4. P. 285–299. doi:10.1016/j.yfrne.2013.07.006
5. Caudron A. K., Kondakov A. A., Siryanov S. V. Acoustic structure and individual variation of grey seal (*Halichoerus grypus*) pup calls // J. Mar. Biol. Ass. UK. 1998. Vol. 78, iss. 2. P. 651–658. doi:10.1017/S0025315400041680
6. Dudzinski K. M., Thomas J. A., Gregg J. D. Communication in marine mammals / W. Perrin, B. Würsig, J. Thewissen (Eds.) // Encyclopedia of marine mammals. Amsterdam: Academic Press, 2009. P. 260–269. doi:10.1016/B978-0-12-373553-9.00064-X

7. Fogden S. C. L. Mother-young behaviour at grey seal breeding beaches // J. Zool. 1971. Vol. 164, iss. 1. P. 61–92.
8. Huang Q., Tang J. Age-related hearing loss or presbycusis // Eur. Arch. Oto-Rhino-Laryngol. 2010. Vol. 267. P. 1179–1191. doi:10.1007/s00405-010-1270-7
9. Hydrodynamic trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*) / G. Dehnhardt, B. Mauck, W. Hanke, H. Bleckmann // Science (New York, USA). 2001. Vol. 293. P. 102–104. doi:10.1126/science.1060514
10. In-air evoked potential audiometry of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the North and Baltic seas / A. Ruser, M. Dähne, J. Sundermeyer, K. Lucke, D. S. Houser, J. J. Finneran, J. Driver, I. Pawliczka, T. Rosenberger, U. Siebert // PLoS One. 2014. Vol. 9, iss. 3. P. e90824. doi:10.1371/journal.pone.0090824
11. McCulloch S., Boness D. J. Mother-pup vocal recognition in the grey seal (*Halichoerus grypus*) of Sable Island, Nova Scotia, Canada // J. Zool. 2000. Vol. 251. P. 449–455. doi:10.1111/j.1469-7998.2000.tb00800.x
12. Nowak L. J. Observations on mechanisms and phenomena underlying underwater and surface vocalisations of grey seals // Bioacoustics. 2020. Vol. 30, iss. 6. P. 696–715. doi:10.1080/09524622.2020.1851298
13. Percussive underwater signaling in wild gray seals / D. P. Hocking, B. Burville, W. M. G. Parker, A. R. Evans, T. Park, F. G. Marx // Mar. Mam. Sci. 2020. Vol. 36, iss. 2. P. 728–732. doi:10.1111/mms.12666
14. Schlittenlacher J., Ellermeier W. Simple reaction time to the onset of time-varying sounds // Att. Perc. Psychophys. 2015. Vol. 77. P. 2424–2437. doi:10.3758/s13414-015-0940-3
15. Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in spotted seals (*Phoca largha*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // J. Exp. Biol. 2014. Vol. 217, iss. 5. P. 726–760. doi:10.1242/jeb.097469
16. Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // J. Exp. Biol. 2015. Vol. 218, iss. 4. P. 2250–2259. doi:10.1242/jeb.120972
17. Stansbury A. L., Janik V. M. The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups // Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci. 2021. Vol. 376, iss. 1836. P. 20200251. doi:10.1098/rstb.2020.0251
18. The effect of signal duration on the underwater hearing thresholds of two harbor seals (*Phoca vitulina*) for single tonal signals between 0.2 and 40 kHz / R. A. Kastelein, L. Hoek, P. J. Wensveen, J. M. Terhune, C. A. de Jong // J. Acoust. Soc. Am. 2010. Vol. 127, iss. 2. P. 1135–1145. doi:10.1121/1.3283019
19. The status of grey seals *Halichoerus grypus* in North Norway and on the Murman Coast, Russia / T. Haug, G. Henriksen, A. Kondakov, V. Mishin, K. T. Nilssen, N. Røv // Biol. Cons. 1994. Vol. 70, iss. 1. P. 59–67. doi:10.1016/0006-3207(94)90299-2

References

1. Pakhomov M. V., Zaytsev A. A., Litvinov Yu. V., Troshichev A. R. Primenenie metodov tonal'noy audiometrii dlya otsenki slukha serykh tyuleney v vozduшной i vodnoy srede [Application of tonal audiometry methods for assessing the hearing of gray seals in the air and aquatic environment]. *Trudy Murmanskogo gosydarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Transactions of the Murmansk State Technical University], 2023, Vol. 26, No. 2, pp. 121–130 (In Russ.). doi:10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130
2. Zaytsev A. A., Litvinov Y. V., Pakhomov M. V., Troshichev A. R., Yakovlev A. P., Zavoloka P. A. Birth of a *Halichoerus grypus atlantica* (Nehring, 1866) pup at the biotechnical aquacomplex of MMBI RAS. *Aquatic Mammals*, 2021, Vol. 47, Iss. 1, pp. 36–42. doi:10.1578/AM.47.1.2021.36
3. Burton R. W., Anderson S. S., Summers C. F. Perinatal activities in the grey seal (*Halichoerus grypus*). *J. Zool.*, 1975, Vol. 177, pp. 197–201. doi:10.1111/j.1469-7998.1975.tb05978.x
4. Caras M. L. Estrogenic modulation of auditory processing: A vertebrate comparison. *Front. Neuroendocrinol.*, 2013, Vol. 34, Iss. 4, pp. 285–299. doi:10.1016/j.yfrne.2013.07.006
5. Caudron A. K., Kondakov A. A., Siryanov S. V. Acoustic structure and individual variation of grey seal (*Halichoerus grypus*) pup calls. *J. Mar. Biol. Ass. UK*, 1998, Vol. 78, Iss. 2, pp. 651–658. doi:10.1017/S0025315400041680

6. Dudzinski K. M., Thomas J. A., Gregg J. D. Communication in marine mammals. W. Perrin, B. Würsig, J. Thewissen (Eds.). Encyclopedia of marine mammals, Amsterdam, Academic Press, 2009, pp. 260–269. doi:10.1016/B978-0-12-373553-9.00064-X
7. Fogden S. C. L. Mother-young behaviour at grey seal breeding beaches. J. Zool., 1971, Vol. 164, Iss. 1, pp. 61–92.
8. Huang Q., Tang J. Age-related hearing loss or presbycusis. Eur. Arch. Oto-Rhino-Laryngol., 2010, Vol. 267, pp. 1179–1191. doi:10.1007/s00405-010-1270-7
9. Dehnhardt G., Mauck B., Hanke W., Bleckmann H. Hydrodynamic trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*). Science (New York, NY), 2001, Vol. 293, pp. 102–104. doi:10.1126/science.1060514
10. Ruser A., Dähne M., Sundermeyer J., Lucke K., Houser D. S., Finneran J. J., Driver J., Pawliczka I., Rosenberger T., Siebert U. In-air evoked potential audiometry of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the North and Baltic Seas. PLoS One, 2014, Vol. 9, Iss. 3, p. e90824. doi:10.1371/journal.pone.0090824
11. McCulloch S., Boness D. J. Mother–pup vocal recognition in the grey seal (*Halichoerus grypus*) of Sable Island, Nova Scotia, Canada. J. Zool., 2000, Vol. 251, pp. 449–455. doi:10.1111/j.1469-7998.2000.tb00800.x
12. Nowak L. J. Observations on mechanisms and phenomena underlying underwater and surface vocalisations of grey seals. Bioacoustics, 2020, Vol. 30, Iss. 6, pp. 696–715. doi:10.1080/09524622.2020.1851298
13. Hocking D. P., Burville B., Parker W. M. G., Evans A. R., Park T., Marx F. G. Percussive underwater signaling in wild gray seals. Mar. Mam. Sci., 2020, Vol. 36, Iss. 2, pp. 728–732. doi:10.1111/mms.12666
14. Schlittenlacher J., Ellermeier W. Simple reaction time to the onset of time-varying sounds. Att. Perc. Psychophys., 2015, Vol. 77, pp. 2424–2437. doi:10.3758/s13414-015-0940-3
15. Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in spotted seals (*Phoca largha*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. J. Exp. Biol., 2014, Vol. 217, Iss. 5, pp. 726–760. doi:10.1242/jeb.097469
16. Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. J. Exp. Biol., 2015, Vol. 218, Iss. 14, pp. 2250–2259. doi:10.1242/jeb.120972
17. Stansbury A. L., Janik V. M. The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups. Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci., 2021, Vol. 376, Iss. 1836, pp. 20200251. doi:10.1098/rstb.2020.0251
18. Kastelein R. A., Hoek L., Wensveen P. J., Terhune J. M., de Jong C. A. The effect of signal duration on the underwater hearing thresholds of two harbor seals (*Phoca vitulina*) for single tonal signals between 0.2 and 40 kHz. J. Acoust. Soc. Am., 2010, Vol. 127, Iss. 2, pp. 1135–1145. doi:10.1121/1.3283019
19. Haug T., Henriksen G., Kondakov A., Mishin V., Nilssen K. T., Røv N. The status of grey seals *Halichoerus grypus* in North Norway and on the Murman Coast, Russia. Biol. Cons., 1994, Vol. 70, Iss. 1, pp. 59–67. doi:10.1016/0006-3207(94)90299-2

Информация об авторах

Пахомов Мирон Владимирович – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

Зайцев Александр Алексеевич – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

Яковлев Андрей Петрович – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1720-0562>

Трошичев Александр Родионович – младший научный сотрудник

Литвинов Юрий Владимирович – младший научный сотрудник

Information about the authors

Miron V. Pakhomov – Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

Alexander A. Zaytsev – Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

Andrey P. Yakovlev – Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1720-0562>

Alexander R. Troshichev – Junior Researcher

Yury V. Litvinov – Junior Researcher

Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 22.05.2025.
The article was submitted 24.03.2025; approved after reviewing 21.04.2025; accepted for publication 22.05.2025

