



ЭКОСИСТЕМЫ И КЛИМАТ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Материалы всероссийской
научно-практической конференции,
посвященной 125-летию векового
разреза «Кольский меридиан»
(г. Мурманск, 27-28 марта 2024 г.)

КОЛЬСКИЙ
МЕРИДИАН

★
125
лет



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА И ОКЕАНОГРАФИИ» (ФГБНУ «ВНИРО»)**

Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича)



ЭКОСИСТЕМЫ И КЛИМАТ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

**Материалы всероссийской научно-практической конференции,
посвященной 125-летию векового разреза
«Кольский меридиан»
(г. Мурманск, 27-28 марта 2024 г.)**

**Мурманск
2024**

Э 40 **Экосистемы** и климат арктических морей: материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 125-летию векового разреза «Кольский меридиан» (г. Мурманск, 27-28 марта 2024 г.) / Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича); научный редактор А.Л. Карсаков. – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2024. – 254 с.

ISBN 978-5-86349-292-6

Сборник подготовлен по материалам всероссийской конференции ученых и специалистов «Экосистемы и климат арктических морей». Организатор конференции – Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича).

Мероприятие посвящено 125-летию векового разреза «Кольский меридиан».

Представленные доклады охватили широкий спектр вопросов: от истории наблюдений на вековом разрезе до результатов современных океанографических, гидрохимических и гидробиологических исследований на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море, многолетней изменчивости условий морской среды и биоты в арктическом регионе, не только в северо-западных, но и в восточных районах нашей страны. Часть докладов посвящена исследованиям экосистем арктических морей в условиях изменяющегося климата. Большое внимание уделено вопросам загрязнения вод, донных отложений и гидробионтов, в том числе микропластиком.

Издание предназначено для специалистов, интересующихся различными аспектами решения проблем, присущих современному отечественному рыбному хозяйству.

Научный редактор канд. геогр. наук А.Л. Карсаков

Редакционная коллегия:

*М.Ю. Анциферов, А.В. Долгов, д-р биол. наук, В.А. Ившин, канд. геогр. наук,
М.А. Новиков, канд. биол. наук, Л.И. Пестрикова, канд. биол. наук,
К.М. Соколов, канд. биол. наук (ответственный редактор),
А.Г. Трофимов, канд. геогр. наук, Е.В. Сентябов, канд. геогр. наук*

FEDERAL AGENCY FOR FISHERIES

FEDERAL STATE BUDGETARY RESEARCH INSTITUTION
"RUSSIAN FEDERAL RESEARCH INSTITUTE OF
FISHERIES AND OCEANOGRAPHY (FSBSI "VNIRO")"

Polar Branch of FSBSI "VNIRO" ("PINRO" named after N.M. Knipovich)



ECOSYSTEMS AND CLIMATE OF THE ARCTIC SEAS

Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference
dedicated to the 125th anniversary of the centennial Kola Section
(Murmansk, 27-28 March 2024)

Murmansk
2024

Ecosystems and climate of the Arctic seas: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 125th anniversary of the centennial Kola Section (Murmansk, 27-28 March 2024) / Polar Branch of FSBSI “VNIRO” (“PINRO” named after N.M. Knipovich); Science editor Aleksey L. Karsakov. – “PINRO” Press, Murmansk, 2024. – 254 p.

This collection of articles is based on the reports delivered at the all-Russian scientific and practical conference “Ecosystems and climate of the Arctic seas”. The host of the conference was the Polar Branch of FSBSI “VNIRO” (“PINRO” named after N.M. Knipovich).

The conference was dedicated to the 125th anniversary of the centennial Kola Section.

The presented reports covered a wide range of issues: from the history of observations on the centennial section to the results from recent oceanographic, hydrochemical and hydrobiological studies on the Kola Section in the Barents Sea, long-term variability of marine environmental conditions and biota in the Arctic Region, including the northwestern and eastern areas of Russia. Some of the reports presented studies on the ecosystems in the Arctic seas under climate change. Much attention was focused on the pollution of water, bottom sediments and marine species with contaminants including microplastics.

The book is intended for specialists and experts who are interested in solving a wide variety of current issues of the Russian fishing industry.

Science Editor: Aleksey L. Karsakov, PhD (Geography)

Editorial Board:

Mikhail Yu. Antsiferov, Andrey V. Dolgov (DSc, Biology), Victor A. Ivshin (Ph.D, Geography), Mikhail A. Novikov (Ph.D, Biology), Larisa I. Pestrikova (Ph.D, Biology), Konstantin M. Sokolov (Ph.D, Biology; Executive editor), Alexander G. Trofimov (Ph.D, Geography), Evgeniy V. Sentyabov (Ph.D, Geography)

ИСТОРИЯ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАЗРЕЗЕ «КОЛЬСКИЙ МЕРИДИАН»

А.Г. Трофимов

*Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
г. Мурманск*

Аннотация. Представлена история наблюдений на разрезе «Кольский меридиан». Приведена статистика количества измерений океанографических параметров в разные годы и сезоны с момента его учреждения по настоящее время. Разрез уникален как по длительности, так и по частоте выполнений. В ПИНРО собран самый большой массив данных и сформирован наиболее полный каталог наблюдений по этому разрезу. К настоящему времени сделано более 12,5 тыс. станций, однако в последние годы отмечена тенденция к сокращению их количества. Выполняемые наблюдения востребованы как отечественными, так и зарубежными учеными для решения задач в области физической, промысловой и биологической океанографии. Ценность разреза для науки и практики обуславливает необходимость продолжения его выполнения, систематизации и анализа собранных на нем данных.

Ключевые слова: Баренцево море, «Кольский меридиан», стандартный разрез, история океанографических наблюдений.

Изучение сезонной и межгодовой изменчивости океанографических условий и использование их особенностей в решении задач промысловой океанографии, в том числе в прогностических целях, невозможны без наличия продолжительных рядов наблюдений, основным источником которых служат стандартные разрезы. «Кольский меридиан» уникален не только по длительности, но и по частоте выполнений, по нему собран один из самых длинных в мире рядов данных. В 2024 г. разрезу исполняется 125 лет. Результаты наблюдений послужили основой большого количества научных работ в области региональной, промысловой и биологической океанографии Баренцева моря и использовались многими исследователями для оценки и прогнозирования численности запасов промысловых рыб не только в Баренцевом море, но и в Северном рыбохозяйственном бассейне в целом (Карсаков, 2009). Разрез «Кольский меридиан» является общепризнанным индикатором климата Баренцева моря и используется в качестве реперного, по температуре на котором можно судить о тепловом состоянии вод всей южной части моря (Терещенко, 1997).

В свете научной важности и практической востребованности разреза «Кольский меридиан» представляется целесообразным дать обзор истории океанографических наблюдений на нем, включая предпосылки учреждения и становления разреза в качестве векового, а также современные проблемы его выполнения.

История «Кольского меридиана», как и вообще стандартных разрезов, началась в августе 1895 г., когда на 6-м Международном географическом конгрессе в Лондоне профессор О. Петтерсон из Швеции выдвинул идею объединить научные силы европейских стран для решения задач в области исследования моря в целях рационального рыболовства (История океанографических исследований..., 2005). Конгресс поддержал эту идею, и после двух международных учредительных конференций, состоявшихся в 1899 г. в Стокгольме (Швеция) и 1901 г. в Христиании (ныне Осло, Норвегия), 22 июля 1902 г. в Копенгагене (Дания) при участии Великобритании, Германии, Дании, Нидерландов, Норвегии, России, Финляндии и Швеции был учрежден Международный совет по исследованию моря (ИКЕС) в целях координации усилий стран-участниц по организации и проведению исследований водных биологических ресурсов и океанографических условий в Атлантическом океане и прилегающих к нему морях (Конвенция о Международном совете..., 1964).

На учредительной конференции, состоявшейся в 1899 г. в Стокгольме, для сравнимости результатов наблюдений и оценки сезонных и межгодовых изменений океанографических параметров было предложено проводить наблюдения на стандартных горизонтах и разрезах. В Баренцевом море, кроме еще двух разрезов (так называемый «международный треугольник»), рекомендовали выполнять разрез вдоль меридиана $33^{\circ}30'$ в.д. от Кольского залива до 75° с.ш., который впоследствии получил название «Кольский меридиан» и был продлен до 77° с.ш. (рис. 1, см. таблицу) (Адров, 2001). Разрез состоит из 16 станций, его протяженность составляет 450 морских миль. Находясь в южной и центральной частях Баренцева моря, он пересекает прибрежные и атлантические воды, движущиеся с запада (из Норвежского моря) на восток. Глубина изменяется от 140 до 330 м, составляя в среднем 250 м (см. рис. 1).

Согласно решению Стокгольмской конференции, в мае 1900 г. Россия впервые провела океанографические и биологические исследования на разрезе «Кольский меридиан» от Мурманского берега до 73° с.ш. (сделать разрез полностью помешали погодные условия и поломка лебедки). Работы выполнялись на пароходе «Андрей Первозванный» (рис. 2) в рамках Мурманской научно-промысловой экспедиции (1898-1908 гг.), организатором и руководителем которой с 1898 по 1901 г. был Н.М. Книпович (рис. 3) – выдающийся русский ученый и исследователь (Книпович, 1906; Берг, 1950; Пашкова, 2006). «Андрей Первозванный» – первое в мире научно-промысловое и первое российское научно-исследовательское судно, которое было построено в 1899 г. в Германии по заказу Российской империи специально для проведения морских научно-промысловых работ и оснащено новейшим для того времени

оборудованием для выполнения метеорологических, океанографических, гидрохимических, биологических и промысловых исследований (Брейтфус, 1903).

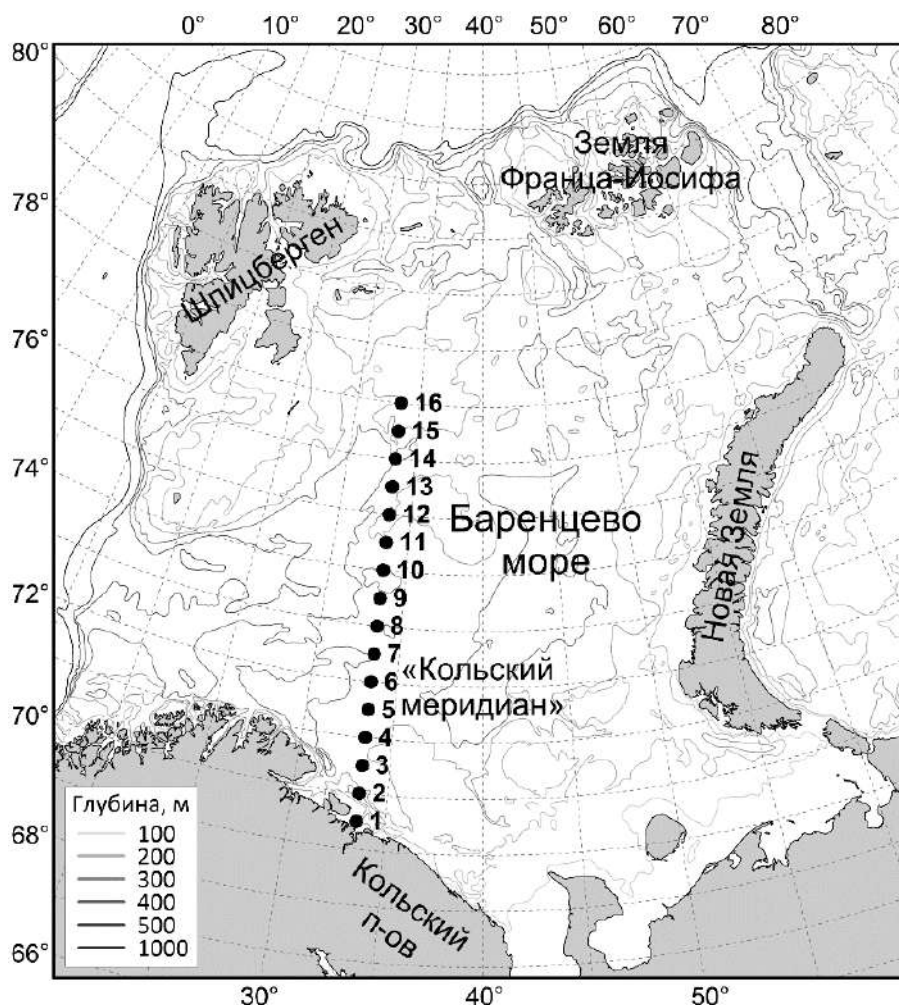


Рис. 1. Положение станций стандартного океанографического разреза «Кольский меридиан» в Баренцевом море (станции 1-16)

Координаты и глубина станций на разрезе «Кольский меридиан»

Номер станции	Широта, сев.	Долгота, вост.	Глубина, м	Номер станции	Широта, сев.	Долгота, вост.	Глубина, м
1	69°30'	33°30'	265	9	73°30'	33°30'	280
2	70°00'	33°30'	148	10	74°00'	33°30'	318
3	70°30'	33°30'	247	11	74°30'	33°30'	258
4	71°00'	33°30'	220	12	75°00'	33°30'	145
5	71°30'	33°30'	276	13	75°30'	33°30'	220
6	72°00'	33°30'	261	14	76°00'	33°30'	300
7	72°30'	33°30'	283	15	76°30'	33°30'	205
8	73°00'	33°30'	213	16	77°00'	33°30'	155

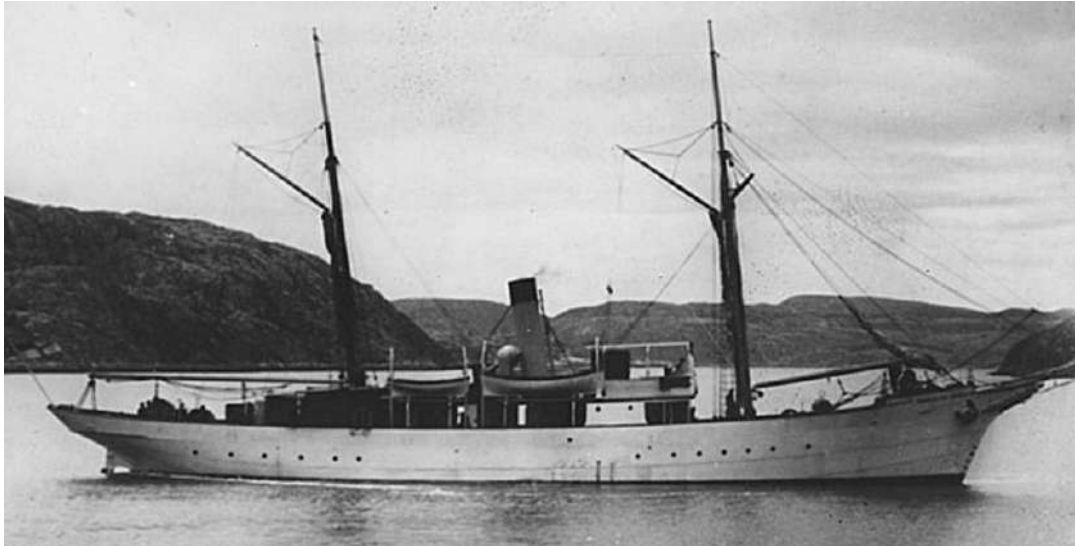


Рис. 2. Пароход «Андрей Первозванный»

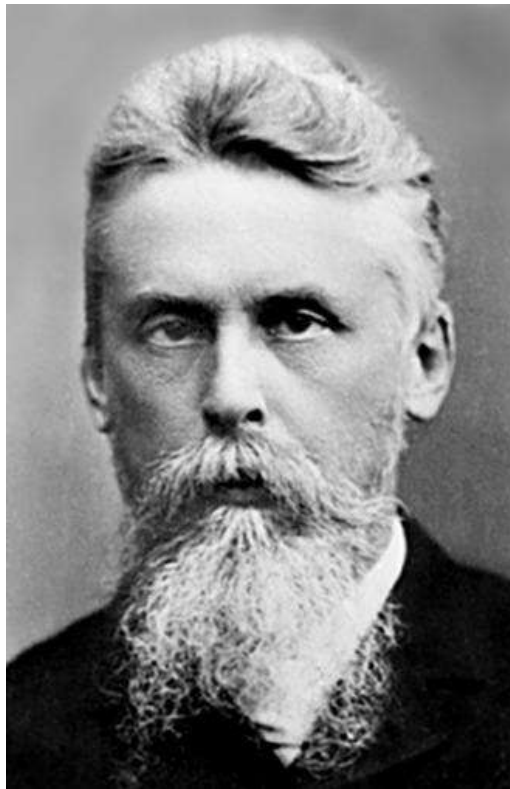


Рис. 3. Николай Михайлович Книпович

Первоначально температуру воды измеряли с помощью термометра Негретти-Замбра с рамой Милля с точностью до $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пробы воды для определения солености отбирали с глубины батометром Петтерсона, а с поверхности – ведром, однако значения солености, полученные в экспедициях 1900 г., были забракованы, так как батометр часто закрывался

не на нужной глубине. Но уже в 1901 г. этот прибор был усовершенствован, и с лета 1901 г. начались определения солености по методу М. Кнудсена. С 1901 г. также стал использоваться более чувствительный (с точностью до 0,03 °С) термометр (Экспедиция для научно-промысловых..., 1902).

В экспедициях 1900-1901 гг. на пароходе «Андрей Первозванный» была отработана методика выполнения океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан». Технические возможности судна позволили проводить исследования во все сезоны года и на значительном удалении от берега, а благодаря приему ставить судно носом на волну стало возможным выполнять океанографические работы даже в «свежую» погоду и при сильном волнении (История океанографических исследований..., 2005).

На основе собранных данных о температуре и солености воды уже осенью 1901 г. Н.М. Книпович составил схему течений и выделил на разрезе «Кольский меридиан» несколько ветвей, указав, что мощное теплое течение «приносит в Баренцево море громадное количество теплоты и в конце года мы наблюдаем на глубинах мощные заносы этой теплоты, в сильнейшей степени смягчающей климат», а также сделал вывод о связи распределения и миграций промысловых рыб в Баренцевом море с этими течениями (Экспедиция для научно-промысловых..., 1902).

В 1902-1906 гг. исследования на разрезе «Кольский меридиан» на пароходе «Андрей Первозванный» были продолжены под руководством Л.Л. Брейтфуса (Труды Мурманской научно-промысловой..., 1915). Успешность работ часто зависела от технического состояния оборудования и судна, погодных условий и наличия льда в северной части разреза в зимний период. Кроме того, все больше времени тратилось на практические задачи, ставившиеся Комитетом для помощи поморам Русского Севера, по инициативе и на средства которого была создана эта экспедиция. В результате с 1907 г. океанографические и биологические исследования на разрезе «Кольский меридиан» прекратились полностью, а в 1908 г. была ликвидирована и сама Мурманская научно-промысловая экспедиция (Терещенко, 2002).

Наблюдения на разрезе «Кольский меридиан» не выполнялись вплоть до окончания иностранной военной интервенции в России, которая последовала за Первой мировой войной и Великой Октябрьской социалистической революцией. В начале 1921 г. Ученый совет Мурманской биологической станции предложил продолжить наблюдения на разрезе, понимая их важность для решения задач не только океанографии и биологии Баренцева моря, но и общей климатологии всего Севера (Дерюгин, 1924). Не имея достаточных средств для реализации этого проекта, Ученый совет станции обратился к научному руководству Северной научно-промысловой экспедиции, которое весной 1921 г. оказало материальную поддержку

особому отряду, созданному при Мурманской биологической станции. В мае 1921 г. командование Морских сил Северного моря предоставило этому отряду судно «Соколица» (на нем после большого перерыва выполнили наблюдения на разрезе «Кольский меридиан», но лишь до 72°30' с.ш., так как помешал шторм), а в августе 1921 г. – военный тральщик № 21 водоизмещением 500 т (на его левом борту располагалась лебедка с бронзовым линем для спуска лота Клаусена и батометра Петтерсона-Нансена, на правом – лебедка для спуска пелагического трала) (История океанографических исследований..., 2005; Стрелкова, 2016).

В 1922-1927 гг. наблюдения на разрезе выполнялись эпизодически Мурманской биологической станцией. Лишь с 1928 г. начались регулярные наблюдения на судах Плавучего морского научного института (Плавморнина), который был создан 10 марта 1921 г. и реорганизован в 1929 г. в Государственный океанографический институт (ГОИН), а в 1934 г. – в ПИНРО (Под семизвездным синим..., 1981). Регулярные наблюдения, проводившиеся в 1928-1941 гг. на судах ПИНРО «Николай Книпович», «Персей» и «Исследователь», позволили получить основные представления о сезонных и межгодовых изменениях наиболее важных океанографических параметров на разрезе «Кольский меридиан» (История океанографических исследований..., 2005).

В 1934 г. Ученый совет ПИНРО разработал, а в 1935 г. утвердил 26 разрезов в Баренцевом и сопредельных морях, на которых рекомендовали проводить мониторинг океанографических параметров, установил объем и методику измерений, маршруты ежесезонных океанографических съемок и сроки наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» (Адров, 2001).

Всего с 1900 по 1941 г. разрез «Кольский меридиан» был выполнен 147 раз различными российскими мореведческими организациями. Помимо России, наблюдения на разрезе также проводили Германия в 1913, 1926 и 1927 гг. и Норвегия в июле 1927 г.

31 мая – 1 июня 1941 г. экспедиционное судно Арктического научно-исследовательского института «Академик Шокальский» выполнило разрез «Кольский меридиан» последний раз перед Великой Отечественной войной, в течение которой наблюдения на нем не проводились.

После окончания военных действий ПИНРО получил моторное судно «Кашалот», на котором уже в мае 1945 г. были продолжены наблюдения на разрезе. В 1940-50-е годы научный флот ПИНРО пополнили такие суда, как «Саратов» (работало на разрезе в 1946-1948 гг.), переоборудованный трофейный немецкий минный тральщик «Персей-2» (1949-1960 гг.), названный в честь «Персея», погибшего в военные годы в Мотовском заливе, а также переоборудованные рыболовные траулеры «Алексей

Откупщиков» (1951-1978 гг.), «Топседа» (1956-1973 гг.) и «Тунец» (1958-1979 гг.) (Карсаков, 2009; Стрелкова, 2016).

В 1954 г. на заседании бюро бассейновой секции северных морей океанографической комиссии при Президиуме Академии наук СССР разрез «Кольский меридиан», в числе других 40 разрезов морей Северо-Европейского бассейна, был установлен как стандартный с присвоением ему порядкового номера 6 (каждый разрез получил свой уникальный номер, под которыми они известны до сих пор) и продлен до 77° с.ш. (История океанографических исследований..., 2005). С 1955 г. к выполнению наблюдений на нем активно подключилось Мурманское управление по гидрометеорологической службе (МУГМС) на судах «Полярник» (1955-1977 гг.) и «Айсберг» (1958-1978 гг.). В 1960 г. Главгидрометслужба включила «Кольский меридиан» в перечень разрезов, закрепленных для наблюдений над вековым ходом элементов океанографического режима, и он получил статус «векового» с рекомендацией проводить наблюдения ежемесячно (Карсаков, 2009). В 1976 г. приказом Госкомгидромета № 134 от 29 июня 1976 г. ответственность за выполнение разреза «Кольский меридиан» была возложена на МУГМС (Положение о вековых..., 1976). Многие годы суда МУГМС и ПИНРО (включая суда Севрыбпромразведки) проводили на этом разрезе комплекс наблюдений за температурой и соленостью воды, ее цветом и прозрачностью, содержанием растворенного в ней кислорода, водородным показателем, щелочностью, биогенными элементами и загрязняющими веществами (Терещенко, 2002). Температуру измеряли с помощью глубоководного опрокидывающегося термометра с точностью до 0,01 °С, а пробы воды для определения солености, загрязняющих веществ и других гидрохимических показателей отбирали с помощью морского батометра БМ-48 (батометр Нансена).

Новым этапом в океанографических исследованиях ПИНРО стало введение в эксплуатацию в 1985 г. переоборудованного судна «Артемида», а с 1987 г. – научно-исследовательских судов типа «Атлантик-833». Эти суда были оснащены зондирующими комплексами (СТД-зондами), которые позволяли получать непрерывную информацию о вертикальном (от поверхности до дна) распределении океанографических параметров.

В период с 1956 по 1990 г. на разрезе «Кольский меридиан» ежегодно выполнялось от 163 до 283 (в среднем 208) океанографических станций, а их суммарное количество за эти годы составило 58 % от общего объема наблюдений, которыми располагает ПИНРО за всю 125-летнюю историю разреза, т.е. наиболее активные исследования проводились именно в указанный 35-летний период (рис. 4).

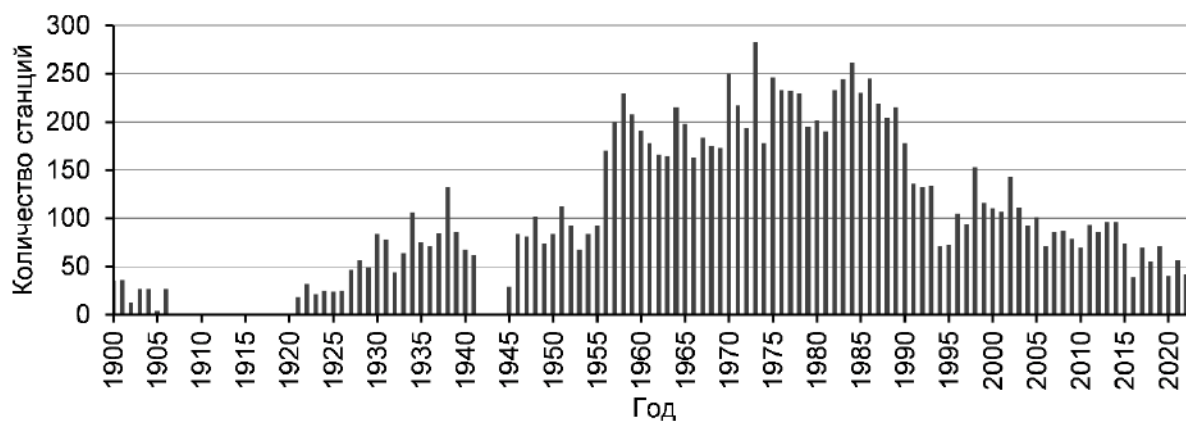


Рис. 4. Количество станций, выполненных на разрезе «Кольский меридиан» в 1900-2023 гг.

С начала 1990-х годов в связи с распадом СССР и последовавшей за этим экономической депрессией началось сокращение объема наблюдений не только на разрезе «Кольский меридиан», но и на других разрезах, что привело к частичному, а в некоторых случаях и к полному прерыванию многолетних рядов. С января 1992 г. суда Севрыбпромразведки прекратили передачу океанографических данных в ПИНРО, а с апреля 1993 г. МУГМС полностью перестало выполнять экспедиционные работы (Карсаков, 2009). В результате ответственность за продолжение наблюдений на разрезе «Кольский меридиан», как и в 1930-е годы, снова была возложена на ПИНРО, несмотря на уменьшение объема морских экспедиций. В 1990-2000-е годы, в условиях спада экспедиционной деятельности, Полярный институт приложил немало усилий для продолжения наблюдений (хотя и с меньшей частотой) на разрезе «Кольский меридиан», а также предпринял неординарные меры по организации океанографических работ на промысловых судах, на которых в начале 2000-х годов выполнялась почти половина наблюдений на разрезе.

Вследствие изменений в законодательстве Российской Федерации с начала 2010-х годов наблюдения на промысловых судах прекратились. С тех пор по объективным (не зависящим от ПИНРО) причинам продолжилась тенденция к сокращению наблюдений на разрезе «Кольский меридиан», и он стал выполняться в основном только до 74° с.ш. (первые десять станций). Тем не менее, учитывая, что с конца 1990-х годов наблюдения на остальных стандартных разрезах крайне редкие и нерегулярные, «Кольский меридиан» в настоящее время является единственным российским разрезом, по которому поддерживаются репрезентативные ряды океанографических данных для мониторинга и изучения сезонных и межгодовых изменений термохалинного состояния вод Баренцева моря.

Для измерения океанографических параметров на разрезе «Кольский меридиан» используются STD-зонды типа SBE 19plus фирмы Sea-Bird Electronics (США) с датчиками давления, температуры, электропроводности, кислорода, водородного показателя, флуоресценции и мутности. Пробы воды для определения других гидрохимических показателей и загрязняющих веществ отбираются с помощью батометров Нискина и системы «Розетта» типа SBE 32 фирмы Sea-Bird Electronics, объединяющей от 12 до 24 батометров Нискина и обеспечивающей срабатывание батометров на заданных глубинах.

На протяжении 125 лет количество станций, выполняемых на разрезе «Кольский меридиан», в разные годы было различным. Нередко, особенно на заре исследований, делали лишь две-три или отдельные (расположенные между 69°30' и 73°00' с.ш.) станции. Иногда, в основном в холодные годы, исследования на северных станциях ограничивались ледовыми условиями. В последние годы все чаще разрез выполняется не полностью в силу экономических причин, обусловивших сокращение количества морских экспедиций, а также в результате изменений в законодательстве Российской Федерации, которые привели к трудностям при проведении наблюдений на первой станции разреза, расположенной в территориальных водах России.

Как уже упоминалось, в истории разреза «Кольский меридиан» были периоды (1900-1906, 1921-1941 и 1945-2023 гг.), когда наблюдения на нем проводили более или менее регулярно, и периоды (1907-1920 и 1942-1944 гг.), когда их не было совсем. В результате общее количество лет наблюдений на разрезе составило 107, за это время он выполнен 1279 раз, сделано 12546 океанографических станций. Основные параметры, наблюдения за которыми ведутся на разрезе уже в течение 125 лет, – температура и соленость воды. Распределение количества станций по месяцам показывает повышенную экспедиционную активность в теплый период года, на который приходились основные ежегодные съемки по оценке запасов промысловых рыб в Баренцевом море, и когда условия для морских работ наиболее благоприятны как по ледовой обстановке, так и по штормам. Наибольшее количество станций (>1100) приходится на май, июль, август и сентябрь, наименьшее (<800) – на январь (рис. 5). В остальные месяцы оно составляет от 906 до 1020 (в среднем 962) станций.

За всю историю разреза «Кольский меридиан» самый большой вклад в его выполнение внесли ПИНРО и МУГМС, около 99,7 % данных собраны российскими организациями (История океанографических исследований..., 2005). В ПИНРО имеется наиболее полный на сегодняшний день каталог наблюдений на разрезе «Кольский меридиан», который включает около 95 % всех случаев выполнения разреза (120 лет океанографических наблюдений..., 2022). Недостающая информация в настоящее время или

утеряна, или хранится в архивах МУГМС, курировавшей выполнение этого разреза до начала 1990-х годов, и Мурманского морского биологического института, проводившего на нем эпизодические наблюдения, но доступ к ней для сторонних организаций ограничен.

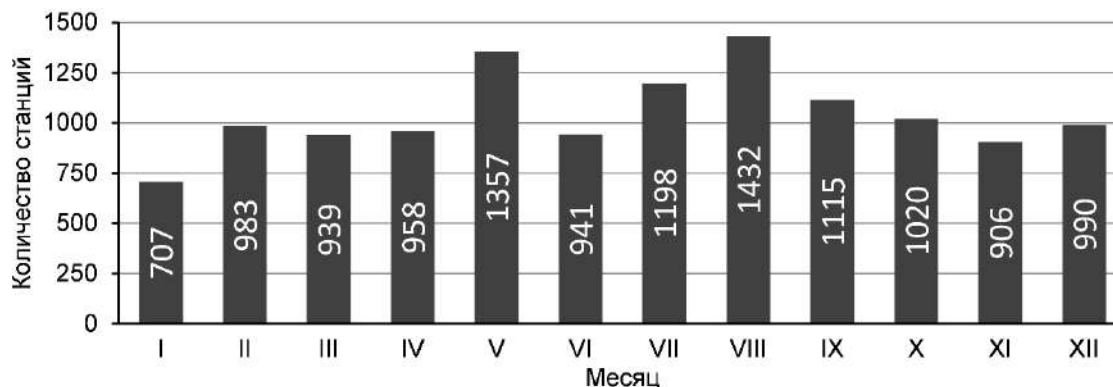


Рис. 5. Количество станций, выполненных на разрезе «Кольский меридиан» по месяцам за 1900-2023 гг.

В заключение следует отметить, что «Кольский меридиан» – вековой океанографический разрез с уникальной историей и неоценимым вкладом в науку. Результаты наблюдений широко используются как отечественными, так и зарубежными учеными при решении задач физической, промышленной и биологической океанографии. В ПИНРО собран самый большой массив данных и сформирован наиболее полный каталог наблюдений на разрезе, за все время сделано свыше 12,5 тыс. станций. К сожалению, в последние годы отмечается тенденция к значительному сокращению объема исследований, что вызывает беспокойство тем, что эти уникальные ряды данных могут безвозвратно прерваться. Поэтому необходимо продолжать наблюдения на этом разрезе, проводить их обобщение, систематизацию и анализ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Адров, Н.М. Очерки истории изучения и освоения Баренцева моря. Часть III (Первая половина XX века) / Н.М. Адров. – Мурманск: МГПИ, 2001. – 79 с.

Берг, Л.С. Почетный академик Николай Михайлович Книпович / Л.С. Берг // Вестник АН СССР. – 1950. – Вып. 8. – С. 76-83.

Брейтфус, Л.Л. Экспедиция для научно-промысловых исследований у берегов Мурмана / Л.Л. Брейтфус. – Санкт-Петербург, 1903. – 218 с.

Дерюгин, К.М. Баренцево море по Кольскому меридиану (33°30' в.д.) / К.М. Дерюгин // Труды Северной научно-промысловой экспедиции. – 1924. – Вып. 19. – 102 с.

История океанографических исследований на разрезе «Кольский меридиан» / А.П. Алексеев, А.В. Семенов, В.А. Боровков [и др.] // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: Сборник докладов Международного симпозиума. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2005. – С. 4-14.

Карсаков, А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900-2008 гг. / А.Л. Карсаков. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. – 139 с.

Книпович, Н.М. Основы гидрологии Европейского Ледовитого океана / Н.М. Книпович. – Санкт-Петербург, 1906. – 1510 с.

Конвенция о Международном совете по исследованию моря (Копенгаген, 12 сентября 1964 г.). – Копенгаген, 1964.

Пашкова, Т.Е. Николай Михайлович Книпович. Страницы жизни / Т.Е. Пашкова. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2006. – 60 с.

Под семизвездным синим флагом / редкол.: В.П. Пономаренко, А.П. Алексеев, Ю.Ю. Марти [и др.]. – Мурманск: Кн. изд-во, 1981. – 136 с.

Положение о вековых гидрологических наблюдениях на морях, омывающих берега СССР, и в устьях рек, впадающих в них / Главное управление гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Государственный океанографический институт. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 28 с.

120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, М.Ю. Анциферов [и др.]. – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2022. – 145 с.

Стрелкова, Н.А. История изучения бентоса на разрезе «Кольский меридиан» / Н.А. Стрелкова // Труды Кольского научного центра РАН. – Апатиты, 2016. – Вып. 3. – № 2: Океанология. – С. 7-29.

Терещенко, В.В. Сезонные и межгодовые изменения температуры и солености воды основных течений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море / В.В. Терещенко. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1997. – 71 с.

Терещенко, В.В. История освоения архипелага Шпицберген и российских океанографических исследований окружающих его вод / В.В. Терещенко. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2002. – 51 с.

Труды Мурманской научно-промысловой экспедиции 1906 г. // Отчет начальника экспедиции Л.Л. Брейтфуса. – Петроград, 1915. – 535 с.

Экспедиция для научно-промысловых исследований у берегов Мурманска / Сост. Н.М. Книпович. – СПб.: Товарищество Художественной печати, 1902. – Т. 1. – 605 с.

МОНИТОРИНГ ПЛЕНОЧНЫХ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В КОЛЬСКОМ ЗАЛИВЕ

А.Г. Александрова, П.Е. Жердев

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН), г. Владивосток*

Аннотация. Кольский залив выделяется в прибрежной акватории Баренцева моря как участок наиболее напряженного использования морских ресурсов, здесь выявлен ряд перспективных локальных структур на Кольско-Канинской моноклинали. Очевидно, что при высокой степени развития морской хозяйственной деятельности в Кольском заливе и на прилегающей части Баренцева моря обостряются экологические проблемы, важнейшими из которых следует признать химическое и нефтяное загрязнение. Представлена информация о результатах продолжающегося спутникового мониторинга Кольского залива, показана роль судоходства и транспортного узла в воздействии на уязвимость зоны прибрежных мелководий Кольского залива от нефти.

Ключевые слова: пленочные загрязнения, агрегирование, скопления нефти, диффузия нефтяных агрегатов, растекание нефти, радиолокационный мониторинг, судовой разлив, развитие морской деятельности, Кольский залив, Баренцево море.

ВВЕДЕНИЕ

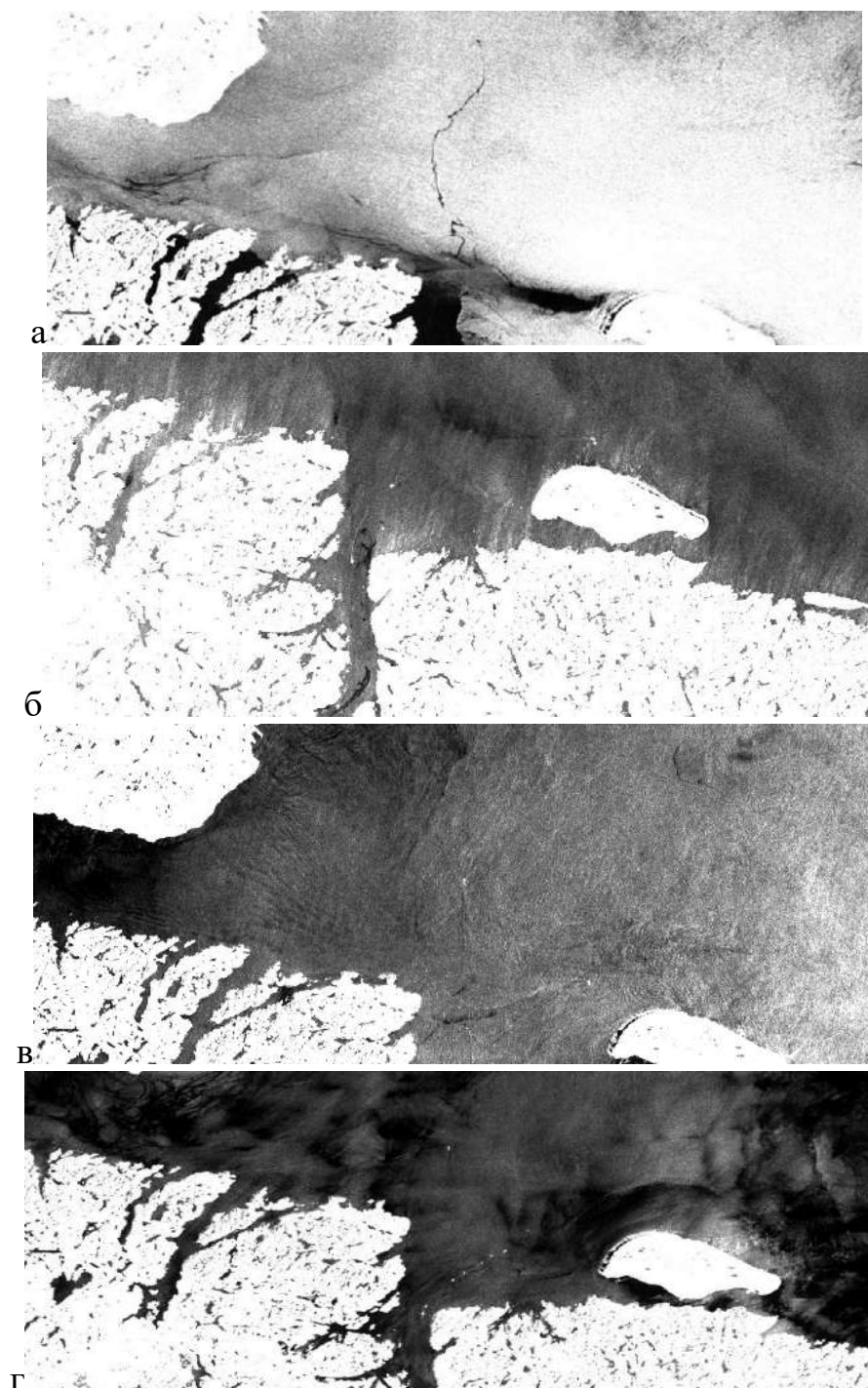
При высокой степени развития морской деятельности в Кольском заливе и на прилегающей части Баренцева моря резко обострены экологические проблемы, важнейшими из которых следует признать химическое и нефтяное загрязнения. В данной работе в продолжение анализа результатов спутникового радиолокационного мониторинга районов Баренцева моря была поставлена задача определить наличие (отсутствие) пленочных загрязнений в Кольском заливе за последние годы, а также изучить основные факторы воздействия (включая перемещение и направление дрейфа пленки) на пленочные нефтяные загрязнения в условиях изучаемого района.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные о нефтяном загрязнении, а именно радиолокационные изображения (РЛИ), были получены в рамках мониторинга спутников Sentinel-1 (IW-VVH). Радиолокаторы с синтезированной апертурой (SAR), установленные на спутниках Sentinel-1, обеспечивают получение РЛИ морской поверхности независимо от освещенности и погодных условий, хорошо показывают границы морского льда и островов, положение судов, что является важным фактором, учитывая физико-географические условия Баренцева моря. В силу очевидной разности контрастов использовался визуальный критерий выделения пленок и сликов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам радиолокационного мониторинга (см. рисунок) определяются следы судоходства и типичный сброс с судна.



Фрагменты радиолокационных изображений Кольского залива со спутника Sentinel-1 (IW-VVH): судовой разлив в территориальных водах Российской Федерации на подходах к Кольскому заливу (2018.08.09)(а); пленочные загрязнения, выносимые с залива (2017.08.17)(б); нефтяные пятна, разливы (2019.08.16)(в); нефтяные пятна, разливы (2020.08.05)(г) (Copernicus Data Space Ecosystem; Sentinel Hub)

Все пленочные загрязнения на радиолокационных изображениях наблюдаются в виде темных пятен. Суда, проходящие по заливу, оставляют за собой кильватерные следы, которые сохраняются некоторое время на поверхности моря. На многих радиолокационных изображениях отмечено, что пленки агрегируются на таких участках, а также имеют тенденцию дрейфовать от берегов по направлению к центру залива, а затем концентрироваться вдоль главного фарватера.

По результатам предыдущих работ (Кольский залив и..., 2018; Пленочные загрязнения Баренцева..., 2020) можно сказать, что для Кольского залива наиболее характерны техногенные загрязнения, связанные с деятельностью береговых предприятий. У входа в Кольский залив часто наблюдаются судовые разливы, здесь в основном детектируются тонкие фракции нефтесодержащих веществ, которые неустойчивы и разрушаются при скорости ветра более 5-7 м/с, однако могут присутствовать пленки сырой нефти и тяжелых нефтепродуктов, которые продолжают сохраняться на поверхности моря при скорости ветра до 9-12 м/с и существовать более суток. Для того чтобы отличить нефтяные пятна от других пленочных slicks на РЛИ, следует учесть, что в натуральных условиях нефть и нефтепродукты на поверхности моря формируют пятна самой разнообразной формы и размеров – от узких длинных, многокилометровых полос в следе за водными судами до маленьких округлых пятен, чаще всего нефтяные пленки не отслеживают поле поверхностных течений (Океан из космоса, 2023).

Согласно литературным данным (Кольский залив и..., 2018), необходимо учесть, что в изучаемом районе на состояние разлитой нефти, особенно на агрегированность, плотность и плавучесть тяжелых компонентов, оказывает влияние термохалинный режим водной среды, характеризующийся существенным изменением (средних величин) температуры (≈ 9 °C) и солености (≈ 28 ‰) верхнего 5-метрового слоя. Летние (июль-сентябрь) термохалинные условия в Кольском заливе поддерживают физико-химическую диссипацию нефти (растворение, растекание, испарение). В зимний период усиливается фактор агрегирования тяжелых фракций нефти. Зимой и в начале весны (до конца апреля) стратификация вод слабоустойчива и благоприятствует интенсивной диффузии мелкодисперсных примесей, в том числе нефтяных агрегатов, в глубинные слои. В другие месяцы водная толща имеет двухслойную плотностную структуру с пикноклином в слое 5-10 м, препятствующим проникновению нефтяной примеси в глубинные слои. Предполагается, что при нормальных условиях со слаборазвитым волнением разлитая нефть в основном будет оставаться и трансформироваться в верхнем 5-7-метровом слое. Пелитовые и алевроито-

пелитовые отложения в Кольском заливе, представленные глинистыми и алевроито-глинистыми илами жидкотекучей и текучепластичной консистенции, обладают достаточно высокой сорбционной емкостью для накопления как газовой фазы, так и жидких нефтяных углеводородов. Диффузия нефтяных агрегатов в водной толще определяется текущими условиями плотностной стратификации вод и интенсивностью волновой деятельности. Также разрушение волны у берегов является очень сильным фактором эмульгирования нефти, выброса ее прибоем в зону заплеска и увлечения нефтяных агрегатов стоковым течением в придонный слой, в наибольшей степени таким процессам подвержены берега среднего и особенно северного колена, где разрушение волн происходит в прибрежной полосе от изобаты примерно 10 м. Вынос нефтяных загрязнений в морской бассейн будет зависеть и от скорости перемещения разлитой нефти, которая может варьировать в зависимости от скоростей суммарного течения и касательного напряжения трения ветра в текущий момент. Максимальная скорость движения пятен будет свойственна южному колену, в котором скорость результирующего течения также максимальна. Траектория движения пятен нефти будет иметь тенденцию к отклонению к восточному берегу во время отлива.

Согласно такой схеме и вследствие положительного результирующего переноса восточный берег потенциально подвержен большему риску нефтяного загрязнения, чем западный в случае аварийных разливов внутри залива. Кроме того, схема переноса нефтяных пятен может осложняться ветровым воздействием.

Ледовый покров играет неоднозначную роль в проблеме нефтяного загрязнения залива и является фактором, препятствующим растеканию нефти по акватории залива. Со льдом нефть выносится в море, в то же время лед закрывает скопления нефти и осложняет ликвидацию нефтяного загрязнения на акватории и в прибрежной зоне залива. В целом ледовые условия, как и зимние погодные, оцениваются как неблагоприятные факторы при ликвидации аварийных разливов нефти. Зимой лед в Кольском заливе может появляться и выноситься многократно (несмотря на то, что сплоченность этого льда незначительна – около 1-2 баллов) и осложнять морскую хозяйственную деятельность. Вместе с тем в южном колене ледоставу препятствуют антропогенные факторы: сбросы теплых сточных вод, попуски воды с каскада Туломских ГЭС, разрушение льда судами. Лед взламывается судами по маршруту следования, в основном вдоль восточного берега.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для данного региона спутниковая радиолокация служит незаменимым средством мониторинга, которое может показать вклад антропогенной составляющей суммарного содержания нефтяных загрязнений. В этой связи комплексный экологический мониторинг Кольского залива, осуществляемый круглогодично, приведет к решению вопросов, связанных с обнаружением и локализацией нефтяных загрязнений на морской поверхности, и должен быть продолжен.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Кольский залив и нефть: биота, карты уязвимости, загрязнение / под ред. д.г.н. А.А. Шавыкина; ММБИ КНЦ РАН. – СПб.: Реноме, 2018. – 520 с. – DOI 10.25990/renomespb.w0pj-zq52.

Океан из космоса. R&D Center ScanEx. Пленки ПАВ и нефтяные загрязнения. – Текст электронный. – URL: <http://oceanfromspace.scanex.ru/index.php/ocean/oilpollution> (дата обращения 20.12.2023).

Пленочные загрязнения Баренцева моря по данным радиолокационного мониторинга 2017-2019 гг. / А.Ю. Кучейко, А.Ю. Иванов, Н.В. Евтушенко [и др.] // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 7. – С. 48-55. – DOI 10.18412/1816-0395-2020-7-48-55.

Copernicus Data Space Ecosystem. – Текст электронный. – URL: <https://dataspace.copernicus.eu> (дата обращения 13.10.2023).

Sentinel Hub – Текст: электронный. – URL: <https://sentinel-hub.com> (дата обращения 13.10.2023).

ДАННЫЕ «КОЛЬСКОГО МЕРИДИАНА» – ИНДИКАТОР ВЛИЯНИЯ ОКЕАНА НА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

Г.В. Алексеев, Н.И. Глок, Н.Е. Харланенкова
*Арктический и антарктический научно-исследовательский
институт (АНИИ), г. Санкт-Петербург*

Аннотация. Благодаря наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан», начатым в XX в., получен уникальный ряд данных о температуре, отражающей колебания притока атлантической воды (АВ) в Баренцево море. Усиление или ослабление притока влияет не только на распространение льдов в море, но и является важным процессом в формировании климата всей морской Арктики. Поступая из Северной Атлантики, АВ распространяется по акватории Норвежского, Гренландского и Баренцева морей. Данные разреза служат индексом, отражающим поступление и влияние АВ на климатические условия в Арктике.

Ключевые слова: температура воды, «Кольский меридиан», низкие широты, Арктика, морской лед.

ВВЕДЕНИЕ

На особую роль океана в формировании долгопериодных колебаний погоды и климата обратили внимание советские ученые во главе с академиком Г.И. Марчуком. И уже в 1980-х годах была принята специальная программа наблюдений в океане на системе разрезов и полигонов (Программа исследования атмосферы..., 1981), в том числе в Атлантическом океане.

Современные исследования с использованием глобальных совместных моделей климата подтверждают ключевую роль океана в формировании долгопериодных колебаний погоды и климата и их предсказуемости (Skillful prediction of..., 2017; Robust skill of..., 2019). При этом выделяется влияние из низких широт океана, где накапливается основная часть солнечного тепла, поступающего к Земле и распространяющегося циркуляцией атмосферы и океана в умеренные и высокие широты (Tropical origins for..., 2001), включая Арктику (Влияние аномалий температуры..., 2019; Влияние атмосферных переносов..., 2016; Влияние Северной Атлантики..., 2016; Семенов, 2008; Influence of SST..., 2021; Årthun, Eldevik, 2016). Меридиональные потоки атмосферного тепла и влаги поступают в Арктику большей частью между 0 и 80° в.д. в слое атмосферы от поверхности до 750 гПа (Impact of atmospheric, 2019). Особая роль принадлежит притоку водяного пара, усиливающему парниковый

эффект, который замедляет нарастание льда зимой и ускоряет начало его таяния.

Источники притоков тепла и влаги находятся в низких широтах, где в океане накапливается большая часть тепла, в том числе в результате глобального потепления. Температура поверхности океана (ТПО) здесь усиливает атмосферную циркуляцию и переносы с участием волн Россби (Interdecadal change of..., 2015), конвекции и циркуляции Хедли (Stationary wave interference..., 2016), осцилляций Маддена-Джулиана (МДО) (The impact of..., 2011; Arctic response to..., 2012). ТПО в низких широтах Северной Атлантики особенно влияет на атмосферный и океанский перенос тепла в приатлантическую Арктику (Influence of SST..., 2021).

Приток воды из Атлантики ограничивает зимнее распространение льда в приатлантической Арктике, а увеличение притока ведет к сокращению ледяного покрова (Семенов, 2008; Årthun, Eldevik, 2016). В низких широтах Северной Атлантики формируются аномалии температуры поверхности океана, влияние которых через 2-3 года проявляется в изменениях притока тепла, температуре воды и протяженности морского льда (Влияние атмосферных переносов..., 2016; Influence of SST..., 2021).

Приатлантическая Арктика, включающая моря Гренландское, Баренцево и Карское и прилегающую часть Арктического бассейна, находится под обогревающим влиянием Северной Атлантики (Визе, 1937; Захаров, 1981; Книпович, 1906). Теплая соленая вода поступает через Фареро-Шетландский пролив в Норвежское и Гренландское моря и далее в Арктический бассейн и Баренцево море. Над этой водой распространяются потоки теплого и влажного воздуха, перемещающиеся на восток и северо-восток в арктические моря и Арктический бассейн. Вода с положительной температурой на поверхности Баренцева моря в холодную часть года является «обогревателем» баренцевоморского региона, однако его мощность колеблется вслед за изменениями циркуляции атмосферы и водных масс в Северной Атлантике, обеспечивающих перенос тепла из низких широт к высоким.

Благодаря многолетним океанографическим наблюдениям в Баренцевом море, особенно ценные данные о колебаниях температуры как индикаторе притока атлантической воды содержатся в материалах исследований на разрезе вдоль «Кольского меридиана» (33°30' в.д.), которые были начаты в XX в. и продолжаются до сих пор (История океанографических исследований..., 2005). На основе регулярных океанографических наблюдений на разрезе сотрудниками ПИНРО созданы и поддерживаются уникальные ряды средней температуры и солености в

различных слоях воды и на разных участках разреза (Бочков, 1982; Карсаков, 2009).

Поступление теплой соленой воды из Северной Атлантики является важным процессом для формирования климата всей морской Арктики, а приток атлантической воды в Арктический бассейн составляет часть глобального океанического конвейера, связывающего океаны транспортом тепла, соли и пресной воды. Поступая из Северной Атлантики, АВ распространяются по акватории Норвежского, Гренландского и Баренцева морей и проникают в Арктический бассейн, где занимают промежуточный слой на глубинах от 100 до 800 м (Тимофеев, 1960; Трешников, Баранов, 1972). Атлантическая вода служит важным источником тепла в приатлантическом секторе Арктики и источником соли для арктических вод, подвергающихся постоянному опреснению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы данные наблюдений на арктических гидрометеорологических станциях, сведения о площади арктических морских льдов, представленные на сайте ААНИИ (AARI WDC Sea Ice file server), и температуре поверхности океана из реанализа HadISST (Hadley Centre Sea..., 2023). Для характеристики теплового состояния вод, поступающих из Атлантики в Баренцево море, рассматривали материалы ПИНРО о температуре в слое 50-200 м на «Кольском меридиане» (Полярный филиал ФГБНУ..., 2023), которая применялась как индикатор влияния АВ на климат и морской лед на акватории Северного морского пути (СМП).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приток АВ и перенос тепла и влаги из Северной Атлантики и низких широт (Семенов, 2008; Влияние Атлантики на..., 2017; Влияние Северной Атлантики..., 2016; Moisture origin, transport..., 2022) – важные факторы, влияющие на климат в регионе Северо-Европейского бассейна и прилегающей Арктики. Перенос океанского тепла из низких широт океана в широты, откуда тепло переносится атмосферной циркуляцией на сушу и покрытую льдом часть Северного Ледовитого океана, обеспечивает запаздывание колебаний климата здесь относительно аномалий ТПО в несколько лет (Влияние аномалий температуры..., 2019; Влияние Северной Атлантики..., 2016; Influence of SST..., 2021).

Основанием для оценки связи между изменениями ТПО в низких широтах и климата в Арктике служит зависимость между его аномалиями и атмосферными и океанскими переносами тепла и влаги в регион

(Влияние аномалий температуры..., 2019; Influence of SST..., 2021). Полученные оценки связи между аномалиями ТПО в низких широтах, в Северо-Европейском бассейне и температурой воздуха и параметрами морского ледяного покрова в Арктике с участием изменений содержания водяного пара и нисходящей длинноволновой радиации обобщены в виде графа корреляций (рис. 1).

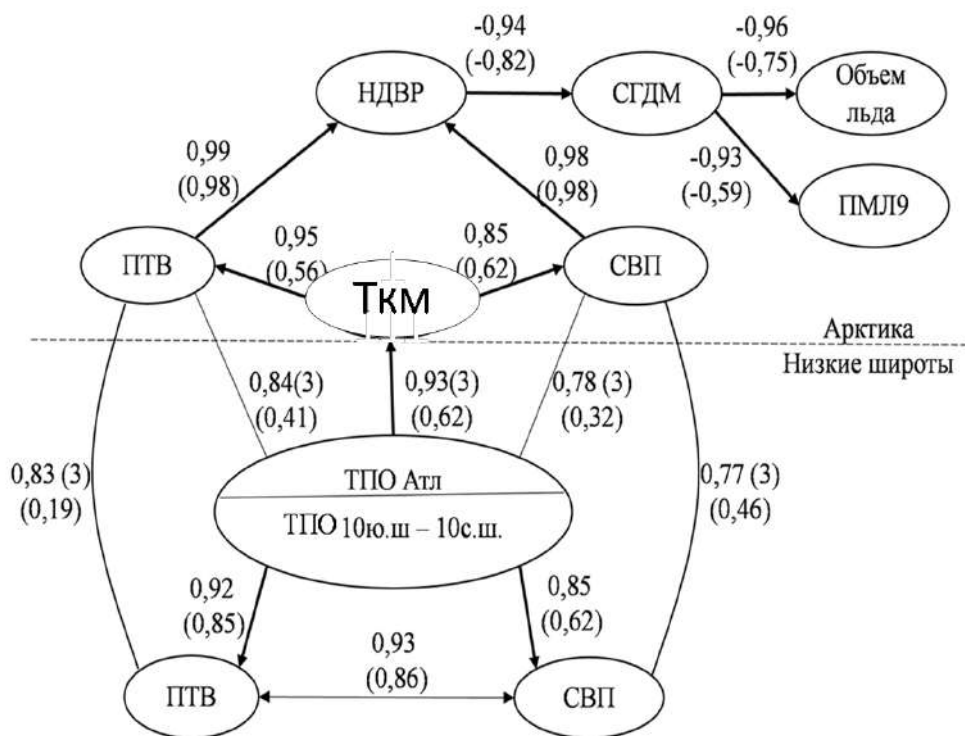


Рис. 1. Граф корреляций, связывающих ТПО в низких широтах, температуру воды на разрезе «Кольский меридиан» и параметры климата и морского льда в Арктике: ПТВ – приповерхностная температура воздуха; СВП – содержание водяного пара в атмосфере; ТПО – температура поверхности океана; Ткм – температура воды на разрезе «Кольский меридиан» (ст. 3-7, слой 50-200 м); НДВР – нисходящая длинноволновая радиация; СГДМ – сумма градусо-дней мороза; ПМЛ9 – площадь, занятая морским льдом в сентябре в Северном Ледовитом океане. В овалах указаны параметры атмосферы и океана. Связи обозначены стрелками, у которых проставлены соответствующие коэффициенты корреляции, в скобках – запаздывания (в годах). Ряды коррелируемых параметров сглажены скользящим 3-летним осреднением. В скобках ниже указаны корреляции без тренда

Согласно схеме, ТПО в экваториальной области (10° ю.ш.-10° с.ш.) определяет изменения температуры воздуха и содержания водяного пара в районе 0-25° с.ш. и температуры поверхности в тропической части Северной Атлантики (5-25° с.ш., 60-10° з.д.), октябрьские значения которой, в свою очередь, влияют на зимнюю ТПО в Норвежском, Гренландском и Баренцевом морях через 27 мес. (на третий год).

Индикатором изменений служит температура воды в слое 50-200 м на разрезе «Кольский меридиан» в декабре-январе (Ткм). Последующий

рост температуры воздуха и содержания водяного пара в Арктике под влиянием атмосферных переносов в основном из приатлантической части, а также из низких широт (Moisture origin, transport..., 2022) способствует повышению притока длинноволновой радиации к поверхности снега и льда, уменьшению суммы отрицательных температур воздуха и зимнего нарастания льда, что в последующем ускоряет летнее сокращение ледяного покрова.

На рис. 2 сопоставлены изменения $T_{км}$, СГДМ и площади морского льда в сентябре на акватории СМП, которые подтверждают тесную связь между ними. Высокие значения коэффициентов корреляции указывают на соответствие между изменениями параметров за рассматриваемый период. Изменения согласованы не только трендом, но и периодами медленных до конца 1990-х годов и ускоренных изменений позднее.

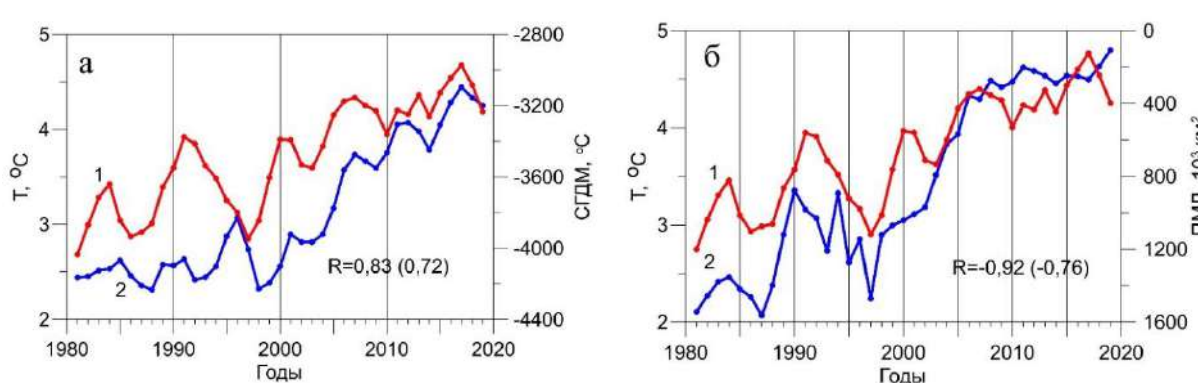


Рис. 2. Изменения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и параметров климата Арктики: а – температура воды в январе-апреле на разрезе (1) и СГДМ в октябре-апреле на акватории СМП (2); б – температура воды в январе-апреле на разрезе (1) и площадь морского льда в сентябре на акватории СМП (2). R – коэффициент корреляции между рядами (1) и (2), сглаженными 3-летним скользящим осреднением. В скобках – коэффициент корреляции между несглаженными рядами

Спектры изменений рассматриваемых характеристик атмосферы и океана содержат основную часть (50-70 %) дисперсии на низких частотах (периоды более 16 лет). Спектральный анализ связи показывает также наиболее высокую когерентность на этих периодах. Высоочастотная часть спектра (периоды менее 3 лет) вносит несущественный вклад (менее 10 %) в изменчивость при незначимой когерентности и поэтому удаляется при сглаживании рядов с окном три года.

Корреляция между ТПО в тропиках Северной Атлантики и температурой воды в слое 50-200 м на разрезе «Кольский меридиан» в декабре-феврале спустя 27 мес. составила 0,71 за 1979-2020 гг., а после сглаживания рядов 3-летним скользящим осреднением возросла до 0,90 (рис. 3).

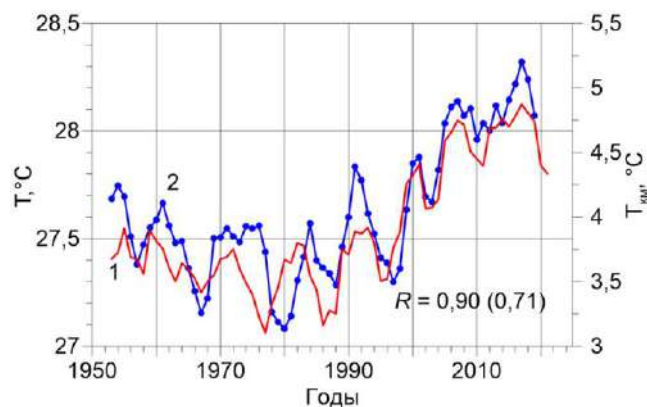


Рис. 3. Изменения среднемесячной температуры воды в октябре в тропической области Северной Атлантики (5°-25° с.ш., 10°-60° з.д. (1)) и на разрезе «Кольский меридиан» в декабре-феврале (2) спустя 27 мес. Ряды сглажены скользящим 3-летним осреднением

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поступление теплой соленой воды из Северной Атлантики является важным процессом в формировании климата морской Арктики. Изменения температуры воды, поступающей из Атлантики в Баренцево море, отражаются в изменениях температуры в слое 50-200 м на разрезе «Кольский меридиан».

Изменения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» в январе-апреле влияют на изменения суммы градусо-дней мороза в октябре-апреле и площади морского льда в сентябре на акватории СМП. Корреляция между ними характеризуется коэффициентами 0,72 и -0,76 соответственно. После сглаживания рядов 3-летним скользящим осреднением коэффициенты возрастают до 0,83 и -0,92 соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Бочков, Ю.А. Ретроспектива температуры воды в слое 0-200 м на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море (1900-1981 гг.) / Ю.А. Бочков // Труды ПИНРО. – 1982. – С. 113-122.

Визе, В.Ю. Причины потепления Арктики / В.Ю. Визе // Советская Арктика. – 1937. – Т. 1. – С. 1-7.

Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость / Г.В. Алексеев, А.Е. Вязилова, Н. И. Глок [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2019. – Т. 3, № 35. – С. 73-83.

Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике / Г.В. Алексеев, С.И. Кузмина, Н.И. Глок [и др.] // Лед и снег. – 2017. – Т. 57, № 3. – С. 381-390.

Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период / Г.В. Алексеев, С.И. Кузьмина, А.В. Уразгильдеева, Л.П. Бобылев // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2016, Т. 1. – С. 43-63.

Влияние Северной Атлантики на колебания климата в Баренцевом море и их предсказуемость / Г.В. Алексеев, Н.И. Глок, А.В. Смирнов, А.Е. Вязилова // *Метеорология и гидрология*. – 2016, № 8. – С. 38-56.

Захаров, В.Ф. Льды Арктики и современные природные процессы / В.Ф. Захаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 136 с.

История океанографических исследований на разрезе «Кольский меридиан» / А.П. Алексеев, А.В. Семенов, В.А. Боровков [и др.] // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: Сборник докладов Международного симпозиума. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2005. – С. 4-14.

Карсаков, А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900-2008 гг. / А.Л. Карсаков. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. – 139 с.

Книпович, Н.М. Основы гидрологии Европейского Ледовитого океана / Н.М. Книпович. – Санкт-Петербург, 1906. – 1510 с.

Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича). Текст: электронный. – URL: <http://www.pinro.vniro.ru/> (дата обращения 15.11.2023).

Программа исследования атмосферы и океана в целях изучения короткопериодных изменений климата (программа «Разрезы») / ред. Г.И. Марчук. – Москва : ВИНТИ, 1981. – Т. 1. – 60 с.

Семенов, В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике / В.А. Семенов // *Доклады РАН*. – 2008. – Т. 418, № 1. – С. 106-109.

Тимофеев, В.Т. Водные массы Арктического бассейна / В.Т. Тимофеев. – Ленинград: Гидрометиздат, 1960. – 190 с.

Трешников, А.Ф. Структура циркуляции вод Арктического бассейна / А.Ф. Трешников, Г.И. Баранов. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 158 с.

AARI WDC Sea Ice file server. – Текст: электронный. – URL: <http://wdc.aari.ru/datasets> (дата обращения 15.11.2023).

Årthun, M. On anomalous ocean heat transport toward the Arctic and associated climate predictability / M. Årthun, T. Eldevik // *Journal of Climate*. – 2016. – Vol. 29, № 2. – P. 689-704.

Stationary wave interference and its relation to tropical convection and Arctic warming / M. Goss, S.B. Feldstein, S. Lee // *Journal of Climate*. – 2016. – Vol. 29, № 4. – P. 1369-1389.

Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set (HadISST)
Текст: электронный // Met Office Hadley Centre observations datasets. – URL:
<http://hadobs.metoffice.com.hadsst> (дата обращения 10.12.2023).

Tropical origins for recent North Atlantic climate change / M.P. Hoerling,
J.W. Hurrell, T. Xu // *Science*. – 2001. – Vol. 292, № 5514. – P. 90-92.

Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic
warming / G.V. Alekseev, S.I. Kuzmina, L.P. Bobylev [et al.] // *International
Journal of Climatology*. – 2019. – Vol. 39, № 8. – P. 1-11.

Influence of SST in low latitudes on the Arctic warming and sea ice /
G.V. Alekseev, N.I. Glok, A.E. Vyazilova [et al.] // *Journal of Marine Science
and Engineering*. – 2021. – Vol. 9, № 1145.

Moisture origin, transport pathways, and driving processes of intense
wintertime moisture transport into the Arctic / L. Papritz, D. Hauswirth,
K. Hartmuth // *Weather Clim. Dynam.* – 2022. – Vol. 3, № 1. – P. 1-20.

Robust skill of decadal climate predictions / D.M. Smith, R. Eade,
A.A. Scaife [et al.] // *npj Climate and Atmospheric Science*. – 2019. – Vol. 2,
№ 1. – P. 13.

Skillful prediction of northern climate provided by the ocean / M. Årthun,
T. Eldevik, E. Viste [et al.] // *Nature Communications*. – 2017. – Vol. 8,
№ 15875. – P. 1-9.

Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and
atmospheric circulation in the late 1980s / K. Ye, R. Wu, Y. Liu // *Journal of
Geophysical Research: Atmospheres*. – 2015. – Vol. 120, № 7. – P. 2738-2753.

The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic
amplification of surface air temperature during the 1979-2008 boreal winter /
C. Yoo, S. Feldstein, S. Lee // *Geophysical Research Letters*. – 2011. – Vol. 38,
№ 24. – P. 1-6.

Arctic response to an MJO-like tropical heating in an idealized GCM /
C. Yoo, S. Lee, S.B. Feldstein // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. –
Vol. 69, № 8. – P. 2379-2393.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

К.В. Артамонова¹, О.Н. Лукьянова², В.С. Запотылько², С.В. Гладышев²

*¹Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»)*

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), г. Москва

Аннотация. На основе данных, полученных в летний период (июнь-август) с 2002 по 2021 г. на океанологических разрезах в Северной Атлантике (ежегодно повторяющийся разрез по 59,5° с.ш, разрезы через Датский пролив, между Исландией и Фарерскими о-вами и между Фарерскими и Шетландскими о-вами), рассмотрена структура вод, выделены водные массы, проанализирована изменчивость их гидролого-гидрохимических характеристик. Структура вод в районе проливов представлена верхним слоем (с плотностью $\sigma_0 < 27,80 \text{ кг/м}^3$), занятым теплыми и солеными водами атлантического происхождения, характеризующимися минимумом растворенного кислорода на глубине около 200 м, а также глубинным слоем (с плотностью $\sigma_0 > 27,80 \text{ кг/м}^3$), заполненным холодными и менее солеными арктическими водами. На разрезе по 59,5° с.ш. по экстремумам растворенного кислорода и биогенных элементов выделены промежуточные и глубинные воды восточного и западного бассейнов. В восточном бассейне по минимуму потенциальной температуры, максимуму силикатов и минимуму растворенного кислорода хорошо прослеживаются придонные воды антарктического происхождения.

Получено, что характеристики и толщина слоя исследуемых водных масс сильно меняются год от года. Выявлена значительная короткопериодная (в масштабе нескольких суток) изменчивость структуры и характеристик водных масс в исследуемом регионе.

Ключевые слова: структура вод, водные массы, изменчивость, растворенный кислород, биогенные элементы, Северная Атлантика.

ВВЕДЕНИЕ

Северная часть Атлантического океана является важным регионом для понимания процессов, определяющих все климатические изменения не только в самой Атлантике, но и в Европейской части России. Образующиеся в Северной Атлантике глубинные воды распространяются на юг, а затем и по всему Мировому океану, а компенсационный поток теплых поверхностных вод, замыкающий глобальную меридиональную циркуляцию, через Южную Атлантику обеспечивает дополнительный приток тепла в этот регион.

Для мониторинга современных тенденций изменения климата регулярные наблюдения за состоянием и изменчивостью структуры и

характеристиками вод этого региона имеют несомненную важность. Уникальность представленного в работе океанологического разреза по $59,5^{\circ}$ с.ш. заключается в его повторении в течение длительного периода (около 20 раз), что в океанологической практике судовых исследований следует считать редкостью, учитывая важность региона для оценки многолетних изменений. Для оценки современных климатических изменений в высоких широтах северного полушария, в том числе для выявления механизма распространения климатических аномалий из Атлантики в арктический бассейн, необходимы оперативные оценки изменчивости характеристик вод и интенсивности их переноса через проливы, отделяющие Арктику и Атлантику.

Цель данного исследования – на основе многолетних данных, полученных с 2002 по 2021 г. на океанологическом разрезе по $59,5^{\circ}$ с.ш., а также на разрезах через проливы между Гренландией и Шетландскими о-вами, проанализировать структуру вод Северной Атлантики: выделить водные массы, определить их гидролого-гидрохимические характеристики, рассмотреть изменчивость характеристик промежуточных и глубинных вод.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные получены на научно-исследовательских судах ИО РАН в период с мая по сентябрь в 2002-2021 гг. на океанологическом разрезе по $59,5^{\circ}$ с.ш. а также на разрезах через проливы между Гренландией и Шетландскими о-вами (с 2011 по 2019 г.), при этом в проливах проводились повторные наблюдения на каждой станции в течение одного года. Положение разреза показано на рис. 1.

На каждой станции проводились измерения параметров морской воды от поверхности до дна с помощью зондирующего комплекса SBE911p/SBE-32/LADCP, отбор проб воды для выполнения гидрохимического анализа, измерение трех составляющих скорости течений в толще океанских вод с помощью акустических доплеровских профилографов течений. Для отбора проб морской воды на гидрохимический анализ в комплексе с океанографическим зондом использовалась батометрическая секция General Oceanics Rosette на 24 батометра. Батометры закрывались на горизонтах, соответствующих различным водным массам, так, чтобы достаточно равномерно отобрать пробы во всей водной толще и определить положение ядер водных масс и границы между ними. Гидрохимический анализ проводился в судовой лаборатории сразу после отбора проб по рекомендованным методикам для морских вод (Руководство по химическому..., 2003) и включал определение

содержания растворенного кислорода, минерального фосфора и растворенного кремния. В 2002 г. были выполнены определения минеральных форм азота.

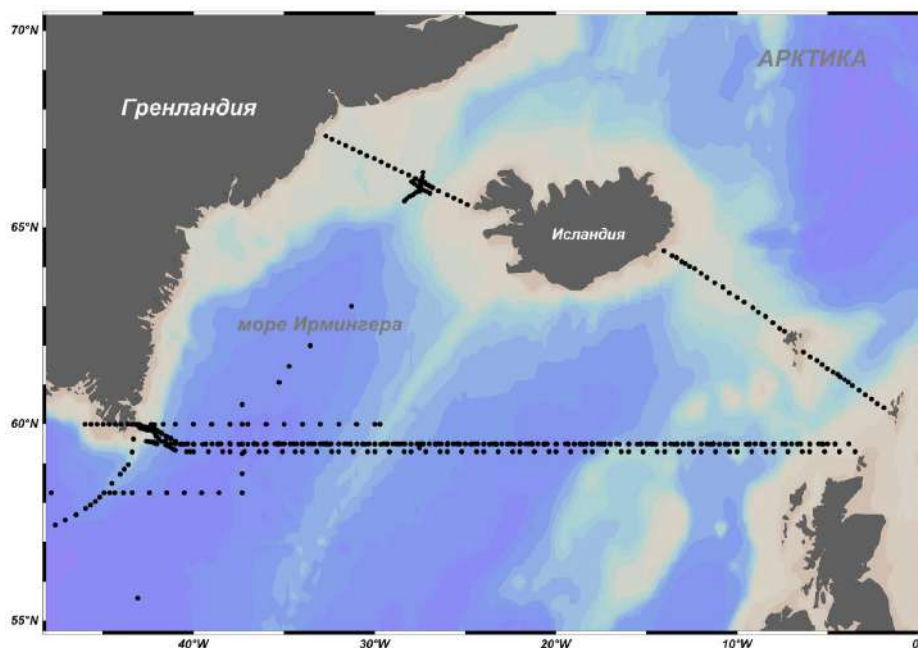


Рис. 1. Схема станций, выполненных с 2002 по 2021 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Воды на разрезе по $59,5^\circ$ с.ш. (рис. 2) состоят из поверхностных вод, летняя модификация которых представлена верхним (до глубины 50-60 м) прогретым, распресненным слоем, перенасыщенным растворенным кислородом и обедненным биогенными элементами. При этом в западной части разреза, занятой водами холодного Восточно-Гренландского прибрежного течения, относительное содержание кислорода максимально, а в восточной, находящейся под влиянием теплого Северо-Атлантического течения, наблюдается минимум концентраций биогенных элементов. Ниже фотического слоя располагались Субполярные модальные воды (СПМВ), на верхней границе которых происходит резкое увеличение биогенных элементов (в слое от 50 до 100 м). Эти воды формируются на периферии Северо-Атлантического течения в результате зимней конвекции (Brambilla, Talley, 2008). Потенциальная температура СПМВ уменьшается в направлении циклонической циркуляции вод в Субполярном круговороте: с $9-10^\circ\text{C}$ в восточной части разреза ($15-25^\circ$ з.д.) до $4-5^\circ\text{C}$ в море Ирмингера; потенциальная плотность (σ_0) увеличивается в том же направлении с $27,0 < \sigma_0 < 27,2$ до $27,6 < \sigma_0 < 27,7$. Содержание растворенного кислорода и концентрация биогенных элементов в СПМВ

возрастает с востока на запад, с максимумом в море Ирмингера, соответствуя направлению циклонической циркуляции вод в Субполярном круговороте.

Под слоем СПМВ и до глубины 1300 м в восточной части разреза по хорошо выраженному минимуму растворенного кислорода выделяется промежуточная водная масса восточного бассейна (СТПВ), представляющая собой сильно трансформированную Антарктическую промежуточную воду со смесью Средиземноморской (van Aken, Becker, 1996). Эти воды также характеризуются относительно высокой соленостью и температурой, максимумом фосфатов и нитратов. В западной части разреза, наоборот, по максимуму растворенного кислорода и минимуму солености прослеживается Лабрадорская промежуточная водная масса (ЛВ) субарктического происхождения. Характеристики ЛВ зависят от интенсивности приводящей к ее формированию зимней конвекции. Совокупность процессов адвекции из моря Лабрадор и локальной конвекции вне этого моря приводит к тому, что ЛВ в море Ирмингера представляет собой комбинацию вод, сформировавшихся в разные годы в двух (или более) очагах зимнего перемешивания (Sarafanov, 2009).

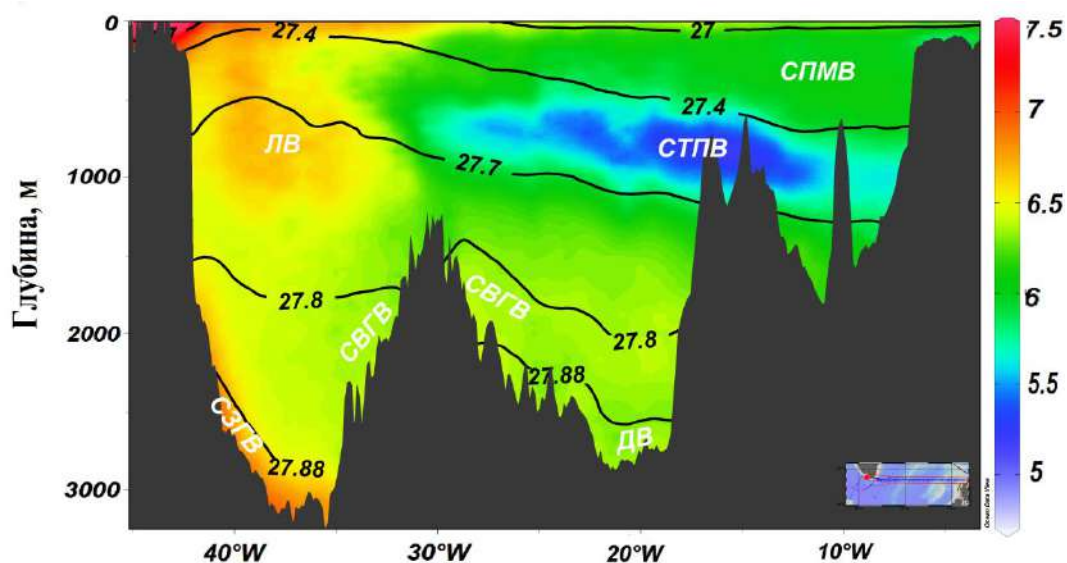


Рис. 2. Распределение растворенного кислорода, мл/л (выделено цветом) на разрезе по 59,5° с.ш. Изопикны потенциальной плотности (σ_t) показаны черными линиями, водные массы – белым цветом

Глубинные воды на разрезе представлены двумя водными массами: Северо-восточной глубинной водой (СВГВ) и Северо-западной глубинной водой (СЗГВ). У западного и восточного склонов хребта Рейкьянес на глубинах 1500-2500 м залегает СВГВ, для которой характерно более высокое содержание растворенного кислорода и пониженные

концентрации фосфатов и нитратов по сравнению с вышележащей промежуточной водой восточного бассейна. По глубинному максимуму растворенного кислорода у склона Гренландии на глубинах более 2000 м и до дна хорошо прослеживается СЗГВ, отличительными характеристиками которой являются пониженная температура и соленость. Для этой водной массы также характерны глубинные минимумы фосфатов, силикатов и нитратов.

В придонном слое по максимуму растворенного кремния (более 14 μM) и минимуму растворенного кислорода хорошо прослеживается донная вода восточного бассейна. Эти воды представляют собой продукт трансформации Антарктической донной водной массы, проникающей в восточный бассейн Северной Атлантики через разлом Вима (Abyssal Channels in..., 2010).

Анализ изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик в промежуточных и глубинных водах, выделенных на разрезе, показал, что в восточном бассейне в целом с 2002 г. отмечается тенденция к уменьшению содержания растворенного кислорода и увеличению концентрации биогенных элементов в промежуточных и глубинных водах. Так, содержание растворенного кислорода в слое промежуточной воды восточного бассейна изменялось от максимального 5,2-6,0 мл/л в 2002 г., уменьшаясь до 4,97-5,80 мл/л в 2011 г. и достигая минимума 4,85-5,80 мл/л в 2021 г. При этом от года к году менялась и толщина слоя этой водной массы. Максимальные концентрации фосфатов в слое промежуточной воды восточного бассейна соответствовали минимальному содержанию растворенного кислорода и наблюдались в 2021 г., достигая 1,41 μM , в то время как в 2002 г. максимальные концентрации фосфатов не превышали 1,28 μM .

Гидрохимические характеристики СВГВ были более инертны, содержание кислорода в 2002 г. в слое составляло 6,60-6,74 мл/л, а в 2021 г. не превышало 6,46 мл/л, в то время как концентрация фосфатов практически не изменилась, а содержание силикатов в целом увеличилось. В восточном бассейне придонный слой, заполненный водой, также характеризовался сильной изменчивостью как по положению и толщине слоя, так и по абсолютным концентрациям биогенных элементов (силикатов). Наиболее мощный слой ее наблюдался в 2011 и 2021 гг., концентрации силикатов достигали максимальных величин (17-19 μM).

В западном бассейне наибольшей изменчивостью отличались ЛВ, характеристики которых зависят от интенсивности, приводящей к их формированию зимней конвекции. Так, в 2014-2016 г. ЛВ распространялись на глубинах до 1800 м, а содержание кислорода во всем слое повысилось до более 7 мл/л. В периоды менее интенсивной

конвекции ЛВ была менее плотная и распространялась на меньших глубинах (до 1200 м), содержание кислорода в ней не превышало 6,6 мл/л. Характеристики СЗГВ также менялись год от года. Наиболее мощный слой с максимальными экстремумами кислорода и биогенных элементов наблюдался в 2002 г. Глубинный максимум кислорода достиг 7,3 мл/л, а концентрации биогенных элементов были минимальны.

Структура вод в районе проливов представлена верхним слоем (с плотностью $\sigma_0 < 27,80$ кг/м³), занятым теплыми и солеными водами атлантического происхождения, характеризующимися минимумом растворенного кислорода на глубине около 200 м, а также глубинным слоем (с плотностью $\sigma_0 > 27,80$ кг/м³), заполненным холодными и менее солеными арктическими водами. На разрезе через Датский пролив показано, что арктические воды с плотностью $\sigma_0 > 27,80$ кг/м³ перетекают в море Ирмингера не только через наиболее глубокий канал в проливе, как считалось ранее, но и над шельфом Гренландии на глубинах более 250 м. Эти воды характеризуются минимальными значениями потенциальной температуры ($-0,5$ - $0,5$ °С), максимальными значениями солености (34,90-34,92 ЕПС) и высоким содержанием растворенного кислорода ($>6,95$ мл/л). Данные четырех съемок подтверждают пульсационный характер проникновения наиболее плотных арктических вод в Атлантику: в течение одной недели наблюдались изменения объема вод с температурой менее $0,5$ °С и соленостью более 34,89 ЕПС. Поток теплых ($\theta > 7$ °С) и соленых атлантических вод с низким содержанием кислорода ($<6,9$ мл/л) также менялся: то раздваивался, то снова сливался в единую струю.

На разрезе между Исландией и Фарерскими о-вами перенос теплых и соленых атлантических вод зафиксирован во всем слое с $\sigma_0 < 27,80$ кг/м³. Наиболее соленые ($S > 35,3$ ЕПС) воды с низким содержанием растворенного кислорода выявлены в юго-восточной части разреза на глубинах менее 200 м. При этом распределение кислорода указывает на возможное существование трех основных струй атлантических вод: в юго-восточной, центральной и северо-западной частях разреза. Перенос холодных, менее соленых, богатых кислородом арктических вод с плотностью более $\sigma_0 = 27,80$ кг/м³ происходит через наиболее глубокие каналы в Исландско-Фарерском пороге. Глубинные воды с минимальной соленостью (34,85-34,92 ЕПС) и температурой (<2 °С), а также с высоким содержанием кислорода (>7 мл/л) и силикатов (>10 мМ) зафиксированы в центральной части разреза на участке $9,7$ - $11,3^\circ$ з.д. Сравнительный анализ распределения гидрологических и гидрохимических параметров морской воды на разрезе между Исландией и Фарерскими о-вами в течение двух съемок, выполненных последовательно в течение одной недели, указывает на наличие существенной короткопериодной изменчивости состояния

толщи вод в этом регионе. В течение нескольких суток между съемками произошло значительное сокращение объема арктических вод с соленостью менее 34,98 ЕПС в придонных слоях. В структуре атлантических вод, переносимых над порогом Северо-Атлантическим течением, также произошли изменения. В районе 11,0-11,5° з.д. в слое 0-200 м исчез язык повышенной солености, а содержание кислорода на глубинах 150-250 м уменьшилось. В ядре атлантических вод над шельфом Исландии соленость уменьшилась на 0,05 ЕПС.

На разрезе через Фарерско-Шетландский пролив глубиной около 1200 м также в верхних 400-600 м происходит перенос теплых и соленых атлантических вод в арктический бассейн, в более глубоких слоях – перенос менее соленых, холодных промежуточных и глубинных вод Норвежского моря в обратном направлении, в субполярную Атлантику. Атлантические воды с наибольшей соленостью (>35,4 ЕПС) зафиксированы в южной части разреза, над шельфом Шетландских о-вов. Глубже атлантических вод, на глубине 500-830 м, располагался минимум солености, характерный для Промежуточной Воды Норвежского моря (Decadal variability in..., 1999) в плотностном интервале $28,0 < \sigma_0 < 28,05$ кг/м³. Значения солености и потенциальной температуры в этом ядре составили 34,89-34,90 ЕПС и -0,5-3,0 °С соответственно. Глубже распространялись более соленые (34,90-34,91 ЕПС), холодные (-1-0 °С) и богатые силикатами (>10 μМ) воды арктического происхождения. Эту водную массу традиционно называют Глубинной Водой Норвежского моря (Decadal variability in..., 1999). Положение разреза, выполненного через Фарерско-Шетландский пролив, практически совпадает с положением стандартного разреза Nolso-Flugga (Decadal variability in..., 1999), наблюдения на котором проводились регулярно с начала XX в. Сравнение с данными съемок предыдущих лет не выявило однонаправленных изменений структуры или характеристик водных масс в 2000-е годы, однако сравнение характеристик арктических вод на глубинах около 800 м со столетним рядом солености Промежуточной Воды Норвежского моря в Фарерско-Шетландском проливе свидетельствует о продолжении долговременного опреснения промежуточных арктических вод, поступающих в субполярную Атлантику. Опреснение началось в середине 1970-х и продолжалось до конца 1990-х годов (Decadal variability in..., 1999). За этот период соленость промежуточных вод Норвежского моря в проливе уменьшилась с 34,93 до 34,90 ЕПС. Анализ данных 2000-х годов показывает, что в 2003-2019 гг. соленость данной водной массы достигла 34,89 ЕПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены уникальные данные о структуре вод на северной границе Атлантического океана, а также сведения о короткопериодной и межгодовой изменчивости гидрологических и гидрохимических характеристик.

Характеристики и толщина слоя исследуемых водных масс сильно меняются от года к году, при этом за период исследования не выявлено однонаправленных изменений структуры или характеристик водных масс. Можно отметить наиболее глубокую конвекцию в 2014-2016 гг., когда ЛВ распространялись на глубину 1800 м.

Данные последовательных съемок позволили выявить значительную короткопериодную (в масштабе нескольких суток) изменчивость структуры и характеристик водных масс на границе Атлантики и Арктического бассейна. В частности, за несколько суток между Исландией и Фарерскими о-вами произошло значительное сокращение объема арктических вод с соленостью менее 34,98 ЕПС, в Фарерско-Шетландском проливе – изменение пространственной структуры Северо-Атлантического течения, а в Датском проливе в течение одной недели наблюдались изменения объема вод как атлантических, так и арктических вод. В дальнейшем полученные сведения помогут лучше понимать процесс взаимодействия арктических и атлантических вод.

Благодарность

Авторы благодарят всех своих коллег, которые принимали участие в получении данных, а также экипажи научно-исследовательских судов ИО РАН за помощь в проведении исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-17-00032.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / В.В. Сапожников, А.И. Агатова, Н.В. Аржанова [и др.]. – М.: Изд-во ВНИРО, 2003. – 202 с.

Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows / E.G. Morozov, A.N. Demidov, R.Y. Tarakanov, W. Zenk. – New York: Springer, 2010. – 266 p.

Brambilla, E. Subpolar Mode Water in the northeastern Atlantic: 1. Averaged properties and mean circulation / E. Brambilla, L.D. Talley // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113. – DOI 10.1029/2006JC004062.

Decadal variability in the composition of Faroe Shetland Channel / W.R. Turrell, G. Slesser, R.D. Adams // Deep Sea Res. I. – 1999. – Vol. 46. – P. 1-25.

Van Aken, H.M. Hydrography and through-flow in the north-eastern North Atlantic Ocean: The NANSEN project / H.M. van Aken, G. Becker // Prog. Oceanogr. – 1996. – Vol. 38. – P. 297-346. – DOI 10.1016/S0079-6611(97)00005-0.

Sarafanov, A. On the effect of the North Atlantic Oscillation on temperature and salinity of the subpolar North Atlantic intermediate and deep waters / A. Sarafanov // ICES J. Marine Science. – 2009. – Vol. 66, № 7. – P. 1448-1454. – DOI 10.1093/icesjms/ fsp094.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ВЫПУСК ПРЕДУПРЕЖДЕНИЙ ОБ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЯХ НА АКВАТОРИЯХ МОРЕЙ В ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ФГБУ «МУРМАНСКОЕ УГМС»

*А.В. Боровков, Н.В. Алдарова
Мурманское УГМС, г. Мурманск*

Аннотация. Представлена информация о гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности, критериях и выпуске предупреждений об опасных явлениях на акваториях Баренцева, Гренландского и Норвежского морей. Даны сведения о количестве опасных явлений за 2019-2023 гг.

Ключевые слова: гидрометеорология, опасные природные явления.

Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (МУГМС) выполняет государственные функции и оказывает услуги физическим и юридическим лицам, органам государственной власти в области гидрометеорологии и смежных с ней областях, включающее в себя:

- определение метеорологических, климатических, аэрологических, гидрологических, океанологических, гелиогеофизических, агрометеорологических характеристик окружающей природной среды;
- определение уровня загрязнения окружающей среды, а именно: загрязнение атмосферного воздуха, почв, поверхностных вод и морской среды;
- подготовка и предоставление потребителям прогностической, аналитической и расчетной информации о состоянии окружающей среды и ее загрязнении, включая радиоактивное;
- формирование и ведение банков данных в области гидрометеорологии;
- прогнозирование опасных погодных явлений и выпуск предупреждений о неблагоприятных гидрометеорологических явлениях.

Морская зона обслуживания МУГМС охватывает Кольский и Кандалакшский заливы, Баренцево и Гренландское моря, а также побережье Норвегии.

МУГМС осуществляет специализированное гидрометеорологическое обслуживание по маршрутам переходов судов, морских работ, в том числе буксировок плавучих буровых установок, а также обслуживание администраций портов и коммерческих структур, связанных с

рыболовством, морскими грузопассажирскими перевозками и разработкой полезных ископаемых на континентальном шельфе.

Для планирования и обеспечения различных работ в море (погрузочно-разгрузочные операции в открытом море, выгрузка на острова, сроки выхода буровых судов на точки бурения, сроки навигации, рейсы судов по маршрутам и т.д.) МУГМС готовит анализы гидрометеорологической обстановки, обзоры и предоставляет консультации. Наиболее востребованная информация – специализированные прогнозы погоды и волнения на 1-5 сут, штормовые предупреждения, предупреждения о неблагоприятных явлениях и информация о ледовой обстановке. Основные потребители морской гидрометеорологической информации – предприятия и организации рыболовства, рыбоводства, морского транспорта и портовых служб.

Ежедневно в Мурманском Гидрометцентре составляется бюллетень прогноза погоды по всей Мурманской области и морской зоне ответственности. Наиболее эффективный инструмент для его подготовки – комплексный метод, представляющий синтез синоптического анализа с привлечением расчетных данных.

На начальном этапе работы анализируют гидросиноптические карты: сводные прибрежных, судовых и наземных наблюдений. Анализируют карты последовательно каждые три часа, срок за сроком, соблюдая принцип непрерывности. Оценивая последовательность развития процесса, мы получаем представление о характере изменений явления во времени и пространстве, что в конечном итоге позволяет рассчитать его характеристики в будущем.

Морская зона ответственности МУГМС имеет славу одного из самых штормовых районов Мирового океана. По его акватории пролегает граница контрастных масс воздуха, которые проникают сюда из Центральной Арктики, – очень холодных и сухих и Северо-Восточной Атлантики – влажных и теплых. По этой причине над морями Северо-Европейского бассейна все атмосферные образования крайне активны, а циклоническая деятельность исключительно интенсивная и связана со значительными градиентами давления и глубокими циклонами, порождающими сильнейшие ветры и волны высотой более 10 м.

Прогнозирование волнения – это процесс оценки того, как будут изменяться параметры волнения под действием ветра на водную поверхность. При подготовке прогноза используются все доступные расчетные модели ветрового волнения как отечественных, так и зарубежных центров, оперативные данные, поступающие с судов в открытом море, которые проводят попутные гидрометеорологические наблюдения. Следует отметить, что данные оперативных наблюдений

обладают недостаточной плотностью, так как гидрометеорологические станции расположены в прибрежной зоне, а суда, передающие информацию о текущих погодных условиях и находящиеся на промысле или переходах, стараются избегать зоны неблагоприятной погоды.

В северных и умеренных широтах в зимнее время при сильных ветрах и отрицательных значениях температуры воздуха происходит обледенение судов. Опасности обледенения в той или иной степени подвергаются суда почти всех типов, независимо от их размеров, водоизмещения и конструкции. Наибольшую опасность обледенение представляет для малых судов с низким бортом, которые в штормовую погоду подвергаются сильному забрызгиванию и заливанию забортной водой, а это в первую очередь касается рыболовных судов. Таким образом, опасность обледенения вызывает необходимость ограничения районов плавания, приводит к сокращению сроков навигации, затрудняет планирование различных промысловых работ в море. Исходными элементами для составления прогноза обледенения судов являются прогнозы направления и скорости ветра, температуры воздуха, осадков. Наряду с этим следует учитывать температуру поверхностного слоя воды и волнение моря.

Важнейшая задача Росгидромета и его территориальных подразделений – прогнозирование и фиксирование опасных явлений, предупреждение органов государственной власти, отраслей экономики и населения об этих явлениях в целях предотвращения гибели людей и снижения экономического ущерба. Решение этой задачи возложено на наблюдательную сеть и оперативно-прогностические подразделения, занимающиеся прогнозированием опасных явлений, подготовкой и выпуском штормовых предупреждений и оповещений.

К опасным природным явлениям относятся отдельные гидрометеорологические явления или их комплекс, воздействие которых может представлять угрозу жизни или здоровья граждан, а также наносить материальный ущерб. Гидрометеорологические явления оцениваются как опасные при достижении ими определенных критериев. Для каждого территориального управления Росгидромета разработан региональный перечень и критерии опасных явлений по обслуживаемой территории с учетом природно-климатических особенностей и хозяйственно-экономических условий. При разработке критериев учитывается, что климатическая повторяемость явлений должна составлять не более 10 %, и что эти явления представляют угрозу безопасности людей и могут нести значительный ущерб большинству отраслей экономики.

Ниже представлен перечень и критерии опасных морских гидрометеорологических явлений, утвержденный в МУГМС:

– ветер в порывах не менее 25 м/с на акваториях портов, средней скоростью не менее 30 м/с на акваториях обслуживаемых морей, в порывах не менее 35 м/с на побережье Мурмана;

– сильное волнение, высота волн не менее 8 м на акватории обслуживаемых морей и не менее 6 м на побережье Мурмана и по району работ судов и буровых установок;

– быстрое обледенение судов.

После детального анализа диагностической и прогностической информации о погоде и состоянии поверхности моря, оценки явления по критериям опасного явления и времени его наступления, составляется штормовое предупреждение об опасном явлении.

Телеграммы со штормовым предупреждением составляются открытым текстом в формате, исключающем неопределенность толкования. Штормовые предупреждения подготавливаются с максимально возможной заблаговременностью, независимо от того, предусматривалось ли опасное явление в ранее выпущенных прогнозах погоды. Штормовое предупреждение содержит порядковый номер, дату, время наступления, продолжительность явления, район возникновения, наименование, максимальную интенсивность. Содержание штормового предупреждения немедленно доводится до органов управления Государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, исполнительной власти и других потребителей.

В таблице представлено количество опасных явлений по морской зоне ответственности ФГБУ «Мурманское УГМС» за 2019-2023 гг.

Количество ежегодно зафиксированных опасных явлений в морской зоне обслуживания ФГБУ «Мурманского УГМС» за последние пять лет варьирует от 24 до 41 в год.

Следует отметить, что интерес людей к изменению климата не ослабевает уже несколько десятков лет, и он связан с наблюдающимися значительными аномалиями температуры воздуха и осадков, увеличением повторяемости атмосферных явлений, несвойственных текущему сезону года. Важно, чтобы все научные выводы основывались на достоверной гидрометеорологической информации, которую в России обеспечивает только наблюдательная сеть Росгидромета.

Проведение регулярных наблюдений за погодой на Кольском п-ове, в прибрежной части Баренцева моря и морях Северо-Европейского бассейна способствует выпуску более точных и качественных гидрометеорологических прогнозов и предупреждений, что ведет к увеличению экономической эффективности и безопасности морских и наземных операций в Российском секторе Арктики.

Опасные погодные явления в 2019-2023 гг.

Год	Погодное явление		
	Скорость ветра (30 м/с и более, включая порывы)	Высота волны 8 м и более	Быстрое обледенение судов
<i>Баренцево море</i>			
2019	1	3	4
2020	0	1	6
2021	1	4	1
2022	4	5	4
2023	1	3	7
<i>Гренландское море</i>			
2019	1	2	1
2020	0	2	6
2021	0	3	3
2022	1	2	4
2023	2	4	7
<i>Норвежское побережье</i>			
2019	4	12	-
2020	3	13	-
2021	5	7	-
2022	7	12	-
2023	6	11	-

ВИРИО- И БАКТЕРИОПЛАНКТОН НА РАЗРЕЗЕ «КОЛЬСКИЙ МЕРИДИАН» БАРЕНЦЕВА МОРЯ В РАЗНЫЕ ПО УРОВНЮ ИНСОЛЯЦИИ СЕЗОНЫ

М.П. Венгер

Мурманский морской биологический институт РАН (ММБИ РАН), г. Мурманск

Аннотация. Представлены результаты исследований вирио- и бактериопланктона, полученные сочетанием методов эпифлуоресцентной и электронной микроскопии. Показано, что в каждый из периодов наблюдений – в августе 2010 г. и ноябре 2013 г. – обилие вирусов превышало обилие бактерий в среднем от 5 до 20 и от 3 до 10 раз соответственно. Летом доля зараженных бактерий (в среднем 7 %) и их смертность от вирусного лизиса (8 %) были выше, чем осенью (3 и 4 % соответственно).

Ключевые слова: бактериопланктон, вириопланктон, бактериальная смертность, Баренцево море.

ВВЕДЕНИЕ

В XX в. в арктических морских экспедициях перечень изучаемых гидробионтов лишь эпизодически включал наиболее массовые компоненты планктона – бактерии и вирусы. Принятие концепции «микробной петли», в корне изменив ситуацию, сделало их неотъемлемой частью комплексных научно-исследовательских программ и экологического мониторинга морских акваторий.

Согласно данной концепции, бактериопланктон, плотно связанный с динамикой и продукцией фитопланктона (Ducklow, Carlson, 1992; Ducklow, Carlson, Smith, 1999), играет важнейшую роль в цикле преобразования органического вещества. В поддержании его пула активно участвуют водные вирусы, которые через лизис клеток своих основных хозяев – бактерий и микроводорослей – опосредованно регулируют структуру их сообществ (The ecological role..., 1983; Wommack, Colwell, 2000).

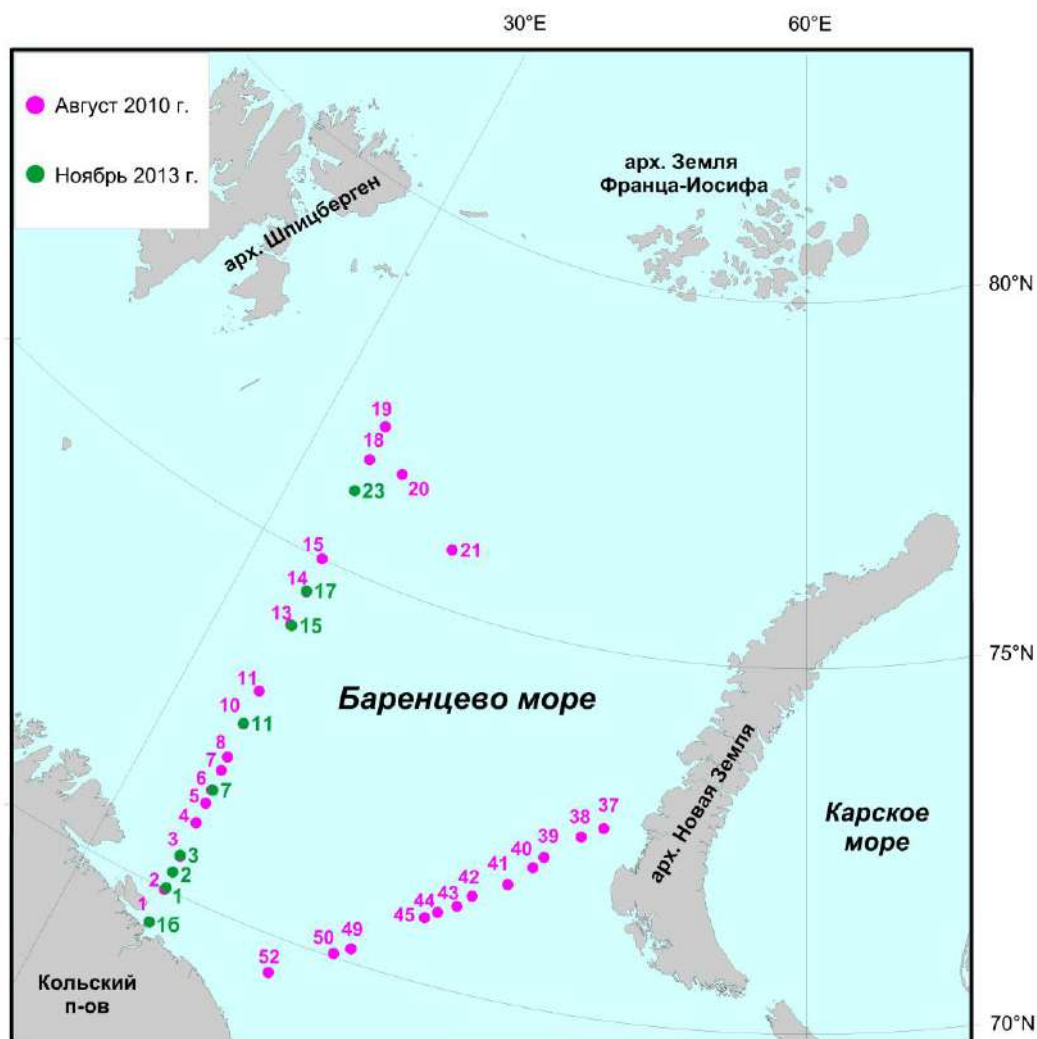
Возросший объем микробиологических данных за два последних десятилетия лишь частично восполнил пробел в знаниях экологии бактериальных и вирусных сообществ северных морей России, сравнительно малая их изученность в пелагиали Баренцева моря и определила актуальность наших исследований.

В цель работы входило: определить основные количественные показатели вирусов и их потенциальных хозяев – бактерий, выявить особенности их пространственного распределения и оценить влияние

вирусов на уровень развития бактериальных сообществ в контрастные по инсоляции сезоны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал собран в экспедициях НИС «Дальние Зеленцы» в августе 2010 г. и ноябре 2013 г. в водах разреза «Кольский меридиан» и на участках к юго-востоку от него. Протяженность исследуемой части разреза составила 835 км в первом случае и 727 км во втором (см. рисунок).



Карта-схема станций отбора проб воды

Для измерения глубин и термохалинных характеристик использовали STD-зонд SEACAT SBE 19Plus. Пробы воды для анализа отбирали пластиковыми батометрами Нискина в трех слоях: поверхностном, над пикноклином и придонном.

Подсчет вирусных частиц и бактериальных клеток осуществляли стандартным методом эпифлуоресцентной микроскопии. Численность бактериопланктона определяли с помощью флуорохрома DAPI (Porter, Feig, 1980) и фильтров ОИЯИ (г. Дубна) с диаметром пор 0,2 мкм, численность вирусов – с помощью флуорохрома SYBR Green I и фильтров Anodisc («Wathman») с диаметром пор 0,02 мкм (Noble, Fuhrman, 1998). Препараты просматривали под микроскопом Olympus BX 53 при увеличении 1000.

Детальное описание подготовки проб для электронной микроскопии приведено А.И. Копыловым, Д.Б. Косолаповым, Е.А. Заботкиной (2011). На микроскопе JEM 1100 (JEOL, Япония) при увеличении от 50000 до 150000 осуществляли подсчет бактериальных клеток с адсорбированными на них вирусами (N_{BV}), общее количество таких вирусов (N_{VD}), среднее число зрелых фагов в клетках (BS), количество инфицированных в бактериопланктоне клеток (FIC) и частоту видимых инфицированных бактерий (FVIC).

Дополнительно спектрофотометрически определяли концентрацию хлорофилла *a*, используя фильтры «Владипор» с диаметром пор 0,45 мкм (ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. ..., 2001).

Для статистической обработки материала применяли метод ранговой корреляции Спирмена (r_s) и U-критерий Манна-Уитни (при $p \geq 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Летний период. В Арктическом регионе окончание полярного дня приходится на август и, в зависимости от широты, продолжительность светлого времени суток может превышать в этот месяц 16-17 ч.

Работы в Баренцевом море выполнялись в период, когда стратификация водной толщи достигала максимума (Воды Баренцева моря..., 2016). Особенности T-S-структуры поверхностных вод, по данным STD-зонда, позволяли условно разделить акваторию моря на три участка: центральный (ст. 1-8, 10-14), северный (ст. 15, 18-21) и юго-восточный (ст. 37-50, 52). На станциях последних двух участков проводилось изучение вертикального распределения компонентов планктона (см. рисунок).

Результаты определений хлорофилла *a* – показателя продукционной активности фитопланктона – свидетельствовали о значительной пространственной изменчивости его концентраций, чей диапазон в поверхностных водах юго-восточного участка (0,44-12,38 мг/м³) превышал таковой центрального (0,57-2,21 мг/м³) и северного (0,52-0,77 мг/м³) участков. Повышенное содержание пигмента зафиксировано в слое над пикноклином на юго-восточных (2,02±0,46 мг/м³) и северных

($1,98 \pm 0,52$ мг/м³) станциях, пониженное – в придонном слое на тех же станциях ($0,24 \pm 0,01$ и $0,11 \pm 0,01$ мг/м³ соответственно).

Численность бактериальных клеток – основных хозяев большинства планктонных вирусов (Weinbauer, 2004) – в поверхностных водах моря изменялась от $0,4 \times 10^6$ до $4,5 \times 10^6$ в 1 мл (среднее $1,6 \pm 0,2 \times 10^6$ в 1 мл), в придонных водах – от $0,4 \times 10^6$ до $0,6 \times 10^6$ в 1 мл ($0,5 \pm 0,03 \times 10^6$ в 1 мл). В слое над пикноклином на юго-восточных и северных станциях она составляла $1,1 \times 10^6$ - $1,6 \times 10^6$ и $0,4 \times 10^6$ - $0,7 \times 10^6$ кл/мл соответственно. Бактериальное обилие в наших данных сопоставимо с летними значениями, полученными ранее в открытых районах Баренцева моря (Теплинская, 1990; Планктон морей Западной..., 1997; Байтаз, 1998).

Количество свободных вирусов в поверхностном слое моря варьировало от $1,7 \times 10^6$ до $64,1 \times 10^6$ частиц/мл и на трех выделенных участках достоверно различалось, составляя $7,1 \pm 0,6 \times 10^6$, $3,8 \pm 0,8 \times 10^6$ и $32,4 \pm 4,6 \times 10^6$ частиц/мл соответственно. В слое над пикноклином этот показатель на юго-востоке ($30,4 \times 10^6$ - $61,7 \times 10^6$ частиц/мл) был больше, чем на севере моря ($1,9 \times 10^6$ - $8,1 \times 10^6$ частиц/мл), а в придонном слое с глубинами 160-310 м составил $6,6 \times 10^6$ - $10,7 \times 10^6$ и $2,0 \times 10^6$ - $3,3 \times 10^6$ частиц/мл соответственно. Повышенные скопления вирусов наблюдались в поверхностном слое ($36,7 \times 10^6$ - $64,1 \times 10^6$ частиц/мл) и у дна ($19,0 \times 10^6$ - $45,5 \times 10^6$ частиц/мл) на мелководных (50-70 м) юго-восточных станциях.

Численность вирусов в центральной части Баренцева моря соответствовала таковой, полученной здесь в июне и июле 1999 г. (Distribution of bacterial..., 2002). Максимальные количества вирусных частиц на юго-востоке моря в два раза превышали летние значения в холодных водах побережья Аляски (Steward, Smith, Azam, 1996).

Вирусы в наших исследованиях превосходили обилием бактерии в среднем в 7 раз на центральном и северном участках и в 24 раза на юго-восточном участке. Значимая корреляция между количеством вирусов и бактерий ($r_s = 0,56$) в поверхностных водах центрального участка, вероятнее всего, определялась преобладанием в вириопланктоне бактериофагов (Spatial distribution of..., 1993). В то же время более тесная связь ($r_s = 0,69$) вирусов с хлорофиллом *a*, учитывая его повышенные концентрации, указывала на доминирование в вирусном сообществе поверхностных вод юго-восточной части моря альго-вирусов (Spatial distribution of..., 1993; Wommack, Colwell, 2000).

По данным электронной микроскопии, количество прикрепленных к бактериям вирусов (N_{VD}) составило 0,03-1,00 % от численности всего вириопланктона. На поверхности одной бактериальной клетки находилось

от 1 до 14 вирусных частиц. Доля таких клеток (N_{BV}) в общем бактериопланктоне изменялась от 5 до 29 (среднее 13) %.

Согласно расчетам, вирусы инфицировали от 4 до 15 (среднее 7) % клеток (FIC) в составе бактериопланктона. Внутри одной бактериальной клетки содержалось до 123 зрелых фаговых частиц, их среднее значение (BS) в пробах изменялось в диапазоне 5-52 фагов/клетке.

Вирус-индуцированная смертность бактерий (VMB) составляла 4-20 (среднее 8) % от их суточной продукции. Зараженность вирусами и вирус-опосредованная гибель бактерий в наших исследованиях были выше, чем в подповерхностных водах центрального района Арктики на 0-1 % (в среднем 0,5 %) и от менее 1 до 11 % (в среднем 4 %) соответственно (Microbial biomass and..., 2007). Вклад вирусного лизиса в общую смертность бактериопланктона открытых вод Чукотского (2-16 %, в среднем 9 %) (Steward, Smith, Azam, 1996) и Баренцева морей оказался соизмеримым.

Поскольку инфицированные бактерии хорошо распознаваемы только перед лизисом клетки, можно полагать, что полученные значения несколько занижены, и в период исследования вирусы могли вызывать более высокую бактериальную смертность. Наше предположение особенно справедливо для вод центрального участка, где среднее число вирусных частиц (17), освобождающихся из клетки при ее лизисе, превышало аналогичное значение в водах северного участка (11) и соответствовало величине (18), зарегистрированной в морских водах с низким температурным режимом (Middelboe, Nielsen, Vjørnsen, 2002).

Осенне-зимний период. В ноябре работы выполнялись на трех различающихся по термохалинным характеристикам участках разреза: южном (ст. 1б, 1, 2, 3), центральном (ст. 7, 11) и северном (ст. 15, 17, 23). Исследования, приуроченные к периоду сниженной функциональной активности микробиоты, проводились в условиях наступления полярной ночи. Продолжительность светового времени в ходе наблюдений убывала от 4,5 ч на 70° с.ш. до 0,0 ч на 74° с.ш. (см. рисунок).

Переход к зимнему гидрологическому режиму сопровождался разрушением сезонного термоклина, в результате чего в верхнем 50-метровом слое наблюдалась гомотермия, далее температура плавно понижалась с глубиной.

Содержание хлорофилла (0,03-0,50 мг/м³), определяемое функционированием в ноябре преимущественно нанопланктонных водорослей (Макаревич, Дружкова, 2010), было ниже, чем в пелагиали центральной части Баренцева моря в сентябре-октябре (0,09-1,24 мг/м³) (Ведерников, 1975).

Численность бактериопланктона ($0,6 \pm 0,02 \times 10^6$ кл/мл) в ходе наблюдений незначительно превышала среднемноголетнюю величину для Баренцева моря (Планктон морей Западной..., 1997). Значения показателя в водах южного, центрального и северного участков не различались, составляя $0,6 \pm 0,04 \times 10^6$, $0,5 \pm 0,03 \times 10^6$ и $0,5 \pm 0,02 \times 10^6$ кл/мл соответственно. В верхнем 50-метровом слое количество бактериальных клеток достоверно отличалось от такового в слое 100 м – дно.

Концентрации вирусов ($2,8 \pm 0,4 \times 10^6$ частиц/мл), значительно варьируя по вертикали водной толщи, достоверных различий в рассматриваемых слоях не имели. Плотность их скоплений возрастала от более теплых вод на юге ($2,3 \pm 0,9 \times 10^6$ частиц/мл) и в центре ($1,0 \pm 0,2 \times 10^6$ частиц/мл) к более холодным водам на севере ($5,1 \pm 0,4 \times 10^6$ частиц/мл). Особенно четко наблюдаемая тенденция проявлялась в слое 0-50 м ($r_s = -0,72$).

Обилие вирусов, по нашим данным ($0,2 \times 10^6$ - $10,6 \times 10^6$ частиц/мл), значительно превышало таковое в феврале в заливе Франклина ($1,4 \times 10^6$ - $4,5 \times 10^6$ частиц/мл) (Wells, Deming, 2006) и у побережья Гренландии ($1,5 \times 10^6$ - $1,8 \times 10^6$ частиц/мл) (Middelboe, Glud, Sejr, 2012).

Вирусы количественно превосходили своих хозяев (бактерий) в среднем в 5 раз, значение параметра увеличивалось с ростом обилия частиц. Установлена положительная связь ($r_s = 0,52$) между численностью вирусов и бактерий в водах центрального участка.

Количество вирусов, прикрепленных к бактериальным клеткам, варьировало от 15 до 138 частиц/кл. Доля прикрепленных частиц в составе вириопланктона (N_{VB}) возрастала от южного к центральному (в среднем от 11 до 26 %) участку и снижалась к северному (до 3 %).

Распределение бактерий с прикрепленными вирусными частицами выраженных особенностей не имело. Средняя численность клеток с внеклеточными вирусами была сопоставимой по участкам и приближалась к 100×10^3 при диапазоне 40×10^3 - 150×10^3 кл/мл. В общем бактериопланктоне доля таких клеток (N_{BV}) находилась в пределах 6-26 (среднее 16) %.

По частоте отчетливо видимых зараженных вирусами бактерий (FVIC) нами рассчитан процент всех инфицированных в бактериопланктоне клеток (FIC). Их доля, изменяясь от 1 до 7 (среднее 3) %, повышалась от южного к северному участку. Зрелых фагов внутри инфицированных клеток (BS), исключая максимум в поверхности центрального участка, насчитывали от 5 до 30 шт. на пробу. Средняя величина BS в водах разреза (11) приближалась к таковой на северо-западе Карского моря осенью (13) (Вириопланктон Карского моря..., 2015).

Гибель бактерий от вирусного лизиса (VMB) в Баренцевом море в ноябре в среднем не превышала 4 %. С августа по сентябрь в Чукотском море и в сентябре в Карском при диапазоне величин VMB 0-22 и 1-12 % соответственно гибель бактерий от вирусного лизиса в среднем составляла 8 % в первом случае (Steward, Smith, Azam, 1996) и 4 % во втором (Вириопланктон Карского моря..., 2015).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный материал свидетельствует, что в планктоне Баренцева моря в разные по уровню инсоляции сезоны вирусы выступали доминирующим по численности компонентом. Его обилие, определяемое наличием клеток-хозяев, ожидаемо было выше при активной вегетации фитопланктона (в августе), чем при резком ее снижении (в ноябре). Численность вирусов превосходила таковую их основных хозяев (бактерий) в среднем в 15 раз в первом случае против 5 раз во втором.

Летом уменьшение концентрации частиц прослеживалось с переходом от более теплых вод на юге к более холодным на севере. Поздней осенью отмечен иной характер распределения: их максимальные скопления регистрировали не только в относительно прогретых водах южного, но и в менее теплых водах северного участков моря.

В его глубоководной части летний диапазон вирусного обилия поверхностных вод превышал таковой придонных, величина параметра на поверхности и у дна мелководной южной части моря оставалась сопоставимой.

В конце осеннего сезона в водах центральной части моря (глубины 150-300 м) вирусные частицы от поверхности до дна распределялись относительно равномерно. Их основную массу представляли бактериофаги, в то время как в состав летнего вириопланктона входили и альго-вирусы. Косвенным подтверждением тому может служить достоверная тесная связь, выявленная между вирусами и бактериями в ноябре и вирусами и концентрацией хлорофилла *a* в августе.

В гораздо меньших количествах регистрировали вирусные частицы, прикрепленные к поверхности бактериальных клеток, число которых в общем бактериопланктоне в среднем достигало 13 % в августе и 16 % в ноябре. Следовательно, атаке со стороны вирусов-бактериофагов подвергалась довольно значительная часть бактериального сообщества. Дальнейшие расчеты показали, что уровень вирусной инфекции и гибель бактерий от вирусного лизиса в водах центральной части Баренцева моря в целом были относительно низкими. При этом частота инфицированных клеток от их общего числа в бактериопланктоне в августе (7 %) превышала

таковую в ноябре (3 %). Вирус-индуцированная смертность бактерий в эти месяцы достигала 8 и 4 % соответственно.

Благодарность

Автор глубоко признателен Т.И. Широколовой за консультации и помощь в работе, В.В. Водопьяновой – за предоставленный материал по хлорофиллу, Д.В. Моисееву – за предоставленные данные по гидрологии, Е.А. Заботкиной – за помощь в получении данных электронной микроскопии.

Работа выполнена в рамках государственного задания ММБИ РАН, тема «Структурно-динамические трансформации пелагических экосистем морских арктических бассейнов в условиях техногенных и естественных изменений среды» (№ гос. регистрации 124013000709-9).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Байтаз, О.Н. Пространственно-временная изменчивость бактериопланктона Баренцева моря: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / О.Н. Байтаз. – Москва, 1998. – 25 с.

Ведерников, В.И. Зависимость ассимиляционного числа и концентрации хлорофилла «а» от продуктивности вод в различных температурных областях Мирового океана // Океанология. – 1975. – Т. 15, вып. 4. – С. 703-707.

Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В.К. Ожигин, В.А. Ившин, А.Г. Трофимов [и др.]; ПИНРО. – Мурманск: ПИНРО, 2016. – 259 с.

ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. – Москва: Изд-во стандартов, 2001. – 10 с.

Копылов, А.И. Влияние вирусов на гетеротрофный бактериопланктон водохранилищ / А.И. Копылов, Д.Б. Косолапов, Е.А. Заботкина // Микробиология. – 2011. – Т. 80, № 2. – С. 241-250.

Вириопланктон Карского моря: влияние вирусов на смертность гетеротрофных бактерий / А.И. Копылов, А.Ф. Сажин, Е.А. Заботкина, Н.Д. Романова // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 620-631.

Макаревич, П.Р. Сезонные циклические процессы в прибрежных планктонных альгоценозах северных морей / П.Р. Макаревич, Е.И. Дружкова; отв. ред. Г.Г. Матишов; Мурман. мор. биол. ин-т КНЦ РАН. – Ростов н/Д: Изд-во Южн. науч. центра РАН, 2010. – 280 с.

Планктон морей Западной Арктики / Л.Л. Кузнецов, И.Е. Мишустина, О.Н. Байтаз [и др.]; отв. ред. Г.Г. Матишов. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. – 352 с.

Теплинская, Н.Г. Процессы бактериальной продукции и деструкции органического вещества в северных морях / Н.Г. Теплинская. – Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР, 1990. – 106 с.

Distribution of bacterial biomass and activity in the marginal ice zone of the central Barents Sea during summer / M.H. Howard-Jones, V.D. Ballard, A.E. Allen [et al.] // *Journal of Marine Systems*. – 2002. – Vol. 38. – P. 77-91.

Ducklow, H.W. Oceanic bacterial production / H.W. Ducklow, C.A. Carlson // *Advances in Microbial Ecology*. – 1992. – Vol. 12. – P. 113-181.

Ducklow, H.W. Bacterial growth in experimental plankton assemblages and seawater cultures from the *Phaeocystis antarctica* bloom in the Ross Sea, Antarctica / H.W. Ducklow, C.A. Carlson, W.O. Smith // *Aquat. Microb. Ecol.* – 1999. – Vol. 19. – P. 215-227.

Microbial biomass and viral infections of heterotrophic prokaryotes in the sub-surface layer of the central Arctic Ocean / G.F. Steward, L.B. Fandino, J.T. Hollibaugh [et al.] // *Deep-Sea Research I*. – 2007. – Vol. 54. – P. 1744-1757.

Middelboe, M. Viral and bacterial production in the North Water: in situ measurements, batch-culture experiments and characterization and distribution of a virus-host system / M. Middelboe, T. Nielsen, P. Bjørnsen // *Deep-Sea Res.* – 2002. – Vol. II, Iss. 49. – P. 5063-5079.

Middelboe, M. Bacterial carbon cycling in an sub-arctic fjord: A seasonal study on microbial activity, growth efficiency and virus induced mortality in Kobbefjord, Greenland // M. Middelboe, R.N. Glud, M.K. Sejr // *Limnol. and Oceanogr.* – 2012. – Vol. 57, № 6. – P. 1732-1742.

Noble, R. T. Breakdown and microbial uptake of marine viruses and other lysis products / R.T. Noble, J.A. Fuhrman // *Aquat. Microb. Ecol.* – 1999. – Vol. 20. – P. 1-11.

Porter, K.G. The use DAPI for identifying and counting of aquatic microflora / K.G. Porter, Y.S. Feig // *Limnol. Oceanogr.* – 1980. – Vol. 25, № 5. – P. 943-948.

Spatial distribution of viruses, bacteria and chlorophyll a in neritic, oceanic and estuarine environments / W.P. Cochlan, J. Wikner, G.F. Steward [et al.] // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* – 1993. – Vol. 92. – P. 77-87.

Steward, G.F. Abundance and production of bacteria and viruses in the Bering and Chukchi seas / G.F. Steward, D.C. Smith, F. Azam // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* – 1996. – Vol. 131. – P. 287-300.

The ecological role of water-column microbes in the sea / F. Azam, T. Fenchel, J.G. Field [et al.] // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* – 1983. – Vol. 10. – P. 257-263.

Weinbauer, M.G. Ecology of prokaryotic viruses // *FEMS Microbiol. Rev.* – 2004. – Vol. 28. – P. 127-181.

Wells, L.E. Significance of bacteriovory and viral lysis in bottom waters of Franklin Bay, Canadian Arctic, during winter / L.E. Wells, J.W. Deming // *Aquat. Microb. Ecol.* – 2006. – Vol. 43. – P. 209-221.

Wommack, K.E. Viruses in aquatic ecosystems / K.E. Wommack, R.R. Colwell // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* – 2000. – Vol. 64. – P. 69-114.

АТЛАНТИЧЕСКИЕ ВОРОТА В АРКТИКУ В ЗЕРКАЛЕ «КОЛЬСКОГО МЕРИДИАНА»

С.М. Гордеева¹, Е.В. Новоселова², Т.В. Белоненко³, М.В. Будянский⁴

¹Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), г. Санкт-Петербург

²Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова (ЦМИ МГУ), г. Москва

³Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), г. Санкт-Петербург

⁴Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН), г. Владивосток

Аннотация. Проведено сравнение натуральных измерений температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» за 1993-2019 гг. с климатическими индексами для Северной Атлантики, разработанными авторами ранее. Рассмотрено пять климатических индексов: PC1, PC2, NAT, NAT1 и NAT2. Показано, что временные ряды температуры воды на разрезе хорошо согласованы с климатическими индексами PC2, а также NAT1 и NAT2, отвечающими за процессы потепления в холодном Северо-Европейском бассейне и охлаждения в теплом регионе, расположенном к югу от Исландии. В то же время наблюдается низкая корреляция между температурой воды на разрезе и индексами PC1 и NAT, отвечающими за объемный расход вод, поступающих из Атлантики в Северо-Европейский бассейн. Установлена высокая согласованность натуральных измерений на разрезе «Кольский меридиан» с соответствующими данными глобального океанического реанализа GLORYS12V1. Показано, что температура воды на «Кольском меридиане» определяется не расходом атлантических вод, поступающих в Баренцево море, а их теплосодержанием.

Ключевые слова: «Кольский меридиан», Баренцево море, Северо-Европейский бассейн, климатические индексы, GLORYS12V1.

ВВЕДЕНИЕ

«Кольский меридиан» – вековой стандартный разрез, расположенный в Баренцевом море вдоль меридиана 33°30' в.д. от побережья Кольского залива до 77° с.ш. (рис. 1), в настоящее время являющийся одним из продолжительных в мире рядов океанографических данных: с учетом небольших перерывов общий период наблюдений составляет 104 года (120 лет океанографических..., 2022). «Кольский меридиан» состоит из 16 станций, но наиболее регулярные наблюдения проводят на десяти южных станциях (до 74° с.ш.), которые располагаются в области распространения основной массы атлантических вод (Система Баренцева моря, 2021).

Самый исследованный участок (ст. 1-10) делят на три отрезка: разрез через ст. 1-3 пересекает ветвь Мурманского прибрежного течения, ст. 3-7 –

основную ветвь Мурманского течения, ст. 8-10 – центральную ветвь Нордкапского течения.

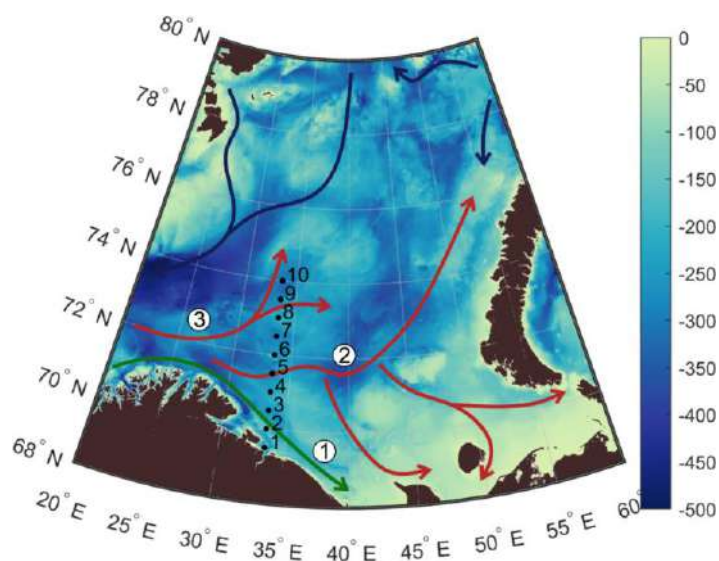


Рис. 1. Район исследования. Глубина (м) представлена цветовой шкалой. Цифрами обозначены станции разреза «Кольский меридиан». Стрелками изображены основные направления распространения прибрежных (зеленый), атлантических (красный) и арктических (синий) вод. Цифрами в кружках отмечены основные течения, которые охватывают разрез: 1 – Мурманское прибрежное; 2 – Мурманское; 3 – Нордкапское

История проведения измерений на разрезе «Кольский меридиан» подробно описана в книге «120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан»» (2022). Впервые океанографические работы на этом разрезе были проведены в мае 1900 г. в экспедиции на судне «Андрей Первозванный» под руководством Н.М. Книповича (Книпович, 1902). На основе собранных данных о температуре и солености воды уже осенью 1901 г. Н.М. Книпович составил схему течений и выделил на разрезе «Кольский меридиан» несколько ветвей, указав, что мощное теплое течение «приносит в Баренцево море громадное количество теплоты, и в конце года мы наблюдаем на глубинах мощные заносы этой теплоты, в сильнейшей степени смягчающей климат». Измерения температуры и солености воды позволили Н.М. Книповичу сделать вывод о связи распределения и миграций промысловых рыб в Баренцевом море с теплыми течениями (Книпович, 1902).

В 1907 г. океанографические и биологические исследования на «Кольском меридиане» прекратились. Только в начале 1921 г. Ученый совет Мурманской биологической станции предложил продолжить наблюдения на разрезе, понимая их важность для решения задач не только океанографии и биологии Баренцева моря, но и общей климатологии всего Севера (Дерюгин, 1924). Регулярные океанографические наблюдения,

проводившиеся с 1928 по 1941 г. на судах ПИНРО «Николай Книпович», «Персей» и «Исследователь», позволили получить основные представления о сезонном ходе и межгодовых изменениях наиболее важных параметров на разрезе «Кольский меридиан» (История океанографических исследований..., 2005). В 1960 г. приказом Главгидрометслужбы «Кольский меридиан» был включен в число разрезов, закрепленных для наблюдений над вековым ходом элементов океанографического режима, и получил статус «векового», проводить наблюдения на нем было рекомендовано ежемесячно (Карсаков, 2009). С начала 1990-х годов в связи с распадом СССР и последовавшей за этим экономической депрессией произошло значительное сокращение объема и состава наблюдений. В наши дни «Кольский меридиан» – единственный российский разрез в Баренцевом море, по которому реализуются регулярные океанографические наблюдения для мониторинга и изучения сезонных и межгодовых изменений термохалинного состояния вод Баренцева моря.

В настоящее время установлено, что основной приток явного и скрытого тепла в высокоширотную Арктику в зимний период поступает через атлантическую часть ее южной границы по 70° с.ш. (от 0 до 80° в.д.) в слое от поверхности до 750 гПа (Влияние атмосферных переносов..., 2016). Северная Атлантика является одним из наиболее изученных и хорошо задокументированных регионов Мирового океана (Impact of hydrographic..., 2010). Район Северной Атлантики, через который реализуется перенос тепла в Арктический регион, многие ученые называют «атлантическими воротами в Арктику» (Synchococcus in the..., 2016; Влияние атмосферных переносов..., 2016). По мере того, как климатические прогнозы становятся реальностью, возникает необходимость выявления характеристик системы, которые могут наилучшим образом описывать ее изменчивость и рассматриваться как параметры для разработки прогноза состояния этой системы.

В работе мы попытаемся получить ответы на следующие вопросы:

1. Какова корреляционная связь между измерениями на разрезе «Кольский меридиан» и данными из глобального океанического реанализа по аналогичному (расположенному близко) разрезу?

2. Существует ли связь между температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» и пятью климатическими индексами, представленными в работе С. Гордеевой, Т. Белоненко, Л. Морозовой (Gordeeva, Belonenko, Morozova, 2022)?

3. Какая часть тепла, перемещаемая через $64^{\circ}30'$ с.ш., отражается в переносе через разрез «Кольский меридиан»?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье С. Гордеевой, Т. Белоненко, Л. Морозовой (Gordeeva, Belonenko, Morozova, 2022) для выявления климатических индикаторов, характеризующих перенос атлантического тепла в Арктику, используется метод разложения на главные компоненты (Principal Components, PC) аномалий температуры воды на горизонте 457 м в Северной Атлантике с 1993 по 2019 г. в пределах региона 50-80° с.ш., 50° з.д. - 20° в.д. на сетке 1×1 градус.

Были рассчитаны (Gordeeva, Belonenko, Morozova, 2022) два индекса климатической изменчивости: PC1 (первая главная компонента) и PC2 (вторая главная компонента), так как две первые главные компоненты разложения отвечают за 48 % изменчивости, а все последующие – на порядок меньше, поэтому авторы предложили использование двух первых компонент в качестве индикаторов климатической системы. PC1 – индикатор, который характеризует адвекцию в Северо-Европейский бассейн. Увеличение значений PC1 сопровождается уменьшением объемного расхода потока северного направления через Фареро-Шетландский и Фареро-Исландский проливы и значительным потеплением в области южнее Исландии. PC2 – индикатор, который характеризует соответствующие потоки тепла на север. Увеличение PC2 отражает процессы потепления в холодном Северо-Европейском бассейне и охлаждения в теплом регионе, расположенном к югу от Исландии. Уменьшение температурных градиентов между этими регионами сопровождается увеличением PC2 (Gordeeva, Belonenko, Morozova, 2022).

Главные компоненты используются прежде всего для выявления районов проявления основных мод изменчивости. Для их построения требуются довольно объемные и специфические расчеты, вместо которых можно использовать саму характеристику, т.е. в данном случае аномалии температуры в районах, где нагрузки наибольшие. Такой прием применяется, например, при разложении полей атмосферного давления на главные компоненты, когда вместо PC1 рассматривают индекс NAO (North Atlantic Oscillation) как разницу давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом (Hurrell's NAO Index). По аналогии с этим подходом С. Гордеева, Т. Белоненко, Л. Морозова (Gordeeva, Belonenko, Morozova, 2022) разработали три дополнительных индекса климатической изменчивости, которые могут быть рассчитаны непосредственно по аномалиям температуры воды:

– NAT – аномалии температуры воды в районе 59-61° с.ш., 28-30° з.д. (нагрузка PC1= +0,95), индекс может использоваться вместо PC1.

– NAT1 – аномалии температуры воды в координатах 68-69° с.ш., 1-2° в.д. (нагрузка +0,89), индекс может использоваться вместо PC2.

– NAT2 – аномалии температуры воды в координатах 56-57° с.ш., 30-31° з.д. (нагрузка –0,85), индекс также может использоваться вместо PC2.

Таким образом, для изучения изменчивости климатической системы, называемой «атлантические ворота в Арктику», ранее были разработаны пять температурных индексов, которые будут использованы в данной работе. Значения температурных индексов доступны по адресу: <https://esdb.wdcb.ru/doi/2022/2022es000792-data.html>.

С другой стороны, «Кольский меридиан» также относится к оцениванию переноса тепла из Атлантического океана, но уже непосредственно в Баренцевом море. Таким образом, температурные ряды разреза и пять вышеперечисленных климатических индексов выполняют одну и ту же функцию, однако материалы на «Кольском меридиане» получены эмпирически путем регулярных ежемесячных измерений, в то время как индексы, представленные в статье (Gordeeva, Belonenko, Morozova, 2022), разработаны на основе данных глобального океанического реанализа.

Данные, полученные на разрезе «Кольский меридиан», доступны на сайте Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича): <http://www.pinro.vniro.ru/ru/razrez-kolskij-meridian/ryady-nablyudenij>. В нашем исследовании наряду с натурными измерениями мы будем использовать материалы глобального вихреразрешающего реанализа GLORYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis). Эти данные находятся на портале CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service), https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description, они имеют пространственное разрешение 1/12° и доступны за период с 1993 г. по настоящее время. Реанализ GLORYS12V1 основан на глобальной системе прогнозирования в реальном времени CMEMS. Модель NEMO с форсингом ECMWF ERA-Interim применяется для реанализа циркуляции океана. Для сравнения с температурой воды на разрезе «Кольский меридиан», которая представлена в виде усредненных значений для слоев 0-50, 0-200, 50-200 м групп станций, по данным GLORYS12V1, было проведено аналогичное усреднение по пространству. Дополнительно для всех характеристик получены аномалии путем удаления сезонного хода методом сглаживания скользящим средним с окном 12 мес.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе мы установили, что натурные измерения на разрезе «Кольский меридиан» (KS) и данные реанализа GLORYS12V1 (KS-GLORIS) очень хорошо согласованы. Информация о том, что материалы разреза были ассимилированы в продукт GLORYS12V1, в открытых

источниках отсутствует. Высокие значения корреляции температуры на «Кольском меридиане» и по данным GLORYS12V1 находятся в диапазоне 0,94-0,99, что показывает очень хорошую связь между рядами (табл. 1), однако коэффициенты корреляции между натурными измерениями солёности на разрезе с соответствующими рядами GLORYS12V1 значительно ниже и изменяются в диапазоне 0,70-0,80. Возможно, меньшие значения этих коэффициентов обусловлены некоторым количеством пропусков измерений солёности в натурных данных. Но возможна и другая причина – данные разреза «Кольский меридиан» не учитывались алгоритмом ассимиляции или же сам алгоритм не является идеальным. В любом случае коэффициенты корреляции, представленные в табл. 1, в целом свидетельствуют о хорошей согласованности натурных данных и модельных рядов.

Таблица 1

Корреляция между температурой и солёностью воды на разрезе «Кольский меридиан» по натурным данным и данным GLORYS12V1

Показатель	№ 1-3, 0-50 м	№ 1-3, 0-200 м	№ 1-3, 50-200 м	№ 3-7, 0-50 м	№ 3-7, 0-200 м	№ 3-7, 50-200 м	№ 8-10, 0-50 м	№ 8-10, 0-200 м	№ 8-10, 50-200 м
T	0,99	0,96	0,94	0,99	0,98	0,96	0,98	0,97	0,96
S	–	0,80	–	0,80	0,74	0,70	–	0,77	–

Далее мы искали связь между аномалиями температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и индексами PC1, PC2, NAT, NAT1, NAT2 (табл. 2, 3). Корреляция PC1 (NAT) с измерениями на разрезе невелика, максимальные коэффициенты корреляции с данными у поверхности в районе ветви Мурманского прибрежного течения составляют 0,37, так как главная компонента PC1 (NAT) отвечает за адвекцию вод, поступающих из Атлантики в Северо-Европейский бассейн, низкая корреляция между PC1 (NAT) и температурой на разрезе «Кольский меридиан» свидетельствует о том, что тепловое состояние атлантических вод, поступающих в Баренцево море, не определяется транспортом (адвекцией) атлантической воды, а зависит от других факторов. Плохая связь между PC1 (NAT) и температурой воды на разрезе также видна на рис. 2а.

Наоборот, имеет место высокая корреляция PC2 (NAT1 и NAT2) с температурой воды на всем разрезе «Кольский меридиан», которая в слое 0-200 м в основной ветви Мурманского течения достигает 0,80 для натурных данных и 0,81 для GLORYS12V1 (см. табл. 2, 3, рис. 2б). Это означает, что температура Северо-Европейского бассейна определяется транспортом тепла, поступающего с атлантическими водами. Как видно на рис. 2б, графики временной изменчивости PC2 и температуры воды KS № 3-7 (0-200 м) до 2008 г. хорошо согласованы, что, очевидно, обусловлено общим

потеплением температуры воды всего Северо-Европейского бассейна. На графике (см. рис. 2б) можно выделить длинноволновые колебания 5-6 лет, однако из рис. 2б также видно, что снижение корреляции связано прежде всего с асинхронностью колебаний PC2 и KS в 2009-2016 гг., определяемых ослаблением положительного тренда. PC1 имеет отрицательную корреляцию с транспортом воды на южной границе Северо-Европейского бассейна (Gordeeva, Belonenko, Morozova, 2022), поэтому уменьшение PC1 в данный период (см. рис. 2а) отражает увеличение этого потока в Северо-Европейский бассейн, вполне вероятно, что нарушение связей температуры воды на KS с PC2 связано именно с этим процессом. Коэффициенты взаимной кросс-корреляции PC2 и температуры воды KS № 8-10 (0-200 м) достигают 0,83 на сдвиге 9-10 мес.

Таблица 2

Взаимно-корреляционная матрица между температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» (сезонный ход исключен) по натурным данным и климатическими индексами

Показатель	PC1	PC2	NAT	NAT1	NAT2
№ 1-3, 0-50 м	0,34	0,75	0,37	0,70	-0,66
№ 1-3, 0-200 м	0,30	0,77	0,35	0,71	-0,69
№ 1-3, 50-200 м	0,27	0,75	0,33	0,70	-0,69
№ 3-7, 0-50 м	0,32	0,76	0,34	0,69	-0,69
№ 3-7, 0-200 м	0,24	0,80	0,27	0,72	-0,73
№ 3-7, 50-200 м	0,22	0,80	0,26	0,71	-0,72
№ 8-10, 0-50 м	0,22	0,76	0,21	0,63	-0,65
№ 8-10, 0-200 м	0,24	0,80	0,23	0,69	-0,68
№ 8-10, 50-200 м	0,22	0,80	0,21	0,69	-0,68

Таблица 3

Взаимно-корреляционная матрица между температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» (сезонный ход исключен) по данным GLORYS12V1 и климатическими индексами

Показатель	PC1	PC2	NAT	NAT1	NAT2
№ 1-3, 0-50 м	0,29	0,76	0,30	0,68	-0,66
№ 1-3, 0-200 м	0,22	0,77	0,25	0,67	-0,68
№ 1-3, 50-200 м	0,19	0,76	0,23	0,66	-0,67
№ 3-7, 0-50 м	0,24	0,78	0,26	0,70	-0,69
№ 3-7, 0-200 м	0,18	0,81	0,22	0,71	-0,70
№ 3-7, 50-200 м	0,16	0,80	0,20	0,71	-0,70
№ 8-10, 0-50 м	0,14	0,76	0,13	0,63	-0,63
№ 8-10, 0-200 м	0,18	0,80	0,17	0,67	-0,67
№ 8-10, 50-200 м	0,19	0,81	0,18	0,68	-0,68

Очевидно, что процессы, влияющие на температурный режим на разрезе «Кольский меридиан», определяются рядом факторов, которые неравнозначны во времени, и простые линейные связи, оцениваемые по всей длине временных рядов, не могут описать многие аспекты

изменчивости этих процессов. Для этого требуются исследования, учитывающие, в том числе, региональные особенности. Проведенный анализ дает основания полагать, что на температурный режим в бассейне Баренцева моря влияет не непосредственно транспорт (адвекция) вод из Атлантического бассейна, а именно тепло, переносимое этими водами. Это подтверждается высокими коэффициентами корреляции между изменчивостью второй главной компоненты PC2 (NAT1 и NAT2) и температурой воды на разрезе «Кольский меридиан».

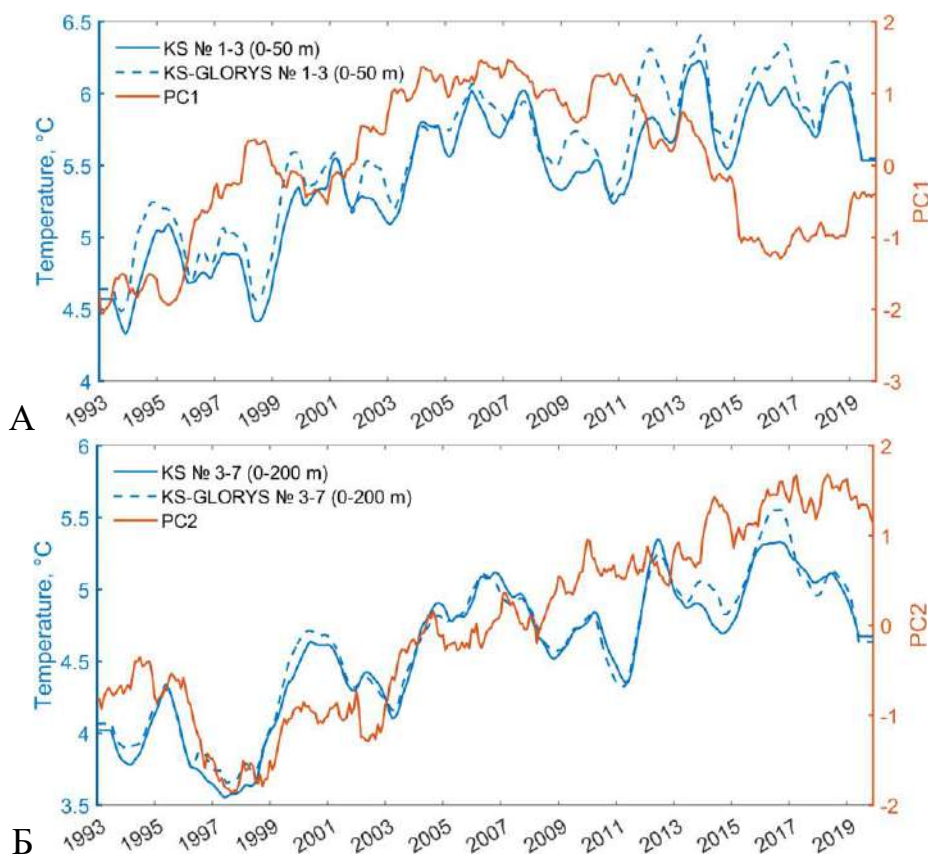


Рис. 2. Временная изменчивость температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» (с исключенным сезонным ходом) и климатических индексов PC1 (А) и PC2 (Б)

Для изучения структуры вод Северо-Европейского бассейна мы применили лагранжево моделирование. Основные аспекты применяемого метода изложены в работах (Lagrangian analysis of..., 2013; Lagrangian study of..., 2011; Observation and Lagrangian..., 2020). На рис. 3 представлена карта трекинга пассивных маркеров. Цвет частиц на карте характеризует их происхождение. Видно, что большое количество частиц на рисунке окрашено в красный или желтый цвета, что соответствует водам, пришедшим в регион с юга и запада, т.е. водам Северо-Атлантического течения. В северной части региона наблюдаются затоки окрашенных в

синий цвет вод, которые имеют арктическое происхождение. Все это соответствует основным представлениям о системе течений в регионе. Восточная граница региона соответствует долготе разреза «Кольский меридиан». Через этот разрез в западном направлении также есть перемещение частиц (воды зеленого цвета), которые, очевидно, попадают в регион с меандрами Мурманского прибрежного, Мурманского и Нордкапского течений (см. рис. 1). Мы построили такие же карты происхождения частиц для каждого месяца 2017 г. (не показаны) и установили, что сезонная изменчивость циркуляции течений в регионе не выражена.

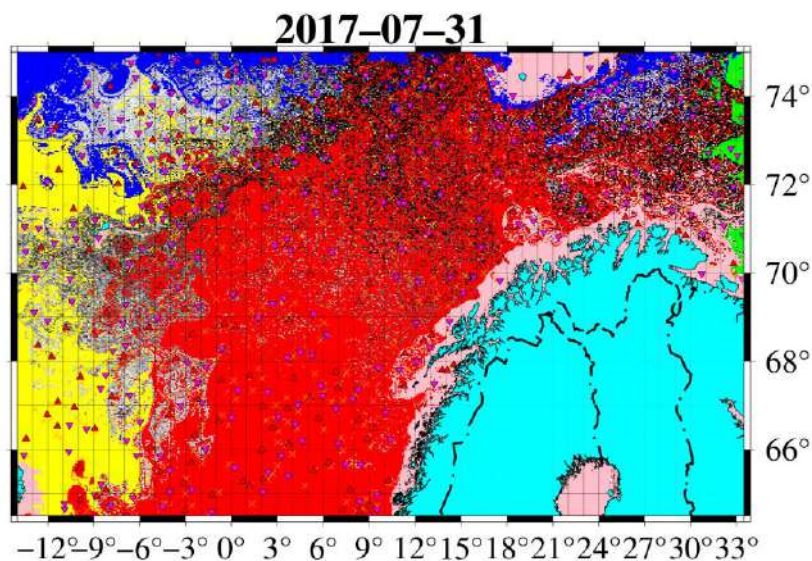


Рис. 3. Карта происхождения частиц (O-тар): красный цвет – частицы, пересекшие южную границу региона 64.5° с.ш. (с юга на север); синий – северную границу 75° с.ш. (с севера на юг); желтый – западную границу 14° з.д. (с запада на восток); зеленый – восточную границу 33.5° в.д. (с востока на запад); розовый – частицы прибрежного происхождения; серый – частицы, которые не покидали регион в течение года до указанной даты. Треугольники обозначают эллиптические точки: ▲ – центры антициклонов, ▼ – циклонов. Оранжевые крестики показывают гиперболические точки, которые являются точками неустойчивости

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменчивость температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» отражает процессы, происходящие в Северо-Европейском бассейне. Нами выявлено, что временные ряды температуры на разрезе хорошо согласованы с климатическими индексами PC2, а также с NAT1 и NAT2, отвечающими за процессы потепления в холодном Северо-Европейском бассейне и охлаждения в теплом регионе, расположенном к югу от Исландии. Коэффициенты корреляции температуры воды (с исключенным сезонным ходом) на разрезе «Кольский меридиан» с индексами PC2, NAT1 и NAT2 достигают 0,80. Коэффициенты взаимной кросс-корреляции между

индексом PC2 и температурой воды на разрезе (станции № 8-10, глубина 0-200 м) достигают 0,83 на сдвиге 9-10 мес.

Низкая корреляция между температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» и индексами PC1 и NAT, отвечающими за объемный расход вод, поступающих из Атлантики в Северо-Европейский бассейн, свидетельствует о том, что температура воды на «Кольском меридиане» определяется не расходом атлантических вод, поступающих в Баренцево море, а их теплосодержанием.

Публикация выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-17-00068.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на потепление в Арктике в зимний период / Г.В. Алексеев, С.И. Кузмина, А.В. Уразгильдеева, Л.П. Бобылев // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2016. – Т. 1. – С. 43-63.

Дерюгин, К.М. Баренцево море по Кольскому меридиану (33°30' в.д.) / К.М. Дерюгин // *Труды Северной научно-промышленной экспедиции*. – М.: Научно-Технический Отдел ВСНХ, 1924. – Вып. 19. – 105 с.

История океанографических исследований на разрезе «Кольский меридиан» / А.П. Алексеев, А.В. Семенов, В.А. Боровков [и др.] // *100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: Сборник докладов Международного симпозиума*. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2005. – С. 4-14.

Карсаков, А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900-2008 гг. / А.Л. Карсаков. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. – 139 с.

Книпович, Н.М. Экспедиция для научно-промышленных исследований у берегов Мурманна. – СПб: Товарищество Художественной печати, 1902. – Т. 1. – 605 с.

Система Баренцева моря / под ред. А.П. Лисицына. – М.: ГЕОС, 2021. – 672 с.

120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, М.Ю. Анциферов [и др.]. – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2022. – 146 с.

Gordeeva, S. Key to the Atlantic Gates of the Arctic / S. Gordeeva, T. Belonenko, L. Morozova // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 22, № 2. – P. 1-14.

Impact of hydrographic data assimilation on the modelled Atlantic meridional overturning circulation / G.C. Smith, K. Haines, T. Kanzow, S. Cunningham // *Ocean Science*. – 2010. – Vol. 6, Iss. 3. – P. 761-774.

Lagrangian analysis of mixing and transport of water masses in the marine bays / S.V. Prants, V.I. Ponomarev, M.V. Budyansky [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2013. – Vol. 49, Iss. 1. – P. 82-96.

Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street / S.V. Prants, M.V. Budyansky, V.I. Ponomarev, M.Y. Uleysky // *Ocean Modelling*. – 2011. – Vol. 38, Iss. 1-2. – P. 114-125.

Observation and Lagrangian Analysis of Quasi-Stationary Kamchatka Trench Eddies / S.V. Prants, M.V. Budyansky, V.B. Lobanov [et al.]. – DOI 10.1029/2020JC016187 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2020. – Vol. 125, Iss. 6. – Art. e2020JC016187

Synechococcus in the Atlantic Gateway to the Arctic Ocean / M.L. Paulsen, H. Doré, L. Garczarek [et al.]. – DOI 10.3389/fmars.2016.00191 // *Frontiers in Marine Science*. – 2016. – Vol. 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ В 2021-2023 гг.

***М.А. Губанищев, А.П. Педченко, М.Ю. Анциферов,
А.А. Канищев, М.Ю. Двинин***
*Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
г. Мурманск*

Аннотация. Представлены результаты наблюдений за микропластиком, выполненных Полярным филиалом ФГБНУ «ВНИРО» в 2021-2023 гг. в акватории Баренцева моря.

Ключевые слова: микропластик, Баренцево море.

ВВЕДЕНИЕ

Пластик в настоящее время является одним из наиболее востребованных материалов и используется практически во всех областях промышленности. Его общемировой выпуск достигает 400,3 млн т в год (Plastic Europe, 2023; данные за 2022 г.), в то время как масштабы утилизации и переработки – меньше 291 млн т в год (UNEP; данные за 2018 г.), на вторичную переработку в мире приходится в среднем 62 % пластиковых отходов. Значительное поступление пластика в морскую среду происходит за счет непосредственного сброса хозяйственно-бытовых сточных вод в береговую зону морей, загрязнения береговой полосы отдыхающими, пластикового мусора с судов, остатков рыболовного снаряжения. Загрязнение вод пластиковым мусором и микропластиком признано актуальной экологической проблемой, изучению которой в Арктике уделяется большое внимание. Установлено, что частицы пластика могут попадать в организмы морских обитателей, являющихся основой пищевой цепочки, а затем и человека. До сих пор нет точных данных о том, как именно микропластик влияет на человека, однако в состав пластмассы входят опасные вещества и, попадая в организм, возможно, вызывают множество патологий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Специалистами ФГБНУ «ВНИРО» выполнена оценка загрязнения поверхностных вод микропластиком в ходе комплексных морских экспедиций:

– трансарктическая экспедиция на НИС «Профессор Леванидов» в августе-октябре 2019 г. (Педченко, Блиновская, 2020);

– арктический переход барка «Седов» по Северному морскому пути в августе-октябре 2020 г. (Педченко, Сомов, 2021);

– первая совместная съемка микропластика в ходе российско-норвежской экосистемной съемки в Баренцевом море (BESS) в августе-сентябре 2021 г. (Международная съемка микропластика..., 2021);

– сбор проб на загрязнение вод микропластиком на НИС «ТИНРО» в ходе съемки тихоокеанских лососей в северной части Тихого океана в феврале-марте 2022 г., выполненной в рамках международного года лосося IYS 2022 по программе НПАФК (Колончин, Педченко, Беляев, 2023);

– совместная съемка микропластика в ходе российско-норвежской экосистемной съемки в Баренцевом море в августе-сентябре 2022 г.;

– совместная съемка микропластика в ходе российско-норвежской экосистемной съемки в Баренцевом море в августе-сентябре 2023 г.

В работе рассмотрены исследования распределения микропластика (МП) в Арктическом регионе (Баренцево море), выполненные специалистами Полярного филиала с 2021 г. в совместной российско-норвежской осенней экосистемной съемке по согласованной сетке станций, что предполагает получение объективных и сопоставимых оценок загрязнения вод МП на основе использования единых методов сбора и обработки проб. Общее количество проб в Баренцевом море составило 119, из которых 39 собрано в 2021 г., 33 в 2022 г. и 47 в 2023 г.

С 2021 по 2023 г. отбор проб МП выполняли на НИС «Вильнюс» в акватории российской части экосистемной съемки в Баренцевом море, включая участки распределения наиболее массовых видов промысловых рыб. Во время экспедиций собраны материалы на северных, северо-восточных и восточных границах моря, а также на стандартных океанографических разрезах, пересекающих основные потоки атлантических течений, что обусловило возможность получения уникальных сведений о распределении частиц МП в период осеннего выхолаживания вод и начала ледообразования. Акватория исследований и положение станций отбора проб микропластика в Баренцевом море представлены на рис. 1.

Отбор проб микропластика на поверхности арктических вод проводили по единой методике. Траления выполняли по ходу движения судна на скорости 2,3-3,5 уз только в светлое время суток нейстонной сетью (трал Манта) с размером ячеи 335 мкм, оснащенной калиброванным счетчиком General Oceanic's для контроля дистанции траления и объема протока воды через ее рамку размером 600x150 мм (рис. 2). Отсчет времени траления начинается с момента выхода сети на рабочий режим лова. Контролировать заглубление рамки можно с помощью контрольного фала или скоростью хода судна. Время траления минимум 15 мин, максимум –

30 мин. По истечении контрольного времени производится выборка сети на первой скорости лебедки. Собранную пробу помещают в соответствующую емкость и после первичного визуального определения состава нейстона и наличия микропластика фиксируют 4 %-ным раствором формалина.

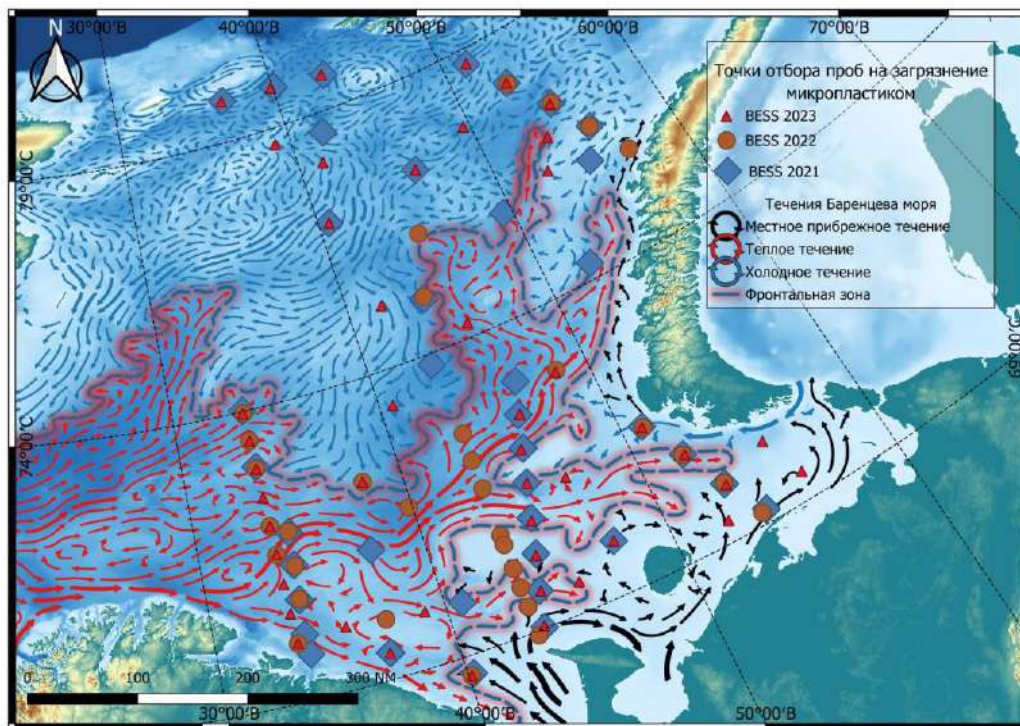


Рис. 1. Положение точек отбора проб на загрязнение микропластиком в 2021-2023 гг.

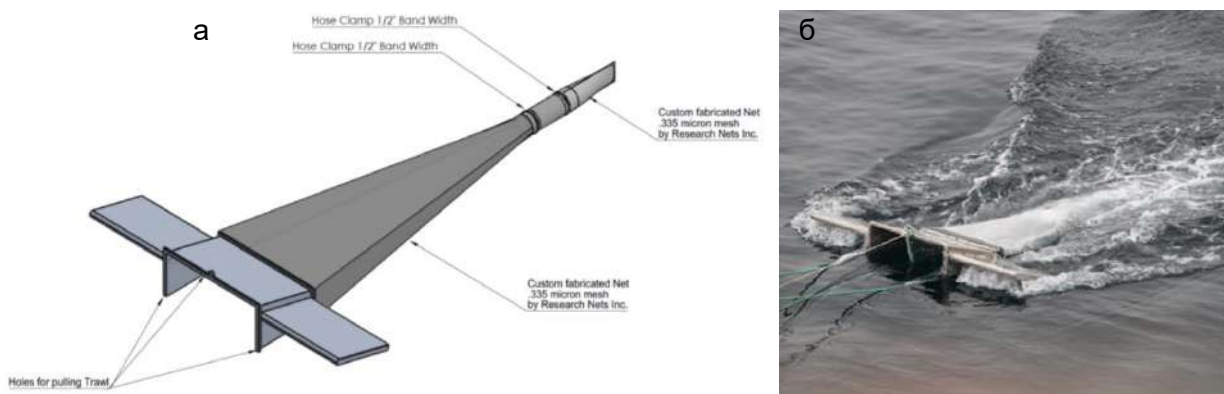


Рис. 2. Схема нейстонной сети (трал Манта) (а) и ее вид в режиме сбора проб микропластика (б)

В таблице перечислены основные типы пластика, встречаемые в Баренцевом море, и их применение.

Основные типы пластика

Тип пластика	Общепринятая аббревиатура	Применение
Полиэтилен	PE	Пакеты, питьевые бутылки
Полипропилен	PP	Бутылки, стаканчики, садовая мебель, пищевые контейнеры, упаковочные ленты
Сэвилен	EVA	Напольные покрытия, обувь
Полиэтилен высокой плотности	HDPE	Контейнеры, тары, производство трубопроводов
Полистирол	PS	Одноразовая посуда, пластиковые игрушки
Ацетат целлюлозы	CA	Производства основы фото- и киноплёнки, ацетатного волокна, пластических масс, лаков

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены результаты первичного визуального (с помощью бинокля) определения количества частиц микропластика в пробах за 2021-2023 гг.

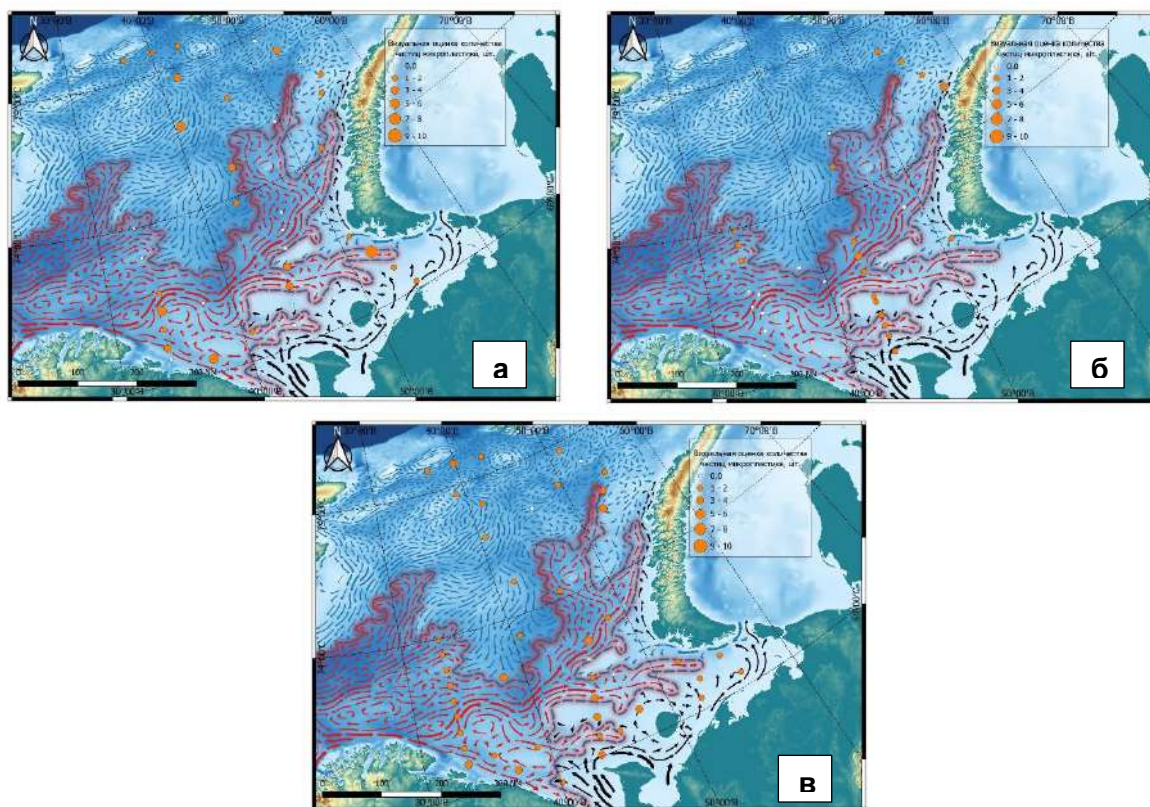


Рис. 3. Визуально оцененное количество частиц микропластика в пробах, отобранных в 2021 (а), 2022 (б) и 2023 (в) гг.

Пробы за 2022-2023 гг. находятся в обработке. Качественный анализ проб, собранных в 2021 г., проведен на базе Политехнического института Дальневосточного федерального университета с использованием методов инфракрасной микроскопии (ИК) и спектрофотометрии. Химический состав микропластика и вид полимера определяли на ИК-Фурье спектрофотометре IRTraser-100 с приставкой НПВО (нарушенное полное внутреннее отражение) Quest горизонтального типа (Shimadzu, Япония) с диапазоном измерений от 400 до 4000 см⁻¹ и разрешением 2 см⁻¹. Идентификация проводилась автоматическим сравнением со встроенной библиотекой спектров (STJ-Europe Spectral Database, Германия). Результаты представлены на рис. 4, 5.

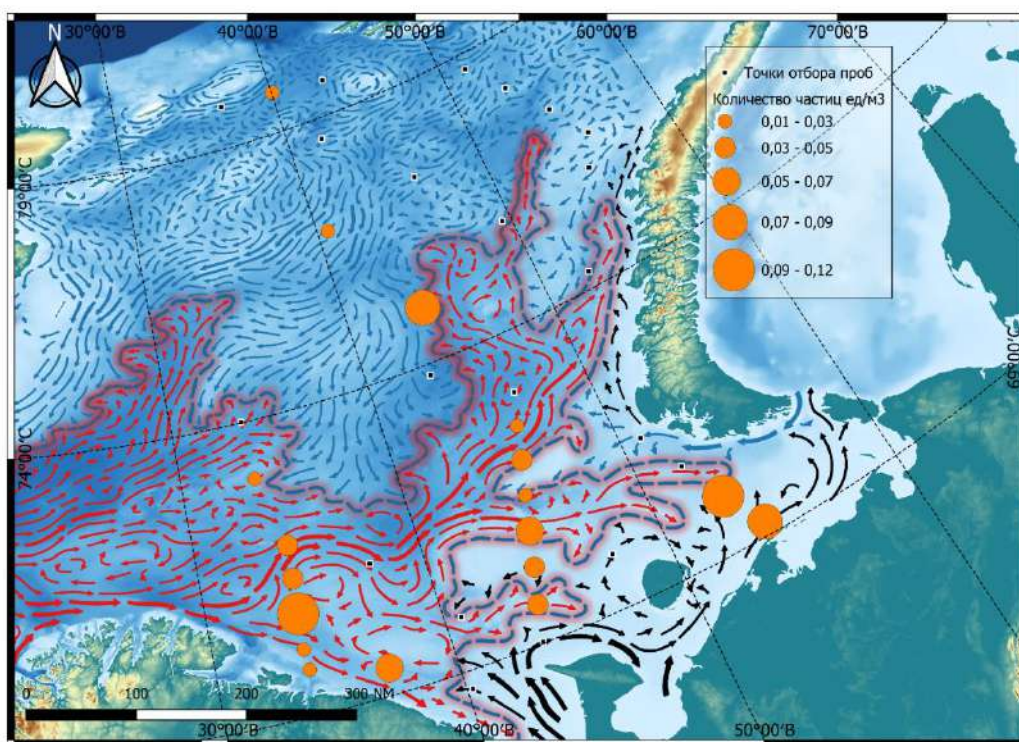
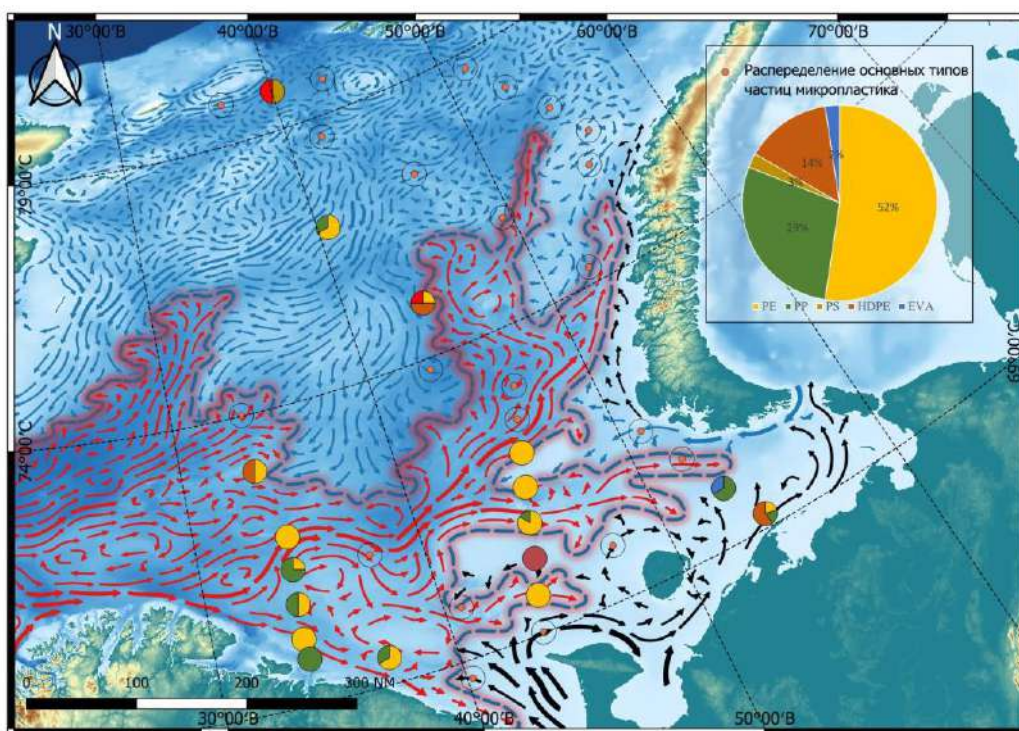


Рис. 4. Количество частиц микропластика синтетического и смешанного происхождения в 2021 г. по данным лабораторного анализа, ед./м³

Сравнивая данные визуальной предварительной оценки загрязнения микропластиком с данными лабораторного анализа, можно сделать вывод о том, что визуальная оценка существенно расходится с инструментальной. Вероятно, за искусственные волокна и частицы микропластика принимались фрагменты растительного и животного происхождения. Этот факт еще раз подтверждает, что анализ полимерного состава частиц с помощью специализированного оборудования является обязательным во

всех лабораторных исследованиях микропластика, без которого выполненное исследование считается неполным.



По результатам лабораторной идентификации частиц микропластика в пробах, собранных в 2021 г. в Баренцевом море, видно, что наибольшая встречаемость микропластика отмечалась в системе теплых течений (см. рис. 4).

Распределение и встречаемость частиц пластика различного типа представлены на рис. 5. Идентификация частиц микропластика показала высокую встречаемость трех типов пластика: полиэтилена двух видов (PE и HDPE) и полипропилена (PP) (см. рис. 5), что согласуется с объемами европейского производства наиболее распространенных полимеров (Plastic Europe, 2023).

Количественные оценки содержания микропластика, полученные в экспедициях ВНИРО, показали, что наибольшие концентрации микропластика в водах центральной и восточных частях Баренцева моря в 2021 г. не превышали $0,12 \text{ ед./м}^3$ (см. рис. 4). Представленные оценки свидетельствуют о низкой загрязненности микропластиком поверхностных вод Баренцева моря по сравнению с таковыми южнее и юго-западнее Шпицбергена в западной части Баренцева моря ($0,34 \pm 0,31 \text{ ед./м}^3$) (Microplastics in Arctic..., 2015).

Отображение распределения частиц микропластика (ед./м³) в координатах температуры и солёности тех водных масс, в которых они были обнаружены, позволило выделить три группы частиц: первая в водах с температурой от 8,0 до 11,0 °С и солёностью от 34,2 до 34,7, что по значениям близко к водам атлантического происхождения, вторая – в водах с низкой солёностью до 34,0 и температурой выше 8,0 °С и третья группа – в водах с температурой ниже 8,0 °С (рис. 6).

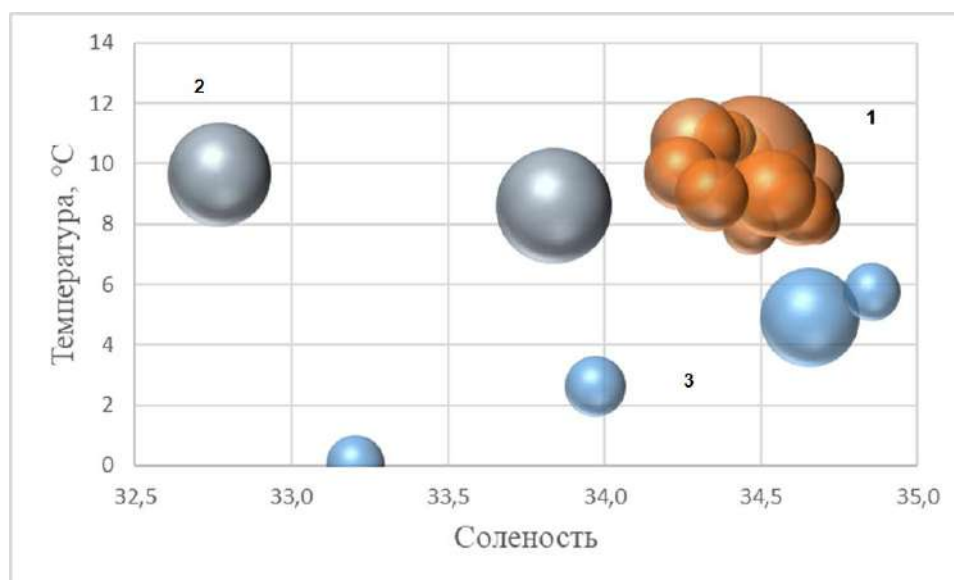


Рис. 6. Распределение количества частиц микропластика (ед./м³) в координатах температуры и солёности: 1-3 – выделенные группы точек

Распределение выделенных групп точек в географических координатах представлено на рис. 7. Положение первой группы совпадает с потоками атлантических вод, с которыми частицы микропластика заносятся в акваторию Баренцева моря (Состав и распределение..., 2021). Вторая группа расположена на юго-востоке моря, в прибрежных водах, характеризующихся высокой температурой и пониженной солёностью. В этом районе могут создаваться условия для концентрации частиц микропластика и, возможно, некоторое его количество привносится речным стоком, на что косвенно указывает высокое разнообразие различных типов микропластика в пробах (см. рис. 5). Вероятность такой концентрации ранее отмечалась при исследованиях морского мусора (Benzik, Orlov, Novikov, 2021). Третья группа оказывается распределенной в относительно холодных баренцевоморских водах с изменяющейся в широких пределах солёностью.

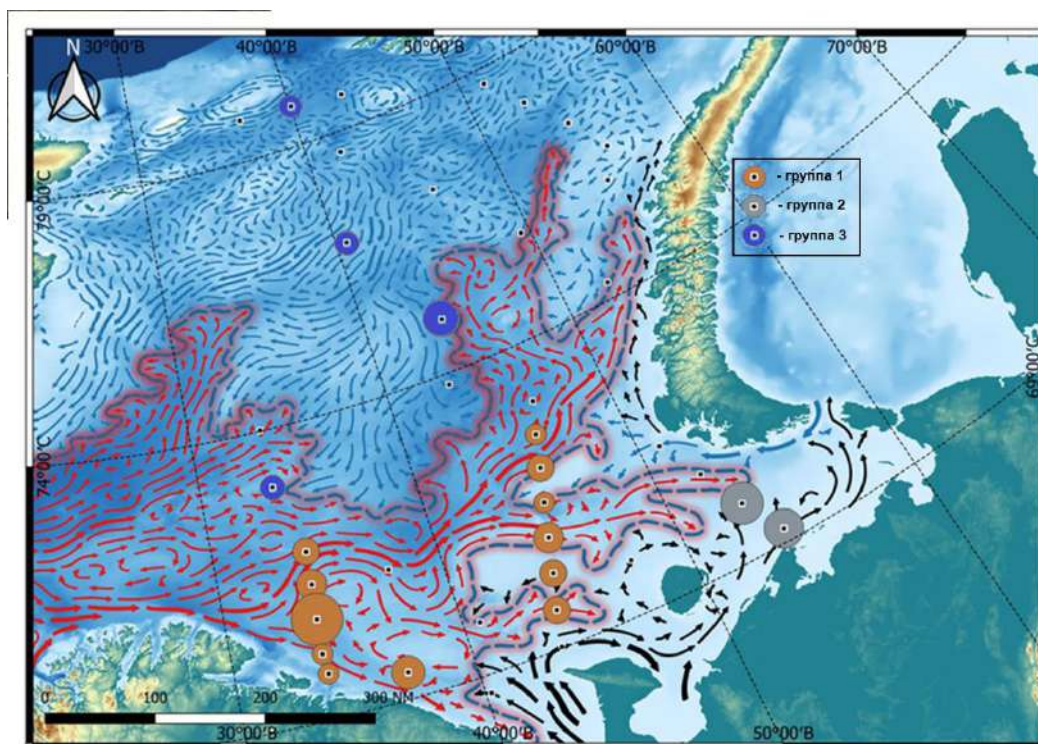


Рис. 7. Распределение групп точек, выделенных в координатах температуры и солёности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пути переноса микропластика, а также вклад различных источников его поступления в Арктику недостаточно изучены ввиду сложности реализации этой задачи. Отмечены:

- увеличение встречаемости частиц микропластика в границах распределения атлантических водных масс в центральной части Баренцева моря и потоках теплых течений в акватории первой совместной съемки микропластика в Баренцевом море в 2021 г.;
- высокая встречаемость трех типов пластика: полиэтилена двух видов (PE и HDPE) и полипропилена (PP);
- вероятность концентрирования частиц микропластика, вынесенных потоками атлантических вод, на юго-востоке моря.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Колончин, К.В. Исследования содержания микропластика в воде и промысловых рыбах: от научного поиска к масштабному мониторингу / К.В. Колончин, А.П. Педченко, В.А. Беляев // Труды ВНИРО. – 2023. – Т. 193. – С. 162-173.

Международная съемка микропластика в Баренцевом море в 2021 году: первый опыт крупномасштабной количественной оценки /

А.П. Педченко, М.Ю. Анциферов, М.А. Губанищев, М.Ю. Двинин // Труды X междунар. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)». – Т. 3 (III). – Тверь: ПолиПРЕСС, 2021. – С. 336-340.

Педченко, А.П. Трансарктическая экспедиция ВНИРО: Результаты исследований микропластика в Арктических морях в 2019 г. / А.П. Педченко, Я.Ю. Блиновская // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. – Ч.1. – С. 203-205.

Педченко, А.П. Арктический переход барка «Седов» в августе-октябре 2020 г.: обзор результатов научных наблюдений / А.П. Педченко, А.А. Сомов // Труды ВНИРО. – 2021. – Т. 185. – С. 163-171.

Состав и распределение морского антропогенного мусора на акватории Баренцева моря / М.А. Новиков, Е.А. Горбачева, Т.А. Прохорова, М.Н. Харламова // Океанология. – 2021. – Т. 61, № 1. – С. 56-66.

Benzik, A.N. Marine seabed litter in Siberian Arctic: a first attempt to assess / A.N. Benzik, A.M. Orlov, M.A. Novikov // Marine Pollution Bulletin. – 2021. – Vol. 172. – Iss. 112836.

ICES. Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR) // ICES Scientific Reports. 4:50. – 2022. – 235 p. – DOI 10.17895/ices.pub.20051438 (дата обращения 14.03.2024).

Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples / A.L. Lusher, V. Tirelli, I. O'Connor, R. Officer. – DOI 10.1038/srep14947. – 2015. – Sci. Rep. 5: 14947 (1).

Plastic Europe. 2023. – URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023> (дата обращения 14.03.2024).

UNEP EWAD SDG Unit. – URL: <https://wesr-search.unep.org/app/dataset/sdg-i-975-plastic-production> (дата обращения 14.03.2024).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИХЕТ НА РАЗРЕЗЕ «КОЛЬСКИЙ МЕРИДИАН»

Д.Р. Дикаева

Мурманский морской биологический институт РАН (ММБИ РАН), г. Мурманск

Аннотация. На основе материала, собранного на разрезе «Кольский меридиан» в 2019 г., проанализированы видовой состав, количественное распределение и структура видовых комплексов полихет. Отмечена зависимость видового состава и количественных характеристик полихет от характера грунта, глубины и гидрологических условий.

Ключевые слова: полихеты, сообщества, «Кольский меридиан».

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие многие исследователи отмечают высокое теплосодержание вод Баренцева моря, зарегистрированное на разрезе «Кольский меридиан» (Исследование изменчивости гидрофизических..., 2010; 120 лет океанографических..., 2022; Максимовская, Запорожцев, 2022). Климатические изменения существенно влияют на структуру и состав донных беспозвоночных, в том числе полихет, что позволяет использовать их в качестве индикатора изменений гидрологического режима. Ранее была проанализирована динамика бентосных донных сообществ на разрезе «Кольский меридиан» и отмечена зависимость колебаний видового состава и структуры сообществ полихет от изменений температуры воды (Несис, 1960; Галкин, 1981; Денисенко, 2005; Влияние климатических изменений..., 2007; Дикаева, 2009; Дикаева, 2010; Гидробиологические индикаторы циклических..., 2011; Предварительные результаты современного..., 2013; Дикаева, Фролова, Вязникова, № 2(36), с. 143; Дикаева, Фролова, Вязникова, Т.19, с. 258). Изучение видового состава и структуры донных сообществ на разрезе «Кольский меридиан» в современный период вызывает особый интерес. В экспедиции ММБИ в 2019 г. были продолжены мониторинговые исследования на указанном разрезе в целях выявления изменений в распределении сообществ полихет в районе исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для работы послужили 43 количественные пробы бентоса, собранные на ст. 2-10 разреза «Кольский меридиан» в экспедиции ММБИ РАН на НИС «Дальние Зеленцы» в апреле 2019 г. (рис. 1).

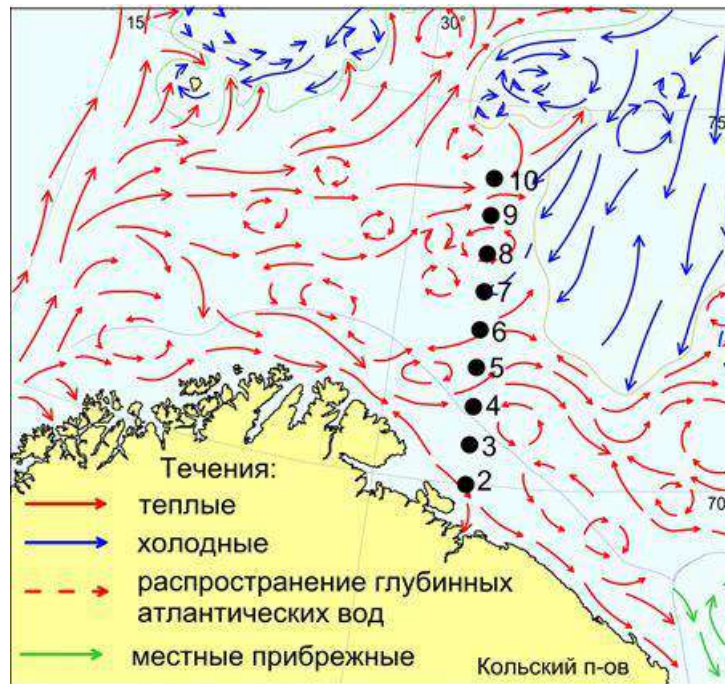


Рис. 1. Карта-схема отбора бентосных проб на разрезе «Кольский меридиан»

Пробы зообентоса отбирали дночерпателем ван Вина (с площадью захвата $0,1 \text{ м}^2$) в 5-кратной повторности. Обработка материала осуществлялась по стандартной гидробиологической методике. Собранный грунт промывали через капроновое сито с размером ячеек $0,75 \text{ мм}$, фиксировали 4 %-ным формалином с последующим переводом беспозвоночных в 70 %-ный спирт. Выделение станций по сходству видового состава выполняли с помощью кластерного анализа на основе коэффициента сходства Брея-Кертиса (Bray, Curtis, 1957). При оценке биогеографического состава многощетинковых червей была использована классификация ареалов полихет, предложенная И.А. Жирковым (2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа данных в районе исследования отмечено 114 таксонов полихет. Видовое богатство на станциях варьировало от 38 до 64 видов (рис. 2), максимальное количество видов отмечено в прибрежной части разреза «Кольский меридиан» (ст. 2) на глубине 150 м на илисто-песчаных грунтах с примесью спикул губок.

Результаты исследований на разрезе «Кольский меридиан» показали, что биомасса полихет на станциях колебалась от 3 до 73 г/м^2 (рис. 3). Минимальные значения отмечены в южной части разреза на ст. 4 (глубина

214 м), высокие значения – в северной части разреза на ст. 10 (глубина 313 м, илесто-глинистые грунты).

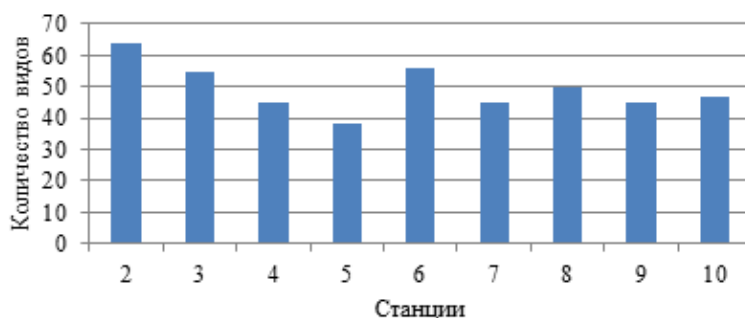


Рис. 2. Распределение количества видов полихет на разрезе «Кольский меридиан»

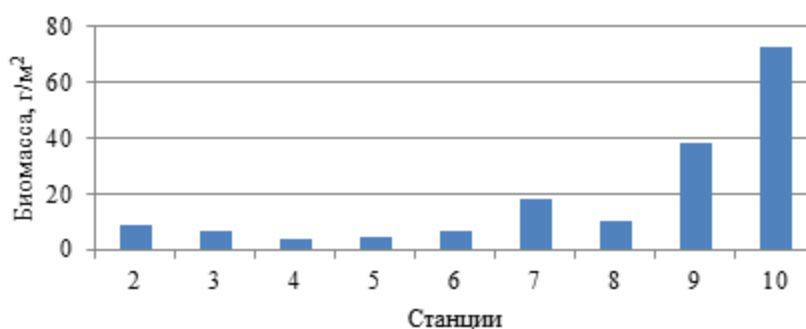


Рис. 3. Распределение биомассы полихет на разрезе «Кольский меридиан»

Плотность поселения полихет на разрезе «Кольский меридиан» варьировала от 913 до 3546 экз./м² (рис. 4). Высокая плотность поселения отмечена в прибрежной части «Кольского меридиана» (ст. 2) в районе влияния Прибрежной ветви Мурманского течения на глубине 148 м на илесто-песчаных, глинистых грунтах с примесью спикул губок, низкая – в центральной части «Кольского меридиана» (ст. 5) на илесто-песчаных, глинистых грунтах.

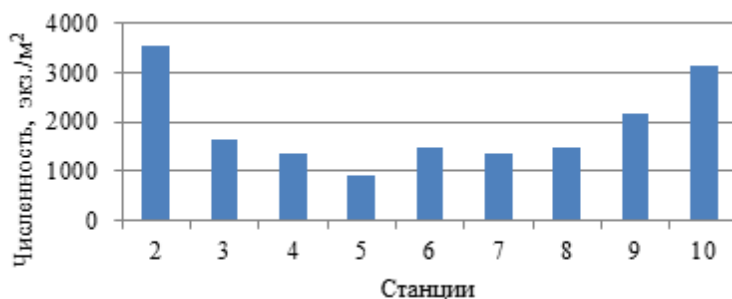


Рис. 4. Распределение численности полихет на разрезе «Кольский меридиан»

В результате кластерного анализа вдоль разреза по направлению с юга на север, как и в предыдущих исследованиях, выделены три видовых комплекса, распределение которых связано с особенностями гидрологического режима, типом донных осадков и геоморфологическим строением дна.

В южной прибрежной части разреза на илисто-песчаных грунтах с примесью губочных спикул на глубине от 148 м отмечен комплекс с доминированием полихеты *Chone turmanica*. Комплекс характеризуется максимальной плотностью поселения (3546 ± 486 экз./м²) и невысокой биомассой ($8,7 \pm 1,4$ г/м²). В биогеографическом составе доминируют бореально-арктические виды (62 %), количество бореальных видов (27 %) максимально для всего района исследования (27 %), арктические виды составляют 11 %.

В центральной части разреза на илисто-глинистых, илисто-песчаных грунтах на глубинах от 214 до 279 м отмечен комплекс с доминированием *Maldane sarsi*. Видовой комплекс характеризуется невысокой биомассой ($7,7 \pm 1,2$ г/м²) и средней плотностью поселения (1348 ± 187 экз./м²). В биогеографическом составе доминируют бореально-арктические виды (68 %), доля бореальных видов – 23 %, арктических – 9 %.

В северной части разреза на илисто-глинистых грунтах на глубинах от 215 до 323 м отмечен комплекс с доминированием детритофага *Spiochaetopterus typicus*. Комплекс характеризуется высокой биомассой ($34,8 \pm 7,5$ г/м²) и умеренной плотностью поселения (2039 ± 288 экз./м²). В биогеографическом составе доминируют бореально-арктические виды (73 %), доля бореальных – 18 %, арктических – 9 %.

По тепловому состоянию вод в слое 0-200 м на разрезе «Кольский меридиан» период с 1995 по 2022 г. оценивается как теплый и характеризуется положительными аномалиями температуры воды. В 2019 г. температура воды на некоторых участках разреза понижалась до уровня нормальных лет (120 лет океанографических..., 2022; Максимовская, Запорожцев, 2022).

В юго-западной части Баренцева моря проходит граница арктической и бореальной областей, что определенным образом сказывается на соотношении между биогеографическими группами. Доля бореальных и арктических видов полихет вдоль разреза «Кольский меридиан» ежегодно изменяется, что объясняется сложностью температурного режима вод Мурманского и Нордкапского течений.

На всех станциях разреза «Кольский меридиан» отмечено доминирование бореально-арктических видов. Значительно увеличение доли бореальных видов в южной (ст. 2) и центральной (ст. 5) частях разреза (рис. 5), в районе влияния теплых атлантических масс. При

продвижении на север наблюдалось снижение доли бореальных видов. Доля арктических видов увеличивается с юга на север. Распределение биогеографического состава полихет отражает структуру водных масс, через которые проходит «Кольский меридиан».

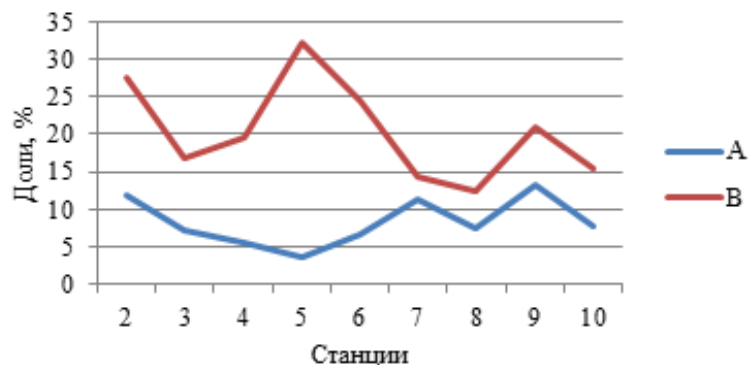


Рис. 5. Доля арктических (А) и бореальных (В) видов от общего количества видов полихет на станциях разреза «Кольский меридиан» в 2019 г.

Сравнивая полученные данные с результатами предыдущих исследований (Дикаева, Фролова, Вязникова, № 2(36), с. 143; Дикаева, Фролова, Вязникова, Т.19, с. 258), можно сказать, что наиболее сильные колебания доли бореальных видов отмечены в южной части разреза, в районе влияния Прибрежной и Основной ветвей Мурманского течения (ст. 2 и 5). В современный период граница преобладания бореальных видов сместилась к стрезню Основной ветви Мурманского течения (ст. 5). При этом максимальной доля бореальных видов в данном районе (ст. 5) была в умеренно теплом 2019 г. Изменения термического режима на разрезе «Кольский меридиан» влияют на степень проникновения бореальных видов по Прибрежной и Основной ветвям Мурманского течения.

Анализ полученных результатов не показал существенных изменений в составе доминирующих видов полихет. Прибрежный район (ст. 2), как и в предыдущих исследованиях (Дикаева, 2009; Дикаева, 2010; Предварительные результаты современного..., 2013; Дикаева, Фролова, Вязникова, № 2(36), с. 143; Дикаева, Фролова, Вязникова, Т.19, с. 258), отличается невысокими значениями биомассы полихет, но высокой плотностью поселения. Мелководный район с преобладанием твердых грунтов со спикулами губок создает неблагоприятные условия для полихет, что приводит к снижению их биомассы. Увеличение видового разнообразия, а также количества бореальных видов в данном районе, вероятно, связано с сильным влиянием теплого Мурманского течения, что позволяет многим тепловодным видам находить здесь благоприятные условия для обитания. В центральной и северной частях разреза «Кольский меридиан» с увеличением глубины и постоянством гидрологических

условий, как и в предыдущих исследованиях, отмечено доминирование детритофагов *Maldane sarsi* и *Spiochaetopterus typicus*. С увеличением глубины и преобладанием илисто-песчаного грунта создаются благоприятные условия для детритофагов, что приводит к увеличению их биомассы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современный период на разрезе «Кольский меридиан» отмечена стабильность таксоценов полихет. Существенных изменений в составе доминирующих видов не выявлено. Реакция полихет на изменение теплосодержания водных масс особенно заметна в южной части разреза, подверженной влиянию теплых водных масс Мурманского течения. Увеличение количества бореальных видов в 2019 г. в южной части разреза, вероятно, является следствием длительного теплого периода с аномально высокой температурой воды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Влияние климатических изменений на зообентос Баренцева моря (на примере нескольких массовых видов) / Е.А. Фролова, О.С. Любина, Д.Р. Дикаева [и др.] // ДАН. – 2007. – Т. 416, № 1. – С. 139-142.

Галкин, Ю.И. Колебания климата и количественные изменения бентоса в Баренцевом море / Ю.И. Галкин // Тез. докл. VI съезда ВГБО. – Киев: Наукова думка. – 1981. – Ч. 1. – С. 64-65.

Гидробиологические индикаторы циклических изменений климата Западной Арктики в XX-XXI вв. / Г.Г. Матишов, Д.В. Моисеев, О.С. Любина [и др.] // Вестник ЮНЦ РАН. – 2011. – Т. 7, № 2. – С. 54-68.

Денисенко, С.Г. Многолетние изменения донной фауны Баренцева моря и гидрологические флуктуации вдоль разреза «Кольский меридиан» / С.Г. Денисенко // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: Сб. докл. междунар. симпозиума. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2005. – С. 65-74.

Дикаева, Д.Р. Современное распределение полихет вдоль разреза «Кольский меридиан» (Баренцево море) / Д.Р. Дикаева // ДАН. – 2009. – Т. 426, № 6. – С. 838-840.

Дикаева, Д.Р. Влияние климатических изменений на распространение полихет вдоль разреза «Кольский меридиан» (Баренцево море) / Д.Р. Дикаева // Морские исследования полярных областей Земли в международном полярном году 2007/08: Тезисы докладов международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения

Е.К. Федорова (г. Санкт-Петербург, 21-23 апреля 2010 г.). – СПб.: Изд-во ААНИИ, 2010. – С. 217-218.

Дикаева, Д.Р. Видовой состав, количественное распределение и динамика сообществ полихет на разрезе «Кольский меридиан» / Д.Р. Дикаева, Е.А. Фролова, В.С. Вязникова // Труды КНЦ РАН. – 2016. – № 2 (36). – С. 143-166.

Дикаева, Д.Р. Распределение и динамика сообществ полихет на разрезе «Кольский меридиан» (Баренцево море) / Д.Р. Дикаева, Е.А. Фролова, В.С. Вязникова // Вестник МГТУ. – 2016. – Т. 19, № 1/2. – С. 258-267.

Жирков, И.А. Полихеты Северного Ледовитого океана / И.А. Жирков – М.: Янус-К, 2001. – 632 с.

Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» / В.Д. Бойцов, А.Л. Карсаков, А.А. Аверкиев [и др.] // Ученые записки РГГМУ. – 2010. – № 15. – С. 135-149.

Максимовская, Т.М. Изменчивость аномалий температуры и солености вод в августе-сентябре на разрезе «Кольский меридиан» с 1970 по 2019 г. / Т.М. Максимовская, И.Ф. Запорожцев. – DOI 10.37614/2307-5252.2022.4.10.006 // Труды КНЦ РАН. Океанология. – Вып. 10. – 2022. – С. 55-67.

Несис, К.Н. Изменение донной фауны Баренцева моря под влиянием колебаний гидрологического режима (на разрезе по Кольскому меридиану) / К.Н. Несис // Советские рыбохозяйственные исследования в морях европейского севера. – М.: Рыбное хозяйство, 1960. – С. 129-136.

Предварительные результаты современного мониторинга зообентоса на разрезе «Кольский меридиан» (Баренцево море) / О.С. Любина, Е.А. Фролова, Д.Р. Дикаева [и др.] // Труды КНЦ РАН. Океанология. – 2013. – Вып. 1. – С. 208-223.

120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, М.Ю. Анциферов [и др.]; Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича). – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2022. – 145 с.

Bray, J.R. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin / J.R. Bray, J.T. Curtis. – DOI 10.2307/1942268 // Ecological Monographs. – 1957. – Vol. 27. – P. 325-349.

ВЛИЯНИЕ ПОТЕПЛЕНИЯ НА ВСТРЕЧАЕМОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЫБ ТЕПЛОВОДНЫХ ВИДОВ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

А.В. Долгов ^{1,2}

¹Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
г. Мурманск

²Мурманский арктический университет (МАУ), г. Мурманск

Аннотация. Рассмотрены встречаемость и распределение рыб тепловодных видов в Баренцевом море в современный теплый период. Проведен анализ зависимости численности, биомассы и распределения рыб тепловодных и холодноводных видов от температуры воды на разрезе «Кольский меридиан». Выявлена прямая зависимость показателей обилия и встречаемости от температуры воды в разных ветвях течений для некоторых рыб тепловодных видов и обратная – для ряда рыб холодноводных видов.

Ключевые слова: рыбы, распространение, температура воды, Баренцево море.

ВВЕДЕНИЕ

С середины 1990-х годов в Баренцевом море начался период потепления (Трофимов, Карсаков, Ившин, 2018), что привело к изменениям в распределении рыб различных зоогеографических групп и общей структуры ихтиофауны и сообществ рыб данного района (Долгов, 2016; Recent warming leads..., 2015). Один из факторов, влияющих на указанные изменения, – температура воды в районах обитания рыб. В связи с этим целью настоящей работы является анализ зависимости динамики численности, встречаемости и распространения различных видов рыб от температуры воды в Баренцевом море.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные научных съемок, выполненных Полярным филиалом ВНИРО («ПИНРО» им. Н.М. Книповича) в 2004-2020 гг. В качестве показателей обилия видов принимали среднюю численность (экз. на 1 ч траления) и биомассу (кг на 1 ч траления) для рыб всех видов в донных тралениях, в качестве косвенного показателя распределения вида – долю тралений, в которых отмечали рыбу каждого вида (% от общего количества тралений в съемке).

В качестве характеристики океанографических условий рассматривали среднегодовую температуру воды на различных станциях стандартного океанографического разреза «Кольский меридиан».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с общим потеплением вод в Северной Атлантике с начала 1990-х годов в Баренцевом море отмечены многочисленные поимки рыб тепловодных видов, редких или ранее не отмечавшихся в этом районе, – серая тригла *Eutrigla gurnardus* (Русяев, Шацкий, 2001), парусный скат *Dipturus linteus* (Долгов, Игашов, 2001), гренландская нансенция *Nansenia groenlandica* (Byrkjedal, Lemvig, 2002), змеевидная рыба-игла *Entelurus aequoreus* (Русяев, Долгов, Карамушко, 2007), слитножаберниковый угорь *Diastobranchus capensis* (Svendsen, Langelle, Byrkjedal, 2011), сарган *Belone belone* (Долгов, Забавников, 2021) и др. (Долгов, 2006, 2016, 2022; Atlas of the..., 2011, 2013).

Распространение рыб различных видов в Баренцевом море обусловлено рядом характеристик – глубиной, температурой и соленостью воды (Долгов, 2016). В связи с этим можно ожидать, что площадь распространения, а также уловы рыб различных видов (как тепловодных, так и холодноводных) будут зависеть от температуры воды.

При анализе зависимости величин средних уловов рыб 207 видов или родов и доли тралений, в которых встречался конкретный вид (род), от температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» (в слоях 0-50, 0-200, 50-200 и 150-200 м Основной и Прибрежной ветвей Мурманского течения и Центральной ветви Нордкапского течения) в 2004-2020 гг. было выявлено следующее.

Встречаемость и распространение. У рыб 12 видов из 107 (тихоокеанская минога, пикша, сайда, навага, миктофиды, полосатая зубатка, атлантический триглопс, атлантический двурогий ицел, миноговидный люмпен, пятнистый лептоклин, лиманда, полярная камбала) отмечена значимая прямая зависимость ($r > 0,5$) площади их распространения от температуры некоторых ветвей течений и слоев воды. Значимая обратная зависимость ($< -0,5$) выявлена только у рыб 3 видов (парусный скат, арктический липарис и шероховатый крючкорог).

У рыб остальных видов эта зависимость была незначимой. Тем не менее у большинства из них (31 вид) она была положительной для температуры некоторых ветвей течений и слоев воды, причем как у тепловодных (например, трески, пикши, путассу, мерланга, змеевидной рыбы-иглы и атлантического триглопса), так и у холодноводных (например, карепроктов, полярного паралипариса и гимнелисов). У рыб 8 видов эта зависимость была отрицательной – у холодноводных сайки, северной бентоземы, бледного и сетчатого ликодов и тепловодных мойвы, окуня-клювача, белокорого палтуса, мегрима. У рыб остальных видов

связь с температурой воды в одних ветвях течений (или слоях) могла быть прямой, в других – обратной.

Численность. У рыб 18 видов из 107 (тихоокеанская минога, звездчатый скат, корюшка, навага, ликод Адольфа, чешуебрюхий и тонкий ликоды, гимнелы, муреновидный лиценхел, ликодон, окунь-клювач, атлантический двурогий ицел, коттункул Садко, ледовитоморская лисичка, миноговидный люмпен, пятнистый лептоклин, камбала-ерш, полярная камбала) была выявлена значимая прямая зависимость ($r > 0,5$) их численности от температуры в некоторых ветвях течений и слоях воды. Значимая обратная зависимость ($<-0,5$) установлена только у рыб 2 видов (европейская химера и шероховатый крючкорог).

У рыб остальных видов эта зависимость была незначимой. У большинства из них (37 видов) она была положительной для температуры в некоторых ветвях течений и слоях воды как у тепловодных (например, трески, путассу, сайды, трех видов морских окуней, северного веретенника, аргентины, камбалы-ерша), так и у холодноводных (например, полуголового и бледного ликодов, ликодона, малоглазого коттункула, остроносого триглопсов, полярной камбалы). У рыб 9 видов эта зависимость была отрицательной – у холодноводных бледного ликода, чернобрюхого и арктического липарисов, шиповатого круглопера, тепловодных парусного ската, европейской химеры, северного макруруса, песчанок и мегрима. У рыб остальных видов связь с температурой воды в одних ветвях течений (или слоях) могла быть прямой, в других – обратной.

Биомасса. У рыб 21 вида из 107 (тихоокеанская минога, шипохвостый скат, корюшка, северный веретенник, навага, ликоды Адольфа и Росса, чешуебрюхий и тонкий ликоды, гимнелы, муреновидный лиценхел, лиценхел Сарса, ликодон, остроносый триглопс, атлантический двурогий ицел, коттункул Садко, ледовитоморская лисичка, миноговидный и средний люмпены, пятнистый лептоклин, полярная камбала) отмечена значимая прямая зависимость ($r > 0,5$) их биомассы от температуры воды во всех трех ветвях течений в большинстве слоев. Значимая обратная зависимость ($<-0,5$) выявлена только у рыб 3 видов (европейская химера, ледовая треска и шероховатый крючкорог).

У рыб остальных видов эта зависимость была незначимой. У большинства из них (31 вид) она была положительной для температуры некоторых ветвей течений и слоев воды как у тепловодных (например, 3 видов зубаток, путассу, сайды, 3 видов морских окуней, северного веретенника), так и у холодноводных (например, полуголового и бледного ликодов, ликодона, полярного и остроносого триглопсов, полярной камбалы). У 18 видов эта зависимость была отрицательной – у холодноводных сетчатого и полярного ликодов, чернобрюхого липариса и

др. и у тепловодных трески, песчанок, белокорого палтуса, мегрима и др. У рыб остальных видов связь с температурой воды одних ветвей течений (или слоев воды) могла быть прямой, других – обратной.

Кроме того, изменения температуры воды могут привести к изменению границ ареала видов в Баренцевом море. Так, ранее нами уже было выявлено расширение района обитания и сдвиг северных и/или восточных границ распределения тепловодных бореальных видов скатов (круглый, шипохвостый) с одновременным некоторым увеличением их численности и биомассы. При этом было отмечено снижение численности и биомассы арктического вида северного ската и сдвиг его распределения на север в холодноводную часть Баренцева моря (Dolgov, Prozorkevich, 2022).

В то же время отсутствие четкой зависимости показателей распространения, численности и биомассы рыб большого числа видов от температуры воды свидетельствует о значительном влиянии других факторов среды и биоты (урожайность поколений, кормовая база, хищничество и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современный теплый период в Баренцевом море отмечено появление рыб новых тепловодных видов, а также увеличение их численности, биомассы и площади распространения, что в том числе связано с повышением температуры воды. Для рыб тепловодных видов была выявлена прямая зависимость численности, биомассы и распространения в Баренцевом море от температуры воды в различных ветвях течений на разрезе «Кольский меридиан» и обратная зависимость – для рыб холодноводных видов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Долгов, А.В. Новые данные о распространении редких видов рыб в российских водах Баренцева моря / А.В. Долгов // Вопросы ихтиологии. – 2006. – Т. 46, № 2. – С. 203-210.

Долгов, А.В. Состав, формирование и трофическая структура ихтиоценов Баренцева моря / А.В. Долгов; отв. ред. К.М. Соколов; ПИНРО. – Мурманск: ПИНРО, 2016. – 336 с.

Долгов, А.В. Северная бентозема в морях Российской Арктики / А.В. Долгов // Наука и образование – 2021: материалы всерос. науч.-практ. конф. (Мурманск, 1 дек. 2021 г.) / Мурман. гос. техн. ун-т. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2022. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM). – С. 87-91.

Долгов, А.В. Новые данные о встречаемости саргана *Belone belone* (Belonidae) в Норвежском, Баренцевом и Белом морях / А.В. Долгов, В.Б. Забавников // Вопросы ихтиологии. – 2021. – Т. 61, № 5. – С. 612-615.

Долгов, А.В. Новые данные о распространении парусного ската *Raja lintea* в Норвежском и Баренцевом морях / А.В. Долгов, Т.М. Игашов // Вопр. ихтиологии. – 2001. – Т. 41, № 2. – С. 270-273.

Русяев, С.М. Случаи поимок змеевидной иглы-рыбы *Entelurus aequoreus* (Syngnathiformes, Syngnathidae) в Баренцевом и Гренландском морях / С.М. Русяев, А.В. Долгов, О.В. Карамушко // Вопр. ихтиологии. – 2007. – Т. 47, № 4. – С. 574-576.

Русяев, С.М. Новые данные о распространении морского петуха *Eutrigla gurnardus* (Triglidae) в Баренцевом море / С.М. Русяев, А.В. Шацкий // Вопр. ихтиологии. – 2001. – Т. 41, № 2. – С. 265-267.

Трофимов, А.Г. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека / А.Г. Трофимов, А.Л. Карсаков, В.А. Ившин // Труды ВНИРО. – 2018. – Т. 173. – С. 79-91.

Atlas of the Barents Sea fishes / R. Wienerroither, E. Johannesen, H. Langoy [et al.]; IMR, PINRO. – Bergen: IMR, 2011. – no. 1/2011. – 272 p. – (IMR/PINRO Joint Report Series, ISSN 1502-8828).

Atlas of the Barents Sea fishes based on the winter survey / R. Wienerroither, E. Johannesen, A.V. Dolgov [et al.]; IMR, PINRO. – Bergen: IMR, 2013. – no. 2/2013. – 220 p. – (IMR/PINRO Joint Report Series, ISSN 1502-8828).

Byrkjedal, I. Greenland argentine, *Nansenia groenlandica* (Reinhardt, 1840), recorded from the Barents Sea / I. Byrkjedal, S. Lemvig // Fauna. – 2002. – Vol. 55, № 2. – P. 57-59.

Dolgov, A.V. Status of skate populations in the Barents Sea in the recent warm period / A.V. Dolgov, D.V. Prozorkevich // Journal of Ichthyology. – 2022. – Vol. 62, № 7. – P. 1312-1331.

Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic / M. Fossheim, R. Primicerio, E. Johannesen [et al.] // Nature climate change. – 2015. – Vol. 5, Iss. 7. – P. 673-677. – DOI 10.1038/NCLIMATE2647.

Svendsen, F.M. First record of a synphobranchid eel in the Arctic: *Diastobranchus capensis* caught near Spitsbergen / F.M. Svendsen, G. Langelle, I. Byrkjedal // Cybium. – 2011. – Vol. 35, № 3. – P. 255-256.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ НА РАЗРЕЗЕ «КОЛЬСКИЙ МЕРИДИАН» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В.А. Ившин, М.Ю. Анциферов

*Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
г. Мурманск*

Аннотация. Проведена классификация полей вертикального распределения температуры на основе ряда статистических характеристик и аномалий температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» методом к-средних. Выделено пять отдельных классов, по которым проводилось машинное обучение самостоятельного определения принадлежности изображения распределения к тому или иному классу. Наилучшие результаты описания классификации достигнуты с использованием логистической регрессии, где точность составила 87,2 % по обучающей и 89,3 % по тестовой выборкам.

Ключевые слова: температура воды, разрез «Кольский меридиан», кластерный анализ, машинное обучение, логистическая регрессия.

ВВЕДЕНИЕ

Ряд наблюдений на океанографическом разрезе «Кольский меридиан» является одним из самых длинных и регулярных в мире (Терещенко, 1997; Карсаков, 2009). В настоящее время наблюдения на разрезе в основном применяются в виде рядов среднемесячных значений температуры и солености, осредненных по слоям и ветвям течений. С одной стороны, такое традиционное представление информации достаточно универсально, что позволяет ученым разных стран широко использовать эти ряды в качестве индикаторов и предикторов глобальных процессов, происходящих в Мировом океане, с другой – интегральные характеристики могут маскировать определенные локальные особенности распределения океанографических характеристик на разрезе. Визуальный же анализ большого количества графиков сталкивается с некоторыми трудностями восприятия и неизбежной субъективностью такого анализа. Создание модели на методах машинного обучения, применяемой к анализу распределения температуры на разрезе, позволит выделить и учесть трудно определяемые особенности ее распределения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными данными для проведения исследований послужили материалы наблюдений на разрезе «Кольский меридиан», собранные с 1900

по 2018 г. К анализу привлекались только полные серии наблюдений, выполненные на всех десяти стандартных станциях разреза от поверхности до дна в координатах между $69^{\circ}30'$ и $74^{\circ}00'$ с.ш. (с шагом $30'$) вдоль $33^{\circ}30'$ в.д. Общее количество анализируемых случаев выполнения разреза составило 751 раз в разные месяцы года (рис. 1).

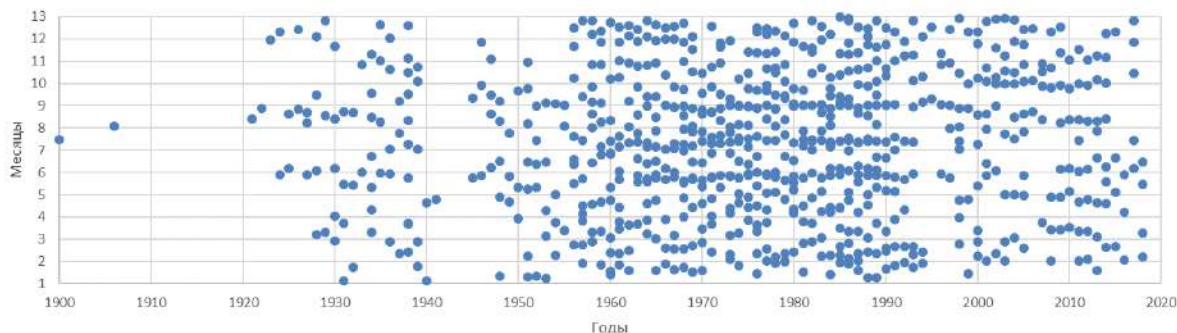


Рис. 1. Наблюдения на разрезе «Кольский меридиан», используемые в работе

Анализ термических условий на разрезе «Кольский меридиан» базировался на величинах аномалий, рассчитанных на основе среднегодуальных (1900-2008 гг.) значений температуры на стандартных станциях и горизонтах (Карсаков, 2009). Построение полей аномалий температуры воды на разрезе производилось с использованием программы Surfer 13.0 (Surfer, 2024). Расчеты проводились в узлах регулярной сетки с шагом $7,5'$ по горизонтали и 5 м по вертикали. Для ослабления влияния на изменчивость вертикальных полей внешних факторов (солнечная радиация, ветровые и ледовые условия, материковый сток и прочее) к рассмотрению принимались вертикальные поля от горизонта 50 м до дна.

Для каждого построенного поля рассчитывались статистические характеристики распределения аномалий температуры воды на разрезе: среднее, минимум, максимум, стандартное отклонение, медиана, диапазон изменчивости, 25 % квантиль, 75 % квантиль, коэффициент асимметрии. Дополнительно для каждого поля в узлах регулярной сетки определялась принадлежность нормированной по стандартному отклонению (δ) аномалии (a) к пяти градациям:

- предельно низкая ($a < -1,5\delta$);
- низкая ($-1,5\delta < a < -0,5\delta$);
- нормальная ($-0,5\delta < a < 0,5\delta$);
- высокая ($0,5\delta < a < 1,5\delta$);
- предельно высокая ($> 1,5\delta$),

где рассчитанная величина стандартного отклонения по всем наблюдаемым значениям на разрезах составила $0,742$ °С. Далее подсчитывалось количество узлов сетки в одноименных группах на каждом разрезе.

Рассчитанные статистические характеристики и нормированные аномалии являлись переменными для проведения кластерного анализа с нормализацией по среднему значению ($\mu = 0$).

Классификация, обучение моделей, визуализация и анализ производились в свободно распространяемой системе визуального программирования с открытым кодом Orange 3.36 (Orange, 2023), существенное достоинство которой – наличие значительного количества готовых модулей по работе с большими массивами данных.

Для кластеризации данных на основе их статистических характеристик и нормированных аномалий использовались два метода: иерархическая кластеризация и метод *k*-средних, из которых в дальнейшем выбирался один, показавший наилучшие результаты. Разделение рассматриваемых параметров производилось на пять кластеров. Оценка качества кластеризации основывалась на значениях силуэта кластера, характеризующего величину согласованности экземпляров внутри кластерного пространства (All I See..., 2024).

В соответствии с классификацией проводилось машинное обучение модели самостоятельного распознавания принадлежности изображений вертикального распределения температуры к тому или иному классу. Работа с изображениями (в нашем случае – вертикальными полями) подразумевает перевод графического материала в ряд цифровых переменных, понятных вычислительным машинам. Преобразование графики в векторы числовых признаков осуществлялось с использованием локальной сверточной нейронной сети SqueezeNet (2017), обученной на наборе изображений с сервера ImageNet. Для обучения тестировалось несколько моделей-классификаторов (нейронная сеть, логистическая регрессия, случайный лес, метод ближайшего соседа), из которых по оценкам работы выбиралась лучшая.

Качество работы классификатора определялось по численным величинам тестовых метрик. Самым простым показателем качества классификации является отношение правильно классифицированных объектов к общему их количеству, называемое точностью (*Accuracy*):

$$Accuracy = \frac{P}{N}, \quad (1)$$

где P – количество правильных решений;
 N – размер выборки.

Точностью в пределах класса (*Precision*) называют отношение правильно классифицированных объектов к общему числу объектов, которые классификатор отнес к этому классу:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}, \quad (2)$$

где TP – истинно положительные решения;
 FP – ложноположительные решения.

Полнота (*Recall*) определяется как доля найденных классификатором объектов некоторого класса относительно всех его объектов в тестовом наборе:

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (3)$$

где *FN* – ложноотрицательные решения.

Для реальных данных и классификаторов часто нельзя одновременно добиться и высокой точности, и полноты. Для этого ввели производную характеристику, которую назвали *F*-мера (Герасименко, 2017), – это гармоническое среднее между точностью и полнотой, представленное формулой:

$$F\text{-мера} = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}. \quad (4)$$

Наглядным способом оценки проведенной классификации является анализ матрицы неточностей размерностью $n \times n$, где n – число классов. Строки матрицы представляют собой классы исходной классификации, а столбцы – классы, полученные при работе исследуемого классификатора, при этом значения в ячейках соответствуют количеству произошедших событий (табл. 1).

Таблица 1

Идеализированное представление матрицы неточностей

Факт	Расчет			
	C1	C2	C3	C4
C1	22	6	0	0
C2	4	17	3	0
C3	0	1	32	0
C4	0	0	0	23

Значения на главной диагонали – истинно положительные решения, т.е. количество правильно определенных классификатором классов. Сумма значений в столбце, не включающая в расчет ячейку главной диагонали, является ложноположительной величиной, а сумма по строке (также без учета ячейки главной диагонали) – ложноотрицательной. Чем меньше сумма значений за пределами главной диагонали, тем полнее классификатор описал исходную классификацию. В конкретном случае (см. табл. 1) наилучшим образом описан класс C4, а C2 – плохо.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для распределения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» характерны существенные межгодовые и сезонные изменения. В достаточном количестве случаев ее аномалии на отдельных участках разреза могут иметь разные знаки. Кроме того, существует значительная временная неоднородность в проведении измерений на разрезе за более чем

вековую историю наблюдений (120 лет океанографических..., 2022). Все это вносит определенные трудности при проведении классификации полей вертикального распределения температуры воды.

На начальном этапе было необходимо провести кластерный анализ для рассматриваемых разрезов в целях их разделения на отдельные классы с характерными признаками внутри групп. В качестве исходных переменных использовались наборы статистических параметров (среднее, минимум, максимум и т.д.), а также нормированные аномалии, рассчитанные для 751 случая выполнения разреза. При проведении кластерного анализа были рассмотрены два метода: иерархическая кластеризация и метод к-средних (рис. 2А).

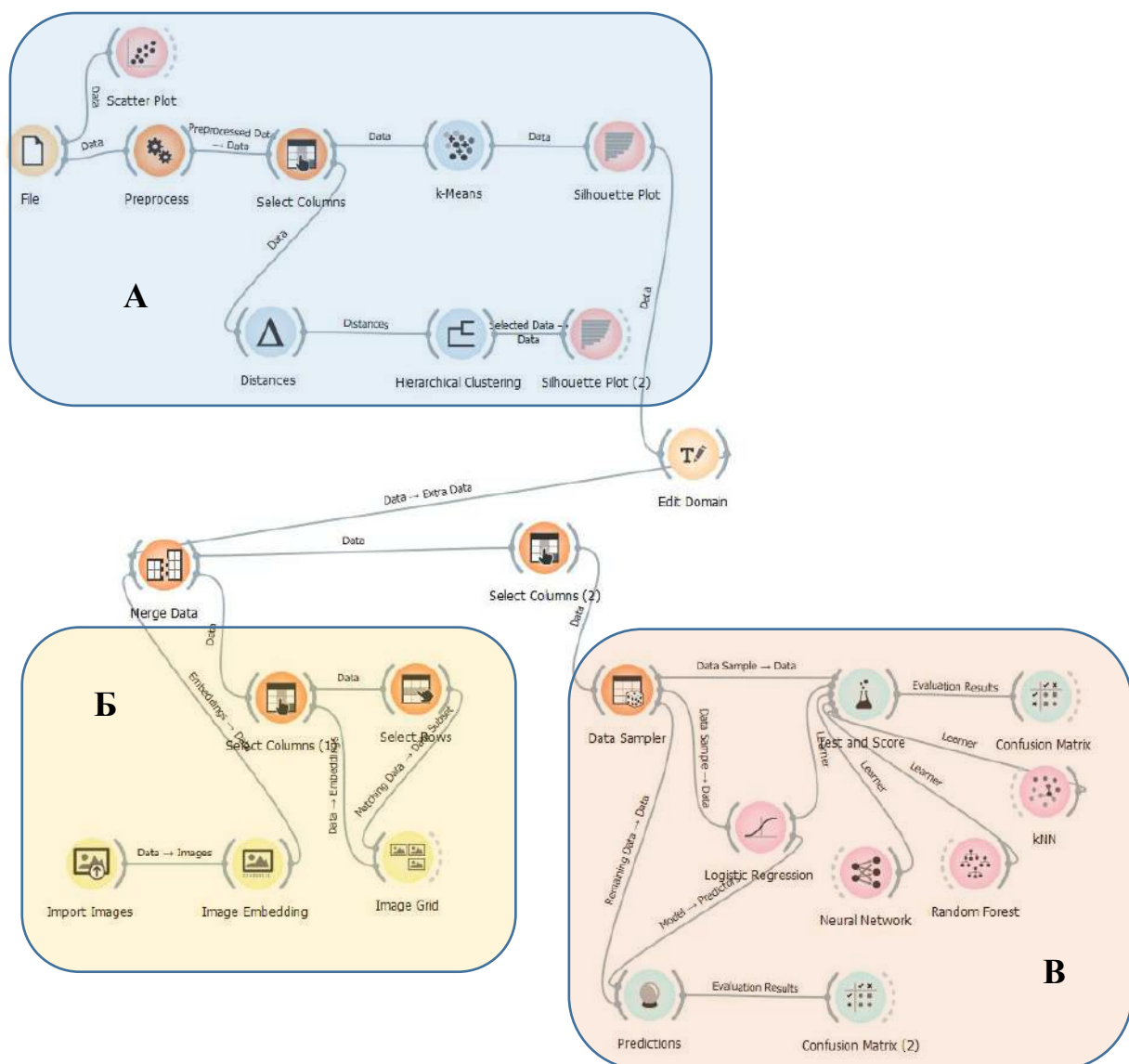


Рис. 2. Общая схема классификации и обучения модели: А – блок кластерного анализа; Б – загрузка и внедрение изображений; В – блок машинного обучения

Методы кластерного анализа разделили данные на пять групп в пространстве рассматриваемых переменных, где в кластере С1 были сосредоточены распределения с предельно низкими значениями аномалии температуры, в С2 – с низкими, в С3 – со средними, в С4 – с высокими, а в С5 – с предельно высокими (табл. 2).

Таблица 2

Результаты кластерного анализа

Кластер	Иерархическая кластеризация			Метод к-средних		
	Силуэт	Средняя аномалия, °С	Кол-во выполнений разреза	Силуэт	Средняя аномалия, °С	Кол-во выполнений разреза
C1	0,474	-1,11	52	0,472	-1,14	48
C2	0,426	-0,48	231	0,533	-0,52	211
C3	0,406	0,02	194	0,495	0,05	268
C4	0,543	0,34	88	0,510	0,58	195
C5	0,174	0,71	186	0,489	1,14	29

В целом более высокие значения силуэтов кластеров получены методом к-средних. Иерархическая кластеризация слабо выделила кластер С5 (силуэт 0,174), что отразилось на вхождении в группу большого (186 случаев) количества изображений. В соответствии с этим кластеризация методом к-средних была принята к дальнейшему рассмотрению, а результат ее работы представлен на рис. 3.

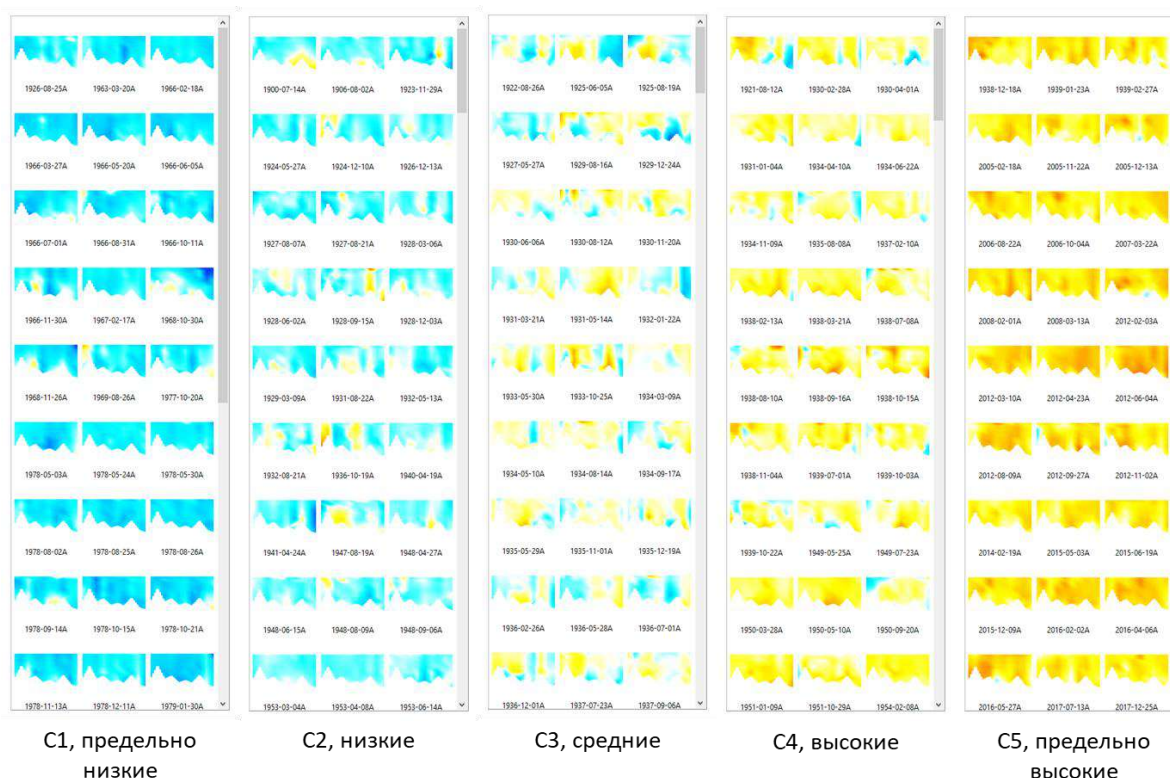


Рис. 3. Фрагмент результатов кластерного анализа методом к-средних

Следующий этап включал в себя загрузку изображений распределения аномалий на разрезе и их внедрение (разложение на 1000 числовых переменных сверточной сетью SqueezeNet) для проведения процесса обучения модели (см. рис. 2Б). Сетка изображений (модуль Image Grid) в пространстве используемых переменных отображает их по мере сходства, располагая наиболее близкие по содержанию рядом друг с другом (рис. 4).



Рис. 4. Сетка изображений распределения аномалий температуры на разрезе

На рисунке достаточно четко просматривается организованная структура: с левой стороны располагаются распределения с высокими значениями аномалий, с правой – с низкими, при этом отмечается относительно плавный переход распределений от предельно высоких к предельно низким значениям. Малоконтрастные участки рисунка формируются распределениями, имеющими относительно низкий

внутрикластерный силуэт (менее 0,25 по методу к-средних) и находящимися на границах кластеров.

После объединения данных внедрения изображений с результатами кластерного анализа (в модуле Merge Data, см. рис. 2) осуществлялся этап машинного обучения данной классификации на переменных, полученных при разложении изображений. Перед началом обучения модели в модуле Data Sampler (см. рис. 2B) было проведено разделение исходного ряда (751 случай выполнения разреза) на две выборки: обучающую (564 распределения, или 75 % от общего количества) и тестовую (187 распределений, или 25 % от общего количества). По результатам работы четырех моделей-классификаторов на данных обучающей выборки было выявлено, что наилучшие результаты описания классификации достигаются с использованием логистической регрессии (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика качества описания классификации

Модель	<i>Accuracy</i>	<i>F-мера</i>	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>
Логистическая регрессия	0,872	0,872	0,873	0,872
Нейронная сеть	0,869	0,868	0,868	0,869
Случайный лес	0,846	0,836	0,853	0,846
Метод ближайшего соседа	0,858	0,858	0,857	0,858

Из данных табл. 3 следует, что логистическая регрессия с точностью 87,2 % верно определяет принадлежность изображения вертикальных полей на разрезе к тому или иному кластеру. Наиболее точные (92,3 %) результаты в определении принадлежности к классу получены для первого кластера (предельно низкие значения аномалий) (табл. 4).

Таблица 4

Матрица неточностей по обучающей выборке

Факт	Модель, %					Σ
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	92,3	4,7	0,0	0,0	0,0	32
C2	7,7	89,9	5,2	0,0	0,0	165
C3	0,0	5,3	86,7	10,7	0,0	206
C4	0,0	0,0	8,1	85,7	26,3	142
C5	0,0	0,0	0,0	3,6	73,7	19
Σ	26	169	210	140	19	564

На тестовых данных обученная модель также продемонстрировала хорошие результаты работы с точностью верных результатов 89,3 %, а наилучшим образом (92,9 %) был описан второй кластер (низкие значения аномалий) (табл. 5).

Матрица неточностей по тестовой выборке

Факт	Модель, %					Σ
	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	77,8	4,8	0,0	0,0	0,0	16
C2	22,2	92,9	4,7	0,0	0,0	46
C3	0,0	2,4	90,6	5,5	0,0	62
C4	0,0	0,0	4,7	89,1	12,5	53
C5	0,0	0,0	0,0	5,5	87,5	10
Σ	18	42	64	55	8	187

Полученная модель при разных выборках (обучающей и тестовой) достаточно четко соотносит принадлежность изображения к исходному классу, а некоторые существующие ошибки приходятся только на смежные классы (см. табл. 4, 5). Некоторая нестабильность оценок для кластеров C1 и C5 вызывается небольшим количеством изображений для анализа, приходящимся на эти группы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» был проведен кластерный анализ вертикальных распределений аномалий температуры воды в плоскости разреза по их нормированной величине, а также по набору статистических характеристик. Было протестировано два метода: иерархическая кластеризация и метод к-средних. Анализ полученных результатов показал, что метод к-средних с кластеризацией исходных данных справился лучше.

Из четырех рассматриваемых моделей-классификаторов при описании выделенной классификации наилучшим образом проявила себя логистическая регрессия, которая с достаточной достоверностью (около 90 %) может самостоятельно определять принадлежность изображения распределения аномалий температуры на разрезе к тому или иному классу. В отдельных классах будут сгруппированы изображения с характерными распределениями аномалий. Выделение таких группировок позволит получить дополнительную информацию об изменчивости вертикальных полей на разрезе. По данным расчетов можно проследить продолжительность существования однотипных распределений аномалий, их трансформацию и время перехода в другой класс; произвести поиск аналогов распределения, основанный не на числовых значениях, а на схожести графического изображения; отдельно рассмотреть поля с низкими внутрикластерными значениями, которые представляют собой редкие, уникальные распределения и исследовать возможную природу их возникновения. Обученная модель значительно экономит время

исследователя, а также может служить дополнительным инструментарием в изучении особенностей изменчивости вертикальных полей на разрезе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Герасименко, Е.М. Интеллектуальный анализ данных. Алгоритмы Data Mining / Е.М. Герасименко. – Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2017. – 84 с.

Карсаков, А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900-2008 гг. / А.Л. Карсаков. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. – 139 с.

120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, М.Ю. Анциферов [и др.] / Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича). – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2022. – 145 с.

Терещенко, В.В. Сезонные и межгодовые изменения температуры и солености воды основных течений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море / В.В. Терещенко. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1997. – 71 с.

All I See is Silhouette. – Текст: электронный/University of Ljubljana. – URL: <https://orangedatamining.com/blog/all-i-see-is-silhouette/> (дата обращения 29.01.2024).

Surfer. Explore the Depths of Your Data. – Текст: электронный / Golden Software. – URL: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer/> (дата обращения 29.01.2024).

Orange. Data Mining Fruitful and Fun. – Текст: электронный / University of Ljubljana. – URL: <https://orangedatamining.com> (дата обращения 29.01.2024).

SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5MB model size / F. Iandola, S. Han, M. Moskewicz [et al.]. – Under review as a conference paper at ICLR 2017. – DOI 10.48550/arXiv.1602.07360 (дата обращения 29.01.2024).

ИДЕНТИФИКАЦИЯ БАКТЕРИЙ – ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ДЕСТРУКТОРОВ ПЛАСТИКА ИЗ СОСТАВА ОБРАСТАНИЙ ПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБНАРУЖЕННЫХ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БАРЕНЦЕВА И БЕЛОГО МОРЕЙ

О.В. Ильина¹, Д.В. Коваленко¹, В.В. Ильинский¹,
М.С. Полякова², А.А. Поярков¹

¹Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова (МГУ), г. Москва

²Байкальский музей СО РАН, Иркутская обл., р.п. Листвянка

Аннотация. Из состава биологических обрастаний пластиковых материалов, экспонированных или собранных в прибрежной зоне Баренцева и Белого морей, выделено несколько бактериальных культур, в стандартных тестах, проявляющих способность к селективному росту в присутствии соответствующего пластика. Из их состава идентифицированы четыре культуры, отнесенные к родам *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas* и *Salinibacterium*. Данные культуры рассматриваются как потенциальные деструкторы пластика

Ключевые слова: пластиковое загрязнение, Баренцево море, биодеструкция пластика.

ВВЕДЕНИЕ

Синтетические полимерные материалы, характеризующиеся собирательным термином «пластик», являются типичными ксенобиотиками. Из-за высоких темпов производства пластмасс и несовершенной системы обращения с твердыми бытовыми отходами присутствие пластикового загрязнения в естественных природных средах становится повсеместным явлением. Особое внимание привлекает загрязнение пластиком Мирового океана: в силу особенностей его динамической структуры частицы пластика способны распространяться с морскими течениями на значительные расстояния и поступать в самые удаленные акватории, включая Арктическую зону (van Sebille, England, Froyland, 2012).

В силу высоких темпов накопления пластика в экосистеме, значительно превышающих ее способность к самоочищению, пластик оказывается стрессирующим фактором для многих многоклеточных организмов. В то же время микроорганизмы, благодаря высоким темпам биохимической адаптации, могут приобретать способность использовать его в качестве источника углерода и энергии (Plastic biodegradation: frontline..., 2021).

Молекулы синтетических полимеров обладают высокой химической стабильностью, что затрудняет их окисление с помощью биологических ферментов. Глобальная привлекательность пластика в качестве пищевого субстрата может быть оценена как низкая, тем не менее в литературе описаны случаи, когда водные и почвенные микроорганизмы были способны к деструкции и усвоению пластика наравне с другими субстратами (Plastic biodegradation: frontline..., 2021) или использовали пластик в качестве основного источника углерода и энергии (A bacterium that..., 2016).

Биологическое окисление полимеров микроорганизмами интересно с теоретической точки зрения, поскольку описывает фактически уникальный эволюционный этап: взаимодействие живых организмов с новой формой ксенобиотиков, получивших массовое распространение в течение короткого промежутка времени. Микроорганизмы, способные к деструкции пластика, представляют также практический интерес в биотехнологических решениях, так как биокомпостирование пластика потенциально имеет экологические и экономические преимущества перед другими способами обращения с пластиковыми отходами, такими как инсинерация или захоронение (Danso, Chow, Streit, 2019).

В литературе описаны микроорганизмы, способные к избирательной деструкции определенных видов пластмасс (Biodegradation of waste..., 2019; Biodegradation of low..., 2016). В процессе биодеструкции они используют сложный комплекс ферментов (Биокоррозия синтетических пластмасс..., 2020).

Биологическое окисление пластика в естественных условиях, по-видимому, не относится к массовым явлениям. В то же время пластик, попадающий в водную или почвенную среду, сразу же начинает использоваться организмами, ведущими прикрепленный образ жизни, в качестве субстрата для формирования биообрастания. Бактерии, оседая на поверхности пластика, образуют биопленку и этим создают благоприятные условия для последующего прикрепления более сложных жизненных форм (рис. 1). Особенно хорошо изучены процессы обрастания пластика в водной среде, где на его поверхности образуются сложные биоценозы, состоящие из бактерий, грибов, водорослей, беспозвоночных и прочих гидробионтов (Plastic in the..., 2021). Они являются продуцентами разнообразных органических соединений, поэтому в составе биообрастаний могут преобладать организмы, не нуждающиеся в пластике в качестве источника углерода и энергии. Это создает определенную сложность при поиске микроорганизмов – деструкторов пластика, поскольку бактерии, выделенные из состава обрастаний, могут не обладать подобными функциями.

Согласно данным современных исследований, наиболее высокие показатели пластикового загрязнения в Арктическом регионе наблюдаются в Баренцевом море, принимающем флотирующий пластик как в составе Северо-Атлантического и Норвежского течений, так и в виде отходов активного судоходства (The Arctic Ocean..., 2017). Поэтому экосистема Баренцева моря может рассматриваться как среда, в которой способны развиваться бактерии, потенциально способные к деструкции пластика.

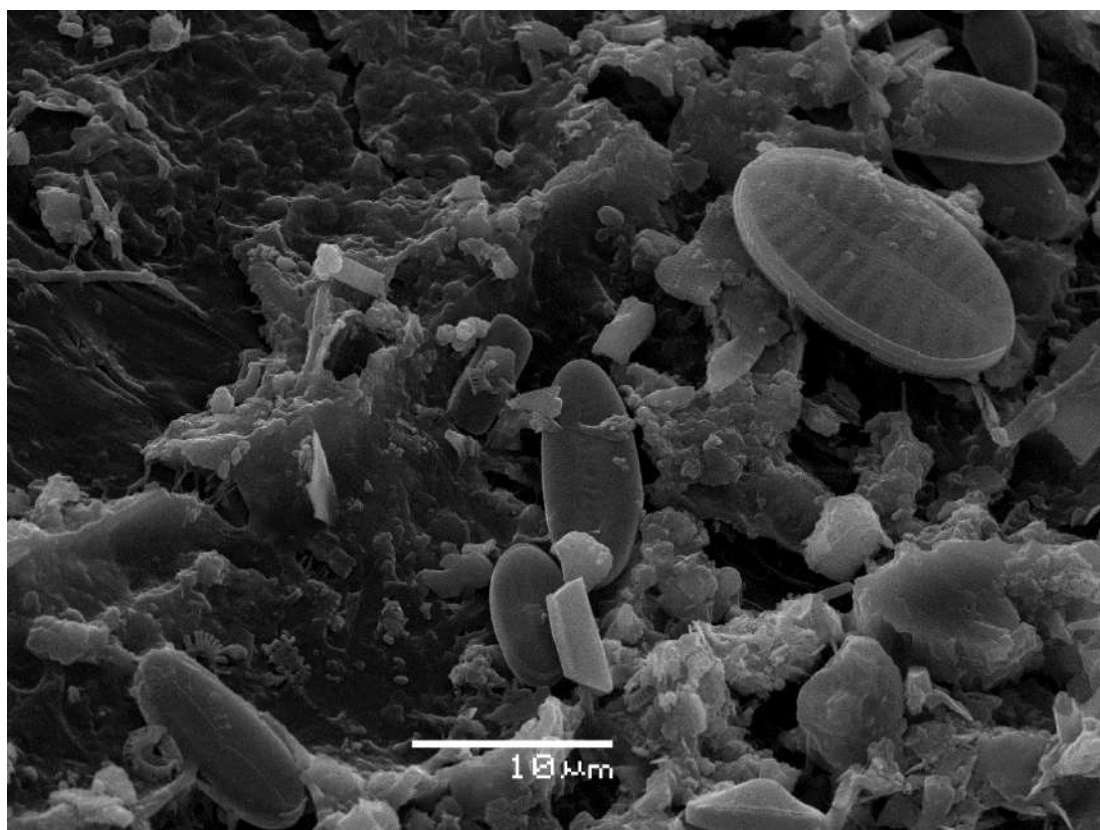


Рис. 1. Диатомовые микроводоросли и матрикс микроорганизмов-обработателей на поверхности полипропиленового каната, заякоренного на глубине 16 м в губе Зеленецкая (пос. Дальние Зеленцы, Баренцево море). Электронная микроскопия

В настоящей работе представлены результаты первого этапа изучения процессов бактериальной деструкции пластиковых материалов в естественных условиях, который включает выделение микроорганизмов – потенциальных деструкторов пластика.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бактериальные культуры выделяли из морских донных отложений, а также из обрастаний пластиковых материалов различного происхождения:

собранных на берегу в прибрежной зоне моря; извлеченных из водной толщи после экспонирования на специальных заякоренных конструкциях. Сбор материалов и первичный посев микроорганизмов осуществляли в полевых условиях в ходе летних экспедиционных сезонов 2021-2023 гг. в прибрежной зоне Баренцева и Белого морей. Места сбора пластиковых предметов с обрастаниями и экспонирования образцов пластика в морской воде находились вблизи пос. Дальние Зеленцы и на территории Кандалакшского государственного природного заповедника (Мурманская область, губа Подпахта). Для выделения бактерий использовали селективные минеральные среды, содержащие образцы полимеров наиболее распространенных типов (порошок полиэтилена, порошок полиэтилен терефталата (ПЭТ), волокна нетканого ПЭТ-материала «холлофайбер», эмульсию полистирола). Одна из культур была извлечена и идентифицирована без пересевов непосредственно из пленки, образованной ею на поверхности образца поливинилхлорида (ПВХ).

Для посева на селективную жидкую минеральную среду ММ (Urbanek, Rymowicz, Mironczuk, 2018), содержащую в качестве единственного источника углерода порошок или эмульсию соответствующего пластика (1 г/л), использовали смывы с поверхности образцов биологических обрастаний пластика или донных отложений. Эти смывы в количестве 4 мл помещали в конические колбы с минеральной средой с добавлением соответствующего пластика в концентрации 1 г/л и инкубировали на качалке в течение 7 сут. После инкубирования суспензию бактерий в количестве 500 мкл переносили из колб в чашки Петри на агаризованную минеральную среду ММ с добавлением соответствующего полимера.

Из выросших на плотной среде колоний (в одном случае – прямо из состава бактериального обрастания, образованного на поверхности пластика) выделяли ДНК с помощью универсального набора для выделения нуклеиновых кислот (ООО «Биофизические технологии», Россия). Таксономическую принадлежность выделенных штаммов определяли посредством секвенирования варибельного участка гена 16S рРНК, полученный сиквенс сравнивали с базами данных нуклеотидных последовательностей GeneBank (Living in a..., 2022).

Тестирование способности выделенных культур к росту на пластике производили посредством пересева культуры-кандидата на два варианта сред: среду ММ без источника углерода и среду ММ с добавлением соответствующего полимера в качестве единственного источника углерода. За положительный результат тестирования принимали способность культуры к росту на среде с добавлением пластика при отсутствии роста на среде без пластика.

Визуальный контроль состава обрастаний производили на сканирующем электронном микроскопе JEOL, JSM-6380LA в центре коллективного пользования «Электронная микроскопия в науках о жизни» МГУ им. М.В. Ломоносова (УНУ «Трехмерная электронная микроскопия и спектроскопия»).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы из обрастаний пластика, сформированных в средах водной морской и воздушной, а также из донных отложений было выделено 16 культур бактерий (см. таблицу). Только в одном случае бактериальная пленка для идентификации ее микробного состава была извлечена непосредственно с наружной поверхности ПВХ-лодки, находившейся в воздушной среде на суше вблизи береговой линии Белого моря, на территории Республики Карелия (рис. 2).

Таким образом, непосредственно из биопленки, образованной на поверхности ПВХ, была идентифицирована одна культура, на среде с добавлением полистирола колонии образовали три культуры, на среде с добавлением полиэтилена – две культуры, на среде с добавлением ПЭТ – десять культур, из них – шесть дали рост на среде с добавлением порошка ПЭТ и четыре – на среде, содержащей нетканый материал холлофайбер.

ММ-тест был проведен для восьми из шестнадцати культур, из них четыре показали положительный результат. Этот тест был использован в качестве первого этапа идентификации деструкторов пластика. Он позволяет исключить штаммы, способные развиваться за счет использования агара или каких-либо случайных примесей органических соединений, присутствующих в минеральной среде. Следует также учесть, что ММ-тест в некоторых случаях может дать ложноотрицательный результат, например при тестировании некультивируемых бактерий, плохо или совсем не способных к росту на традиционных питательных средах.

Один такой некультивируемый штамм бактерий (Bm23PVC1, см. таблицу) был обнаружен нами на поверхности ПВХ-материала, из которого была сделана лодка, длительное время находившаяся на суше. Штамм был идентифицирован как *Stenotrophomonas* sp. Развитие этой бактерии на пластике сопровождалось признаками эрозии ПВХ, эти места имели характерную структуру, отличную от структуры поверхности интактного ПВХ, а также от тех изменений, которые происходят при фотоокислении ПВХ (см. рис. 2).

Список идентифицированных культур бактерий, выделенных из морских и пресноводных обрастаний различных видов пластика, из морских донных отложений и с поверхности ПВХ-лодки, а также результаты проверки их способности к деградации пластика при первом и повторном посевах на среду ММ

Название культуры (штамма)	Таксономическая принадлежность (родовой состав)	Тип полимера	Рост культуры на селективной среде ММ с добавлением полимера при первом посевах*	Результат ММ-теста, проведенного при повторном посевах культуры**	Признаки деградации пластика***
<i>Культуры, выделенные из обрастаний пластиковых предметов, обнаруженных на литорали</i>					
Bm21PS1	<i>Tardiphaga</i>	Полистирол	+	x	x
Bm22PS1	<i>Pseudomonas</i>	То же	+	+	x
Bm21PE1	<i>Persicetalea</i>	Полиэтилен	+	x	x
Bm22PE1	<i>Pseudoalteromonas</i>	То же	+	-	x
Bm21PET4	<i>Persicetalea</i>	ПЭТ	+	-	x
Bm21PET2	<i>Salinibacterium</i>	То же	+	+	x
Bm21PET1	<i>Rhodococcus</i>	»	+	+	x
Bm21PET3	<i>Stenotrophomonas</i>	»	+	+	x
Bm22PET1	<i>Rhodopirellula</i>	»	+	x	x
<i>Культуры, выделенные из морских донных отложений</i>					
Bm22PS2	<i>Pseudomonas</i>	Полистирол	+	+	x
Bm22PET2	<i>Flavobacterium</i>	ПЭТ	+	x	x
Bm22HfmS1	<i>Rhodopirellula</i>	ПЭТ (холофайбер)	+	x	x
Bm22HfmS2	<i>Stenotrophomonas</i>	То же	+	x	+
<i>Культуры, выделенные из обрастаний пластика, экспонированного в морской воде</i>					
Bm22Hf4-2	<i>Rhodopirellula</i>	ПЭТ (холофайбер)	+	x	x
Bm22Hf4-1	<i>Marimonas</i>	То же	+	+	x
<i>Культура из бактериальной пленки, образованной на поверхности пластика в воздушной среде</i>					
Bm23PVC1	<i>Stenotrophomonas</i>	ПВХ	-	+	+

*Способность культуры к образованию колоний на твердой среде ММ с добавлением соответствующего полимера при первом посевах: (+) – присутствует, (-) – отсутствует.

**Результат ММ-теста, проведенного при повторном посевах: (+) – положительный, (-) – отрицательный, (x) – тест не проводили.

***Наличие признаков деградации полимера в зоне развития бактерий: (+) – присутствуют, (x) – оценку не производили.

Выделенные нами шестнадцать культур были отнесены к десяти родам: *Flavobacterium* sp. (развивается на среде с добавлением ПЭТ); *Marimonas* sp. (способна к росту на среде с добавлением холлофайбера); *Persicetalea* spp. (две культуры, одна из них развивается на среде с добавлением ПЭТ, вторая – полиэтилена); *Pseudoalteromonas* sp. (дала рост на среде с добавлением полиэтилена); *Pseudomonas* spp. (две культуры различной морфологии, обе способны к росту на среде с добавлением полистирола); *Rhodococcus* sp. (одна культура, развивается на среде с добавлением ПЭТ), *Rhodopirellula* spp. (три культуры различной морфологии, две способны к росту на среде с добавлением холлофайбера и одна – на среде с ПЭТ); *Salinibacterium* sp. (развивается на среде с добавлением ПЭТ); *Stenotrophomonas* sp. (две культуры; одна из них развивается на среде с добавлением ПЭТ, вторая образует биопленку на поверхности ПВХ в воздушной среде).

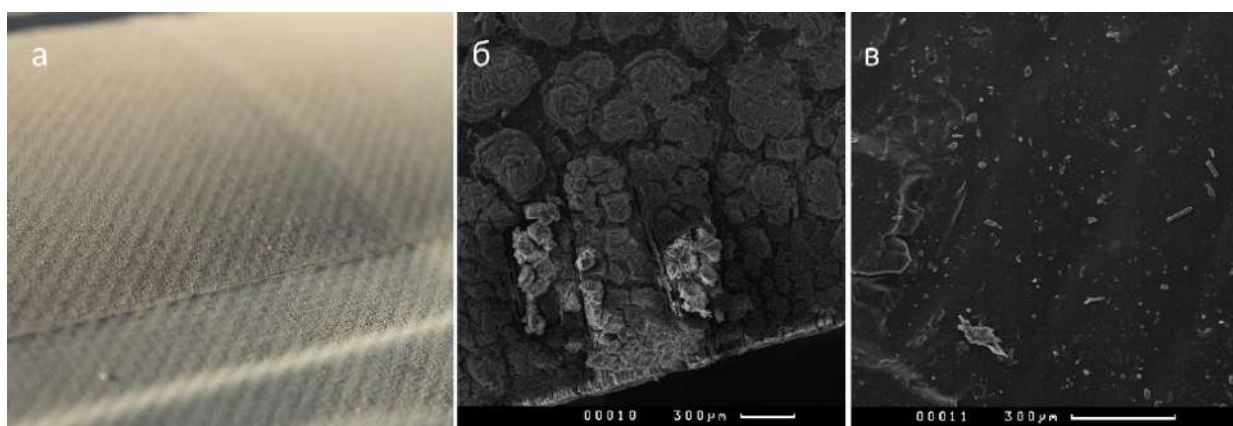


Рис. 2. Визуальные признаки эрозии на поверхности ПВХ в зоне развития штамма бактерий Vm23PVC1 (*Stenotrophomonas* sp.): а – общий вид поверхности ПВХ (без увеличения); б – поверхность ПВХ в зоне развития бактерий; в – интактная поверхность материала ПВХ. Электронная микроскопия

Положительный ММ-тест был получен только для четырех культур: Vm22PS1 и Vm22PS2 (*Pseudomonas* spp.), Vm21PET2 (*Salinibacterium* sp.) и Vm21PET1 (*Rhodococcus* sp.). Эти культуры, а также Vm23PVC1 (*Stenotrophomonas* sp.) отмечены в качестве наиболее перспективных кандидатов на роль деструкторов пластика.

Способность к деструкции пластика была ранее обнаружена у отдельных представителей родов *Pseudomonas* (Pseudomonadaceae), *Rhodococcus* (Nocardiaceae) и *Stenotrophomonas* (Xanthomonadaceae) (Biodegradation of low..., 2016; Plastic in the..., 2021). Из имеющихся в литературе данных следует, что для представителей этих родов характерно также наличие способности катаболизировать широкий спектр различных

ксенобиотиков и природных полимеров, что делает вероятной их способность к биодegradации новых полимерных субстратов.

Интересно обнаружение в составе выделенных и идентифицированных культур микроорганизмов, относящихся к эволюционно продвинутому роду *Rhodopirellula* (Planctomycetaceae), а также азотфиксирующих бактерий *Tardiphaga* (Nitrobacteraceae) и двух родов малоизученных морских бактерий – *Salinibacterium* (Microbacteriaceae) и *Persicetalea* (Flexibacteraceae). Метаболические особенности этих микроорганизмов еще предстоит изучить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из состава биологических обрастаний пластиковых материалов выделены бактериальные культуры, способные к росту на нескольких видах пластиковых материалов в водных экосистемах и лишь одна – практически в воздушной среде, хотя и при наличии легкого периодического увлажнения. Последняя культура уникальна по своей способности к использованию ПВХ в качестве единственного источника углерода и энергии, не растет на обычных питательных средах и потому представляет особый интерес для дальнейшего всестороннего исследования. Четыре остальные культуры, относящиеся к родам *Pseudomonas*, *Rhodococcus* и *Salinibacterium*, показали избирательную способность к росту на селективной минеральной среде с добавлением соответствующего пластикового субстрата. Их дальнейшее исследование будет включать изучение молекулярных механизмов взаимодействия микроорганизмов с пластиковыми субстратами. Наиболее эффективные деструкторы пластика впоследствии могут использоваться для биотехнологических решений по биокомпостированию пластиковых отходов.

Благодарность

Авторы выражают благодарность администрации ФГБУ «Кандалакшский государственный природный заповедник» за содействие в проведении полевого сезона.

Работы по выделению, культивированию и идентификации микроорганизмов выполнены при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-44, электронно-микроскопические исследования проведены в рамках Государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова (тема № 121032300131-9).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Биокоррозия синтетических пластмасс: механизмы деградации и способы защиты / В.К. Плакунов, А.В. Ганнесен, С.В. Мартьянов [и др.] // Микробиология. – 2020. – Т. 89, № 6. – С. 631-645.

A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate) / S. Yoshida, K. Hiraga, T. Takehana [et al.]. – DOI 10.1126/science.aad6359 // Science. – 2016. – Vol. 351. – P. 1196-1199.

Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) modified with dye sensitized titania and starch blend using *Stenotrophomonas pavanii* / C.T. Mehmood, I.A. Qazi, I. Hashmi [et al.]. – DOI 10.1016/j.ibiod.2016.01.025 // Int. Biodeterior. Biodegrad. – 2016. – Vol. 113. – P. 276-286.

Biodegradation of waste PET: A sustainable solution for dealing with plastic pollution / K. Hiraga, I. Taniguchi, S. Yoshida [et al.]. – DOI 10.15252/embr.201949365 // EMBO Reports. – 2019. – Vol. 20, Iss. 11. – Art. e49365

Danso, D. Plastics: microbial degradation, environmental and biotechnological perspectives / D. Danso, J. Chow, W.R. Streit. – DOI 10.1128/aem.01095-19 // Applied and Environmental Microbiology. – 2019. – Vol. 85, Iss. 19. – Art. e01095-19.

Living in a bottle: Bacteria from sediment-associated Mediterranean waste and potential growth on polyethylene terephthalate / À. Vidal-Verdú, A. Latorre-Pérez, E. Molina-Menor [et al.] // Microbiology Open. – 2022. – Vol. 11, Iss 1. – Art. e1259.

Plastic biodegradation: frontline microbes and their enzymes / A. Amobonye, P. Bhagwat, S. Singh [et al.]. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.143536 // Science of The Total Environment. – 2021. – Vol. 759. – Art. 143536.

Plastic in the aquatic environment: interactions with microorganisms / Ph. Sapozhnikov, A. Salimon, A.M. Korsunsky [et al.]. – DOI 10.1007/978_2021_747 // The Handbook of Environmental Chemistry. – Springer, Cham., 2021. – Vol. 111. – 496 p.

The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation / A. Cózar, E. Martí, C.M. Duarte [et al.]. – DOI 10.1126/sciadv.1600582 // Science Advances. – 2017. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 1-9.

Urbanek, A.K. Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats / A.K. Urbanek, W. Rymowicz, A.M. Mirończuk. – DOI 10.1007/s00253-018-9195-y // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2018. – Vol. 102. – Art. 7669-7678.

Van Sebille, E. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters / E. Van Sebille, M.H. England, G. Froyland. – DOI 10.1088/1748-9326/7/4/044040 // Environmental Research Letters. – 2012. – Vol. 7, Iss. 4. – Art. 044040.

ПРОЯВЛЕНИЕ БОРЕАЛИЗАЦИИ В ИЗМЕНЧИВОСТИ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРИМЕРЕ БАРЕНЦЕВА И БЕРИНГОВА МОРЕЙ

К.К. Кивва¹, А.А. Сумкина^{1,2}

*¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), г. Москва*

*² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ),
г. Москва*

Аннотация. Представлен обзор использования понятия «бореализация» в отношении морских экосистем, а также проанализировано проявление бореализации в таких фенологических параметрах, как сроки очищения акватории ото льда, сроки сезонного перехода от охлаждения к нагреву и начала весеннего «цветения» фитопланктона. Анализ выполнен для Баренцева и Берингова морей как для акваторий с наиболее ярко выраженной бореализацией.

Ключевые слова: фенология, морской лед, тепловой баланс, цветение фитопланктона.

ВВЕДЕНИЕ

Для полноценного раскрытия темы данной работы необходимо определиться с точным значением термина «бореализация». Оказывается, в источниках это понятие определено по-разному, поэтому мы даем краткое обобщение существующей терминологии по этому вопросу и определение, которое устроит широкий круг специалистов от физиков моря до морских биологов и экологов.

Термин «бореализация» на английском языке используется как минимум с 1944 г. (Rubtsov, 1944), но в отношении повышения зимостойкости культивируемых плодовых растений. В экологическом смысле это слово также давно используется в геоботанике, биогеографии и ландшафтоведении применительно к наземным биогеоценозам и ландшафтам. Одно из определений, которое удалось найти, означает, что бореализация – это «переход к экологии типичного северного хвойного леса». Этот термин встречается в русскоязычных работах в таком контексте с 1990-х годов (Истомин, 1998). В морской биологии и океанологии он появился относительно недавно и пока сложно говорить о каком-то его общепринятом определении. Например, в широко известной статье И.В. Полякова с соавторами (Polyakov, Alkire, Bluhm, 2020) под «бореализацией» понимают комплексные изменения климатической системы Арктики, включая ее биологическую компоненту; также сказано,

что это – общий эффект «атлантификации» и «пацификации». Под «атлантификацией» изначально понимали изменения только физических (температурных и ледовых) условий Баренцева моря в связи с изменениями обмена теплом между морем и атмосферой на фоне увеличения адвективного потока тепла с атлантическими водами (Quantifying the influence..., 2012; Oziel, Sirven, Gascard, 2016). Насколько нам известно, впервые слово «атлантификация» использовано в работе (Variations in hydrography..., 2002), но в более узком смысле. Несколько позже географические рамки этого понятия были расширены до Атлантического сектора Северного Ледовитого океана (СЛО), однако в статье (Polyakov, Alkire, Bluhm, 2020) оно трактуется шире еще и в феноменологическом плане и включает в себя изменения в биоте. Такая трактовка постепенно находит отражение и в некоторых русскоязычных публикациях (Орлов, Волвенко, 2023).

Общее значение английского слова «pacification» – умиротворение, усмирение. В этом смысле оно используется в англоязычных публикациях, в том числе научных, уже на протяжении нескольких веков. Первое упоминание термина «пацификация», связанное с влиянием Тихого океана на СЛО, которое нам удалось найти, относится к 2008 г. и обозначает появление бореальных видов тихоокеанского происхождения в СЛО (The annual cycle..., 2008; Wassmann, 2008); строгое определение не приводится. Только после обобщения данных в работе (Polyakov, Alkire, Bluhm, 2020) термин «пацификация» стал применяться более широко.

Недавно термин «бореализация» начали употреблять и в русскоязычных научных публикациях, посвященным изменениям в СЛО, однако нечасто. Поиск по такому ключевому слову на сайте Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) дал всего 3 результата, среди которых нет рецензируемых статей. Поиск по слову «бореализация» в названии или аннотации статьи выявил 5 результатов, только 2 из которых относятся к морской ихтиологии или гидробиологии (О.В. Карамушко, Л.И. Карамушко, 2023; Чернова, 2023). Некоторые работы, упоминающие этот термин в отношении морских экосистем на русском языке, в РИНЦ найти не удалось (Галактионов, 2017; Чернова, 2017; Орлов, Волвенко, 2023).

Чаще других авторов этот термин в морском экологическом смысле использует Н.В. Чернова (Зоологический институт РАН), но только в отношении фауны СЛО. Например, в публикации (Чернова, 2017) описана наблюдающаяся и возможная бореализация фауны в морях от Баренцева до Чукотского. В тезисах (Чернова, Долгов, 2018) упоминается бореализация фауны Баренцева, Берингова и Чукотского морей. В.А. Спиридонов и Н.В. Чернова пишут о «бореализации биоты», которая «приобретает более

тепловодный характер», как об «очевидном биологическом последствии усиления притока атлантических вод в Баренцево море» (Спиридонов, Чернова, 2020). Похожее определение дано в работе (Галактионов, 2017): проникновение в Арктику бореальных видов беспозвоночных и рыб. Как видно из этого обзора, термин «бореализация» в настоящее время используется в русскоязычной научной литературе в основном в биологическом смысле. Только в работе (Орлов, Волвенко, 2023) имеется более широкое определение: «переход арктических морских экосистем в более умеренное состояние».

Учитывая опыт зарубежных коллег и отсутствие широкого определения термина в русскоязычной научной литературе, предлагаем называть бореализацией такую смену совокупности условий среды и сообществ живых организмов на масштабе времени не меньше десятилетия, которая приводит к общему изменению облика морской акватории с арктического в сторону субарктического или умеренного.

С термином «фенология» все несколько проще. В данной статье мы используем широкое определение, которое означает, что фенология – это система знаний о сезонных явлениях природы, сроках их наступления и причинах, определяющих эти сроки (Большая советская энциклопедия, 1977). Под фенологическими параметрами будем понимать любые параметры, численно выражающие сроки наступления каких-либо сезонных явлений.

Приведенный выше обзор, посвященный бореализации СЛО, позволяет предположить, что она должна проявляться не только в общем облике акватории, но и в отдельных параметрах, в том числе фенологических, многие из которых имеют очевидное хозяйственное значение (например, сроки ледовых явлений), а другие могут быть индикаторами состояния экосистемы. Исследованию изменчивости фенологических параметров СЛО и смежных морей пока уделяется мало внимания, в особенности в России. Основная цель работы – обобщить имеющуюся информацию о тенденциях фенологических параметров в Баренцевом и Беринговом морях, которые могут быть связаны с бореализацией, т.е. частично ответить на вопрос, наблюдается ли в этих морях смещение сроков сезонных явлений в сторону дат, больше характерных для субарктической географической зоны, чем для арктической.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных использована информация из ряда массивов. Данные о концентрации льда взяты из NOAA/NSIDC Climate

Data Record (разрешение 25×25 км, шаг по времени 1 сут, NOAA/NSIDC, 2017). Даты полного очищения акватории ото льда (ДПО) рассчитаны как в работе (Сумкина, Кивва, Иванов, 2022).

Данные о потоках тепла на границе море-атмосфера взяты из атмосферного реанализа ERA5 (разрешение $0,25 \times 0,25^\circ$ по широте и долготе, шаг по времени 1 ч). Тепловой баланс поверхности моря, даты начала и окончания сезонного нагрева поверхности моря (ДНН и ДОН соответственно) определяли как в работе (Сезонное очищение ото..., 2022). Для ДПО и ДНН вычисляли коэффициенты линейных трендов, выполняли корреляционный и кластерный анализ полей.

Дополнительно для анализа влияния изменений среды обитания на фитопланктон использованы спутниковые данные о концентрации хлорофилла-а спектрорадиометров MODIS (номинальное пространственное разрешение 4 км, дискретность 1 сут, NASA Goddard Space..., 2022). В качестве индикатора срока наступления «цветения» выбрана дата максимальной концентрации хлорофилла-а (ДМХ). Выбор такого параметра вместо, например даты начала «цветения», связан с тем, что во многих случаях дату начала «цветения» в Беринговом море определить затруднительно (Spring phytoplankton bloom..., 2024).

Статистический анализ полученных расчетных данных включал оценку величины коэффициента линейного тренда с помощью функции Тейла-Сена в языке программирования R (R Core Team, 2023) средствами пакета *tblm*. Уровень статистической значимости линейного тренда $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для Баренцева моря рассмотрены только ДПО, ДНН и ДОН. ДПО почти на всей сезонно покрываемой льдом акватории моря имеет статистически значимый отрицательный тренд порядка $-0,1$ сут в год (-4 сут за 40 лет). Максимальные значения этого тренда составляют $-0,25$ сут в год. Тренд статистически незначим или близок к нулю только в районе максимального южного распространения льда, где в последние годы он вообще не наблюдается, а также на севере моря. Наши результаты в целом соответствуют результатам (Peng, Stelle, Bliss, 2018), т.е. очищение акватории ото льда почти всюду происходит во все более ранние сроки.

ДНН в Баренцевом море приходится на апрель и май, но всюду обладает высокой межгодовой изменчивостью. Этот параметр имеет отрицательный тренд с фоновыми значениями порядка $-0,1$ сут в год в области, расположенной к северу от Полярного фронта, однако на большей

части акватории он статистически незначим. Только в районах над Шпицбергенской банкой – к западу от арх. Новая Земля и к северу от Печорского моря – этот тренд составляет до $-0,5$ сут в год и статистически значим, при этом наблюдается положительный тренд величиной до $0,2$ сут в год (статистически незначим) в центральной части, на юге и юго-западе моря, т.е. к северу от Полярного фронта переход от охлаждения моря к нагреву происходит в целом все раньше (как в более южных районах), а к югу от него – или не сдвигается, или сдвигается на более поздние сроки.

Ежегодный переход к охлаждению акватории в Баренцевом море почти всюду происходит с конца августа до начала сентября. Пространственная изменчивость ДОН ниже, чем ДНН, однако межгодовая изменчивость также существенна, как и в случае ДНН. ДОН имеет тренд близкий к нулю на большей части акватории. Положительный, но статистически незначимый тренд величиной около $0,2$ сут в год наблюдается над Шпицбергенской и Центральной банками, к востоку от арх. Шпицберген и югу от арх. Земли Франца-Иосифа. В обширном районе на юго-востоке моря отмечается отрицательный статистически значимый тренд с величиной около $-0,6$ сут в год, поэтому сдвиг на более поздние сроки ДОН – только на локальных участках моря. Более детально результаты по изменчивости ДНН, ДОН и длительности теплого периода года изложены в работе (Sumkina, Kivva, Ivanov, 2023).

Для Берингова моря рассмотрены ДПО, ДНН, ДОН и ДМХ. При анализе имеющегося ряда ДПО (1979-2022 гг.) в пределах моря наблюдаются небольшие по модулю, но статистически значимые величины тренда ДПО, причем необязательно отрицательные. В северной части моря в Анадырском заливе и районе бассейна Чирикова они достигают приблизительно $-0,5$ сут в год, при этом на юго-восточном шельфе и в Карагинском заливе имеются участки, на которых тренд положительный с величинами около $0,5$ сут в год, местами до $1,0$ сут в год. Отсутствие обширных областей с высоким по модулю отрицательным трендом ДПО неудивительно, поскольку известно, что в Беринговом море в последние десятилетия чередовались теплые и холодные периоды длительностью в несколько лет. Области с положительными трендами соответствуют южным районам, где лед бывает не каждый сезон и ДПО обладает высокой межгодовой изменчивостью, т.е. в годы с высокой ледовитостью моря, когда в этих районах отмечается лед, ДПО в них имеет тенденцию к сдвигу на более поздний срок.

При рассмотрении рядов ДПО с 2000 по 2022 г. картина распределения трендов ДПО несколько меняется. В центральной части восточного шельфа и Анадырском заливе наблюдаются величины тренда

ДПО порядка $-1,0$ сут в год, местами до $-1,6$ сут в год, т.е. тенденция к бореализации выражена более ярко.

ДНН имеет отрицательный статистически значимый тренд на севере моря (около $-0,4$ сут в год) и в глубоководной части в широкой полосе между 55 и 60° с.ш. с наибольшими по модулю значениями у побережья Камчатки (до $-0,7$ сут в год).

ДОН почти на всей акватории моря имеет слабо выраженный, но статистически значимый тренд порядка $0,1$ сут в год. Только в южной части моря и вдоль восточного берега тренд ДОН местами достигает $0,3-0,4$ сут в год. Вдоль восточного побережья Камчатки и на отдельных участках восточного шельфа тренд ДОН отсутствует.

Наиболее интересен результат оценки тренда ДМХ, поскольку этот параметр должен отражать тенденции в функционировании сообщества первичных продуцентов. Тренд ДМХ имеет существенную пространственную изменчивость, но в целом положителен почти всюду в глубоководной части моря с наибольшими значениями ($1,0-1,5$ сут в год) в широкой полосе вдоль бровки восточного шельфа и Алеутских о-вов. На восточном шельфе примерно в тех же районах, где отрицательный тренд ДПО, наблюдается отрицательный тренд ДМХ. Стоит отметить, что в связи с малой длиной рядов и высокой межгодовой изменчивостью ДМХ тренд этого параметра в большинстве ячеек статистически незначим. Те ячейки, в которых данный тренд имеет высокую статистическую значимость, расположены в рассмотренных районах мозаично.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе опыта зарубежных коллег и с учетом существующих тенденций в русскоязычной научной литературе предлагается под бореализацией морской акватории понимать такую смену совокупности условий среды и сообществ живых организмов на масштабе времени не меньше десятилетия, которая приводит к общему изменению облика акватории с арктического в сторону субарктического или умеренного.

В Баренцевом море бореализация проявляется в изменениях сроков очищения акватории ото льда, но говорить о ее проявлении в сроках смены знака теплового баланса (сроков начала и окончания теплого периода года) пока затруднительно. Статистически значимые тренды сроков начала и окончания теплого периода года в Баренцевом море почти отсутствуют, хотя общее распределение их значений соответствует тенденциям в изменчивости сроков очищения акватории ото льда.

В Беринговом море бореализация слабо выражена в изменениях сроков очищения акватории ото льда, если рассматривать все имеющиеся

данные (с 1979 г.), поскольку там наблюдалось чередование теплых и холодных периодов продолжительностью несколько лет. При рассмотрении значений за 2000-2022 гг. тенденция проявляется более отчетливо. В изменениях сроков перехода поверхности моря от охлаждения к нагреву бореализация наиболее ярко выражена в центральной части. На восточном шельфе моря отмечается смещение «цветения» фитопланктона на более ранние сроки, которые характерны для более южных шельфовых и близких к шельфу районов. Вдоль материкового склона в глубоководной части прослеживается обратная тенденция: «цветение» сдвигается на более поздние сроки, характерные для умеренной зоны Тихого океана, т.е. в Беринговом море бореализация проявляется и в сроках весеннего «цветения» фитопланктона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Большая советская энциклопедия. Т. 27. Ульяновск – Франкфорт / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1977. – 624 с.

Галактионов, К.В. Климатические изменения и паразиты: возможный эффект потепления Арктики на трансмиссию гельминтов в экосистемах морского побережья / К.В. Галактионов // Материалы юбилейной отчетной научной сессии, посвященной 185-летию Зоологического института РАН. – СПб.: Зоологический институт РАН, 2017. – С. 43-46.

Истомин, А.В. «Бореализация» сообществ мелких млекопитающих в коренных южно-таежных лесах центра Русской равнины / А.В. Истомин // Экология таежных лесов: тез. докл. междунар. конф. – Сыктывкар, 1998. – С. 141-142.

Карамушко, О.В. Ихтиопланктон юго-западной части Карского моря / О.В. Карамушко, Л.И. Карамушко // Вопросы ихтиологии. – 2023. – Т. 63, № 4. – С. 377-385.

Орлов, А.М. Новые ихтиологические свидетельства бореализации российского сектора Арктики / А.М. Орлов, И.В. Волвенко // Сборник материалов всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 85-летию Беломорской биостанции им. Н.А. Перцова Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2023. – С. 145-147.

Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла атлантическими водами / А.А. Сумкина, К.К. Кивва, В.В. Иванов [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 82-97.

Спиридонов, В.А. Гл. 4. Изменение климата в Арктике и его возможное влияние на условия среды и биологическое разнообразие в приоритетных для охраны морских районах / В.А. Спиридонов, Н.В. Чернова // Пространственное планирование сохранения биоразнообразия морей российской Арктики. – М.: Всемирный фонд природы, 2020. – С. 98-107.

Сумкина, А.А. Анализ изменений параметров зимнего теплового баланса Баренцева моря / А.А. Сумкина, К.К. Кивва, В.В. Иванов // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса: материалы X международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 10-11 ноября 2022 г.) / Федеральное агентство по рыболовству, ФГБНУ «ВНИРО». – М.: ВНИРО, 2022. – С. 397-399.

Чернова, Н.В. Ихтиофауна Арктики в условиях меняющегося климата / Н.В. Чернова // Материалы юбилейной отчетной научной сессии, посвященной 185-летию Зоологического института РАН. – СПб.: Зоологический институт РАН, 2017. – С. 217-221.

Чернова, Н.В. Ихтиофауна арктических морей: современное состояние исследований и отечественное рыболовство в условиях климатических изменений / Н.В. Чернова, А.В. Долгов // Перспективы рыболовства и аквакультуры в современном мире: материалы III научной школы молодых ученых и специалистов по рыбному хозяйству и экологии, посвященной 140-летию со дня рождения К.М. Дерюгина (Звенигород, 15-21 апреля 2018 г.). – Звенигород: ВНИРО, 2018. – С. 50.

Чернова, Н.В. О поимках мерланга *Merlangius merlangus* (Gadiformes: Gadidae) в Белом море / Н.В. Чернова // Труды Зоологического института РАН. – 2023. – Т. 327, № 1. – С. 57-67.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Chlorophyll Data; 2022 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. – DOI 10.5067/AQUA/MODIS/L3M/CHL/2022.

NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 3. 2017 Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. – DOI 10.7265/N59P2ZTG//Boulder.

Oziel, L. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980-2011) / L. Oziel, J. Sirven, J.C. Gascard // Ocean Science. – 2016. – Vol. 12, Iss. 1. – P. 169-184.

Peng, G. Temporal Means and Variability of Arctic Sea Ice Melt and Freeze Season Climate Indicators Using a Satellite Climate Data Record / G. Peng, M. Steele, A. Bliss // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, Iss. 9. – P. 1328.

Polyakov, I.V. Borealization of the Arctic Ocean in response to anomalous advection from sub-Arctic seas / I.V. Polyakov, M.B. Alkire, B.A. Bluhm // *Frontiers in Marine Science*. – 2020. – Vol. 3, Iss. 7. – P. 491.

Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat / M. Årthun, T. Eldevik, L.H. Smedsrud [et al.] // *Journal of Climate*. – 2012 – Vol. 25, Iss. 13. – P. 4736-4743.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. – Текст: электронный / R Foundation for Statistical Computing, 2023. – URL: <https://www.R-project.org/> (дата обращения 13.04.2023).

Rubtsov, G.A. Geographical distribution of the genus *Pyrus* and trends and factors in its evolution / G.A. Rubtsov // *The American Naturalist*. – 1944. – Vol. 78, Iss. 777. – P. 358-366.

Spring phytoplankton bloom phenology during recent climate warming on the Bering Sea shelf / J.M. Nielsen, M.F. Sigler, L.B. Eisner [et al.] // *Progress in Oceanography*. – 2024. – Vol. 220. – Art. 103176.

Sumkina, A.A. Seasonality of Heat Exchange on the Barents Sea Surface / A.A. Sumkina, K.K. Kivva, V.V. Ivanov // *Oceanology*. – 2023. – Vol. 63, Iss. Suppl 1. – P. S65-S71.

The annual cycle of particulate organic carbon export in Franklin Bay (Canadian Arctic): Environmental control and food web implications / A. Forest, M. Sampei, R. Makabe [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2008. – Vol. 113. – C. 3.

Variations in hydrography, nutrients and chlorophyll a in the marginal ice-zone and the central Barents Sea / M. Reigstad, P. Wassmann, C.W. Riser [et al.] // *Journal of Marine Systems*. – 2002. – Vol. 38, Iss. 1-2. – P. 9-29.

Wassmann, P. Impacts of Global Warming on Arctic Pelagic Ecosystems and Processes / P. Wassmann // *Impacts of Global Warming on Polar Ecosystems* / Ed. C.M. Duarte. – Bilbao: Fundación BBVA, 2008. – 190 p.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СВЯЗИ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПОЛНЕНИЯ ТРЕСКОВЫХ РЫБ В СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

А.С. Кровнин, С.П. Мельников, К.К. Кивва

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), г. Москва

Аннотация. Рассмотрены особенности пространственно-временных связей между численностью пополнения 20 запасов атлантической трески, пикши и сайды в североатлантическом бассейне и климатическими показателями за 1984-2013 гг. Выявлено значительное количество синхронных и асинхронных связей динамики численности пополнения между различными запасами тресковых рыб, обитающих как в пределах одного или смежных статистических районов ИКЕС и НАФО, так и в удаленных друг от друга регионах. Существование связей объясняется как биологическими причинами, так и единым влиянием взаимосвязанных климатических факторов на группу популяций тресковых рыб.

Ключевые слова: тресковые рыбы, численность пополнения, климатические индексы, Северная Атлантика.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе эволюционного развития такие виды тресковых рыб семейства Gadidae, как атлантическая треска, пикша и сайда освоили разнообразные места обитания и экологические ниши, став доминирующими компонентами ихтиоценов в экосистемах северной части Атлантического океана и сопредельных водах.

Общепринято, что среда обитания является одним из ключевых факторов в динамике популяций морских рыб, при этом температура воды, регулирующая скорость физиологических процессов у рыб, оказывает существенное влияние на формирование численности пополнения запасов промысловых рыб, в том числе и тресковых.

Так, величина пополнения атлантической трески тесно коррелирует с колебаниями температуры воды. Более чем вековые наблюдения показывают, что в период потепления в североатлантическом бассейне отмечается рост запасов атлантической трески. Как правило, с ростом температуры воды появляются преимущественно урожайные поколения, в то время как отрицательные аномалии температуры воды способствуют формированию бедных годовых классов (Sætersdal, Loeng, 1987; Regional climatic warming..., 2004; Decline and recovery..., 2006). Это довольно общая картина связи динамики запасов рыб с температурными колебаниями. В то же время результаты ряда исследований показывают,

что запасы трески по-разному реагируют на изменения температуры воды в зависимости от их местонахождения (Planque, Fredou, 1999; Cod and future..., 2010).

Проведенные нами ранее исследования динамики 21 запаса атлантической трески, пикши и сайды в североатлантическом регионе с 1946 по 2020 г. установили существенную межгодовую изменчивость нерестовой биомассы, численности пополнения и коэффициентов выживания рыб в раннем онтогенезе у всех рассматриваемых популяций (Кровнин, Мельников, 2023). Выявленная 50-60-летняя цикличность в колебаниях численности пополнения северо-восточной арктической трески, характерная для колебаний индекса атлантической многодекадной осцилляции (АМО), предполагает наличие связи в долгопериодных колебаниях двух указанных параметров. Установлены статистически значимые положительные и отрицательные корреляционные связи между изменениями численности пополнения ряда запасов тресковых рыб в северо-западных и северо-восточных районах Атлантического океана.

Основная цель работы заключается в изучении особенностей пространственно-временных связей между численностью пополнения запасов тресковых рыб в североатлантическом бассейне и климатическими факторами для прогнозирования долгосрочной динамики их состояния и численности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные о численности пополнения 11 стад атлантической трески, 5 стад атлантической пикши и 4 стад атлантической сайды (табл. 1).

Для изучения пространственно-временных связей между климатическими характеристиками и численностью пополнения популяций североатлантических тресковых рыб применены временные ряды среднемесячных значений различных климатических индексов в 1950-2022 гг. (PSL, 2023). Эти индексы характеризуют известные дальние связи в северной части Атлантического океана и атмосфере Северного полушария. Для всех рядов были рассчитаны средние зимние значения, которые охватывали период с декабря по март для атмосферных индексов и с января по апрель – для океанических индексов. Теплота слоя воды (МДж/м²) рассчитывался по формуле, приведенной в работе М.А. Богданова (1965).

**Единицы запасов атлантической трески, пикши и сайды, используемые
при анализе динамики их пополнения**

Номер стада	Название запаса
1	Треска в районах НАФО 2J3KL
2	Треска в подрайонах НАФО 4X5Y
3	Пикша в подрайонах НАФО 4X5Y
4	Треска в подрайонах НАФО 3NO
5	Треска в подрайоне НАФО 3M
6	Треска в подрайонах НАФО 1F и ИКЕС 14b
7	Треска в подрайоне ИКЕС 5a
8	Пикша в подрайоне ИКЕС 5a
9	Сайда в подрайоне ИКЕС 5a
10	Треска в подрайоне ИКЕС 5b1
11	Пикша в подрайоне ИКЕС 5b
12	Сайда в подрайоне ИКЕС 5b
13	Треска в подрайонах ИКЕС 4, 7d, 20
14	Пикша в подрайонах ИКЕС 4, 6a, 20
15	Сайда в подрайонах ИКЕС 4, 6, 3a
16	Треска в подрайонах ИКЕС 24-32
17	Треска в подрайонах ИКЕС 22-24
18	Треска в районах ИКЕС 1 и 2
19	Пикша в районах ИКЕС 1 и 2
20	Сайда в районах ИКЕС 1 и 2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения синхронных пространственно-временных связей между численностью пополнения популяций тресковых рыб Северной Атлантики с климатическими показателями к 53 временным рядам численности пополнения атлантической трески, пикши и сайды, а также различных океанических и атмосферных индексов был применен метод главных компонент (ГК). Расчет выполнен за 1984-2013 гг., для которого имеются данные по всем 20 запасам рыб и 33 климатическим индексам. Выбор верхней границы рядов для анализа обусловлен тем обстоятельством, что данные для индекса баренцевоморского колебания имеются только до 2013 г. включительно.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции между каждым из анализируемых рядов и каждой из пяти первых главных компонент. Эти компоненты объясняют 56,64 % общей дисперсии всех 53 временных рядов. Для наглядности в таблице представлены только те биологические и физические характеристики, которые статистически значимо коррелируют с ГК.

Первая ГК (20,27 %) связана с индексом атлантической многодекадной осцилляции (АМО) ($r = -0,87$, $p < 0,01$) (см. табл. 2). Она отражает колебания численности пополнения запасов в удаленных друг от друга районах Северной Атлантики – обитающих на северо-западе популяций трески моря Лабрадор и залива Мэн (районы НАФО 2J3KL и 5X4Y) и населяющих воды восточной части североатлантического бассейна популяций трески и сайды Северного моря и северо-восточной арктической пикши (Баренцево море) (рис. 1). При этом, судя по знакам коэффициентов корреляции, изменения численности пополнения всех указанных выше запасов, за исключением северо-восточной арктической пикши, происходят в противофазе с изменениями индекса АМО.

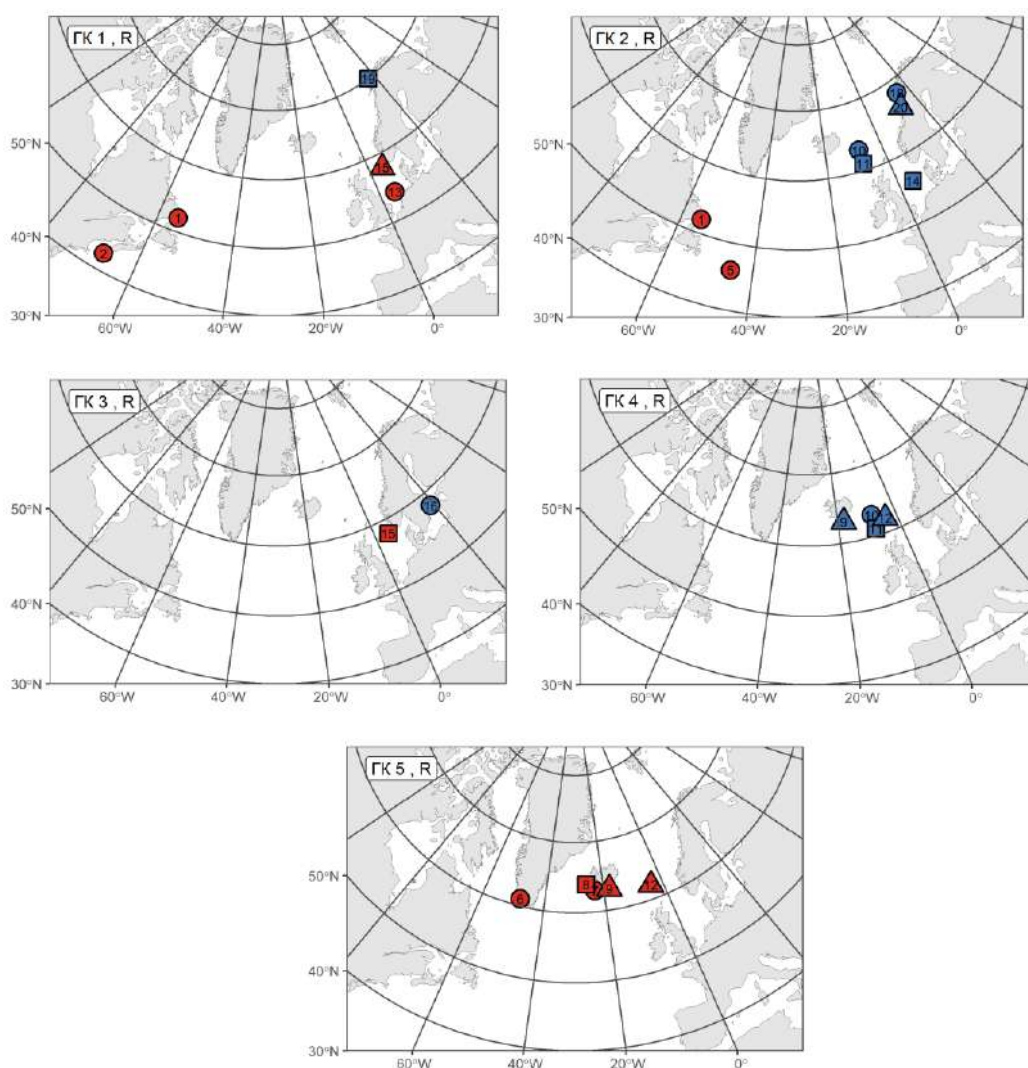


Рис. 1. Популяции тресковых рыб, связанные с каждой из пяти первых главных компонент 53 биологических и физических временных рядов численности их пополнения. Кружки соответствуют запасам трески, квадраты – запасам пикши, треугольники – запасам сайды. Красный (синий) цвет фигур соответствует положительной (отрицательной) корреляции ряда с соответствующей ГК. Номера в фигурах указывают на номера запаса в табл. 1

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между пятью первыми главными компонентами
53 биологических и физических временных рядов и каждым из рядов за
1984-2013 гг. Выделены коэффициенты корреляции со значениями $r \geq 0,40$

Название временного ряда	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4	ГК5
	20,27 %	11,47 %	9,47 %	8,53 %	6,90 %
Треска в районах НАФО 2J3KL	0,48	0,53	0,03	0,22	0,31
Треска в подрайонах НАФО 4X5Y	0,65	0,24	0,25	0,17	0,25
Треска в подрайоне НАФО 3M	0,39	0,55	-0,35	0,21	0,39
Треска в подрайонах НАФО 1F и ИКЕС 14b	-0,06	0,15	-0,11	0,07	0,64
Треска в подрайоне ИКЕС 5a	0,15	-0,18	-0,18	-0,29	0,50
Пикша в подрайоне ИКЕС 5a	-0,11	-0,23	0,22	0,23	0,61
Сайда в подрайоне ИКЕС 5a	-0,23	-0,04	-0,25	-0,43	0,57
Треска в подрайоне ИКЕС 5b1	0,21	-0,45	0,32	-0,48	0,19
Пикша в подрайоне ИКЕС 5b	0,02	-0,45	0,12	-0,43	0,20
Сайда в подрайоне ИКЕС 5b	-0,22	-0,22	0,14	-0,42	0,62
Треска в подрайонах ИКЕС 4, 7d, 20	0,66	0,19	-0,25	-0,03	0,06
Пикша в подрайонах ИКЕС 4, 6a, 20	0,05	-0,43	-0,11	-0,33	0,12
Сайда в подрайонах ИКЕС 4, 6, 3a	0,46	-0,12	0,41	-0,11	0,22
Треска в подрайонах ИКЕС 24-32	-0,32	0,39	-0,56	0,01	0,38
Треска в районах ИКЕС 1 и 2	-0,12	-0,46	-0,08	0,26	-0,22
Пикша в районах ИКЕС 1 и 2	-0,41	-0,38	-0,26	0,39	0,01
Сайда в районах ИКЕС 1 и 2	-0,18	-0,40	0,29	-0,09	-0,11
Индекс АМО (январь-апрель)	-0,87	0,00	0,16	-0,22	-0,07
Индекс БМО (декабрь-март)	0,24	0,15	-0,67	-0,36	0,27
Индекс ВА (декабрь-март)	-0,10	0,18	0,63	0,16	-0,22
Индекс ВА/ЗР (декабрь-март)	0,11	-0,27	0,62	0,17	0,07
Индекс САК (декабрь-март)	0,27	-0,71	-0,16	0,01	-0,03
Северотихоокеанский индекс (декабрь-март)	-0,11	-0,28	-0,47	0,21	-0,34
Индекс СКАНД (декабрь-март)	-0,17	0,66	-0,31	-0,13	-0,13
Индекс ТСП (декабрь-март)	0,19	-0,05	-0,50	0,40	0,10
Индекс ЗА (декабрь-март)	-0,37	0,24	-0,13	-0,44	-0,10
Зимние АТПО в Районе 1А (Кровнин, 2020)	-0,51	-0,54	0,26	0,27	0,11
Зимние АТПО в Районе 5А (Кровнин, 2020)	-0,82	-0,31	0,17	-0,18	0,19
Зимние АТПО в Районе 6А (Кровнин, 2020)	0,83	-0,14	-0,09	0,15	-0,17
ГК1 теплозапаса вод в слое 0-100 м	-0,81	-0,41	-0,08	-0,05	0,05
ГК2 теплозапаса вод в слое 0-100 м	-0,87	0,14	0,09	-0,17	0,06
ГК3 теплозапаса вод в слое 0-100 м	0,56	-0,52	-0,18	-0,32	-0,11
ГК1 теплозапаса вод в слое 100-500 м	-0,88	-0,16	-0,25	0,04	-0,05
ГК2 теплозапаса вод в слое 100-500 м	-0,80	0,17	0,05	0,10	0,31
ГК3 теплозапаса вод в слое 100-500 м	0,48	-0,41	-0,14	-0,47	0,17

Во временном ходе ГК1 выделяются два режима с различным уровнем ее колебаний, переход между которыми произошел в 1998 г. (рис. 2). Указанная смена режимов в колебаниях первой главной компоненты отражает установление положительной (теплой) фазы атлантической многодекадной осцилляции, учитывая отрицательный знак корреляции между временными рядами ГК1 и индекса АМО. Таким образом, потепление североатлантических вод неблагоприятно сказалось на численности пополнения практически всех связанных с первой главной компонентой тресковых рыб и в первую очередь на тепловодных запасах Северного моря, обитающих вблизи южной границы ареала. Единственным исключением стала популяция северо-восточной арктической пикши, живущая в относительно холодных водах Баренцева моря на северной границе ареала. Для нее рост температуры воды оказал позитивное влияние на выживаемость пополнения.

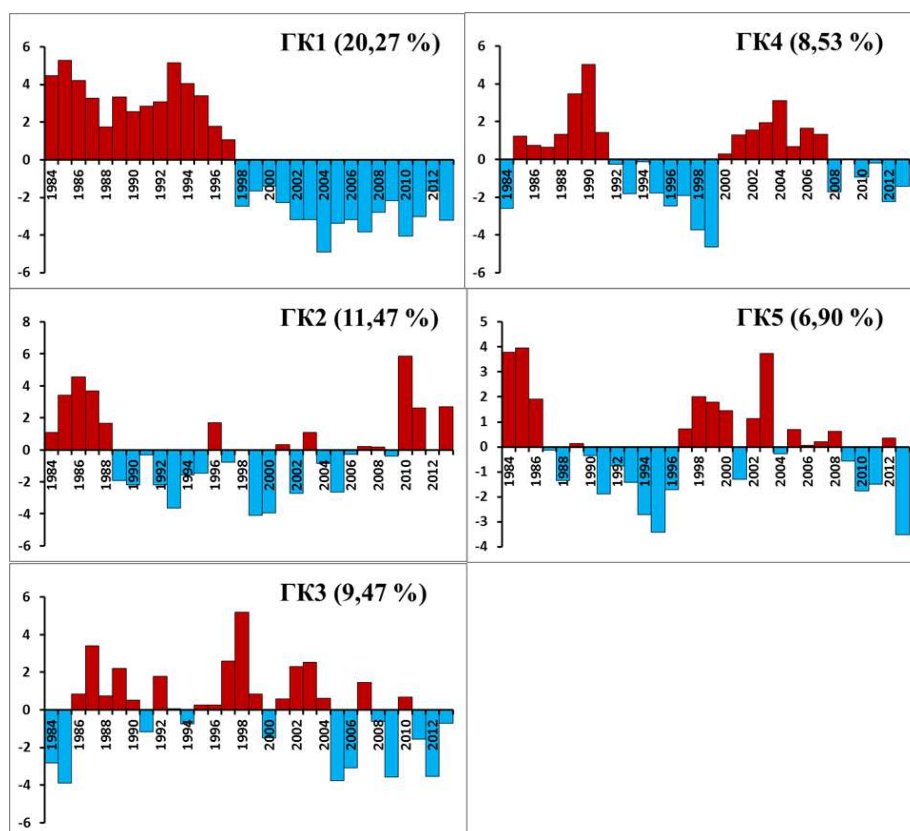


Рис. 2. Первые пять главных компонент 53 биологических и физических временных рядов за 1984-2013 гг.

Вторая ГК (11,47 %) связана с североатлантическим колебанием (САК) ($r = -0,71$, $p < 0,01$) (табл. 2). ГК2 показывает также тесную положительную связь с изменениями индекса скандинавской дальней связи (СКАНД) в средней тропосфере Северного полушария.

Положительная фаза СКАНД связана с присутствием блокирующего антициклона над Восточной Скандинавией или Северо-Западом России и высотной ложбины над Западной Европой.

ГК2 отражает обратную связь между изменениями индексов СКАНД и САК: положительная фаза СКАНД чаще формируется при отрицательной фазе САК и наоборот.

Вторая главная компонента описывает региональные и трансатлантические связи семи запасов атлантических тресковых рыб (см. табл. 2, рис. 1), при этом изменения численности пополнения северо-восточных запасов (треска Фарерского плато, фарерская пикша, пикша Северного моря, северо-восточная арктическая треска и сайда) происходят в одной фазе с САК, а численности северо-западных (лабрадорская треска и треска банки Флемиш-Кап) – в обратной. Из этого следует, в частности, что именно фаза САК в значительной степени определяет противоположную связь между колебаниями уровня пополнения указанных выше северо-западных и северо-восточных популяций тресковых рыб.

Временной ход ГК2 характеризуется наличием трех режимов с переходом от положительных значений к преимущественно отрицательным значениям в 1989 г. и с обратным переходом в 2010 г. (см. рис. 2).

ГК3 (9,47 %) тесно связана с атмосферными дальними связями (ДС) над восточной частью североатлантического бассейна: с восточно-атлантической (ВА) ($r = 0,63$), ДС «Восточная Атлантика/Западная Россия» (ВА/ЗР) ($r = 0,62$) и баренцевоморской осцилляцией (БМО) ($r = -0,67$). Баренцевоморская осцилляция менее известна, чем две другие ДС. Она представляет собой вторую ЭОФ зимних (декабрь-март) аномалий давления на уровне моря (ДУМ) в диапазоне 90° з.д. – 90° в.д. севернее 30° с.ш. (A robust mode..., 2013). Положительная фаза БМО характеризуется первичным центром повышенного атмосферного давления над Баренцевоморским регионом, вторым центром действия того же знака над Северной Атлантикой и центром противоположного знака над Гренландией и Гренландским морем (рис. 3). Эта мода атмосферной изменчивости тесно связана с меридиональным потоком над Северным, Норвежским и Балтийским морями и аномалиями зонального переноса над Баренцевым морем.

С ГК3 связаны два запаса тресковых рыб североатлантического бассейна: сайда Северного моря ($r = 0,41$) и восточно-балтийская треска ($r = -0,56$). Изменения численности пополнения трески положительно связаны с БМО: аномальный южный перенос в атмосфере над восточной частью Балтийского моря при положительной фазе баренцевоморской

осцилляции (см. рис. 3) приводит к росту численности пополнения восточно-балтийской трески. В то же время такая ситуация, по-видимому, оказывает неблагоприятное влияние на североморскую сайду.

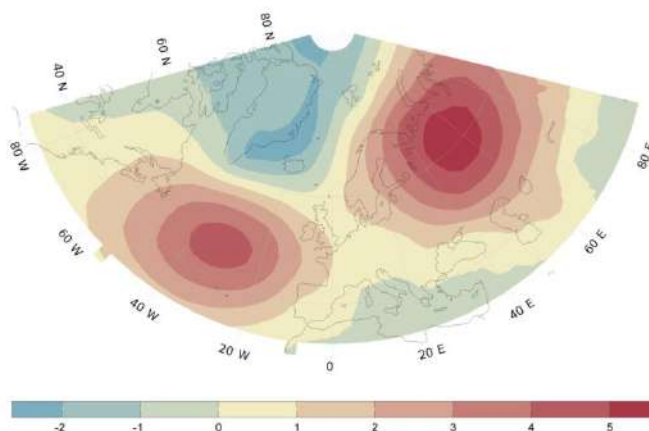


Рис. 3. Вторая ЭОФ поля аномалий ДУМ (декабрь-март) за 1949-2013 гг. (A robust mode..., 2013), гПа

Изменения ГК3 характеризуются наличием трех режимов с переходом между ними в 1986 и 2005 гг. (см. рис. 2).

У ГК4 (8,53 %) имеется статистически значимая, хотя и не очень высокая по абсолютному значению отрицательная связь с западно-атлантической (ЗА) ДС в средней тропосфере ($r = -0,41$). ЗА ДС характеризуется двумя центрами противоположного знака, расположенными вдоль 55° з.д., на 55 и 30° с.ш. соответственно (Wallace, Gutzler, 1981). Значимую (как и ЗА ДС) отрицательную корреляционную связь с ГК4 обнаруживают ряды численности пополнения исландской сайды, трески Фарерского плато, фарерской пикши и сайды. При этом изменения численности пополнения происходят в одной фазе с ЗА ДС. При положительной фазе ЗА ДС в ее северном центре отмечаются положительные аномалии геопотенциальных высот, а центры действия САК и зональный перенос над Северной Атлантикой ослаблены. Такая ситуация приводит к формированию положительных АТПО в районе Исландии и Фарерских о-вов и оказывает положительное влияние на уровень пополнения обитающих в этих районах тресковых рыб.

У ГК4 хорошо выражены декадные колебания с преобладанием ее положительных значений в 1985-1991 и 2000-2007 гг., а отрицательных – в 1992-1999 гг. и 2008-2013 гг. (см. рис. 2).

ГК5 (6,90 %) не обнаруживает значимую статистическую связь ни с одним из климатических показателей. Она отражает лишь синхронные изменения численности пополнения тресковых рыб, обитающих в пределах одного или в смежных районах океана: гренландской и

исландской трески, исландской пикши, исландской и фарерской сайды. Такая синхронизация в динамике численности пополнения между различными запасами тресковых может быть результатом протяженных миграций взрослых особей в нерестовый период, а также обширного переноса личинок между нерестилищами и миграций созревающих особей. Крупные популяции при благоприятных условиях могут вносить существенный вклад в пополнение соседних популяций, как это происходило в 1970-х годах, когда половозрелые особи трески мигрировали от побережья Гренландии в воды Исландии (ICES, 2002; Population dynamics of..., 2005).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных о численности пополнения 20 запасов атлантической трески, пикши и сайды выявил наличие значительного количества синхронных и асинхронных региональных и трансатлантических связей в динамике численности их пополнения. Их существование частично объясняется биологическими причинами. Синхронизация в динамике численности пополнения между запасами тресковых, обитающих в смежных статистических районах ИКЕС и НАФО (в частности в районе «Гренландия-Исландия-Фареры»), может быть результатом протяженных миграций взрослых особей в нерестовый период, а также результатом обширного переноса личинок между нерестилищами и миграций созревающих особей.

Синхронное влияние одного (АМО, САК) или группы взаимосвязанных (ДС «атмосфера-океан») крупномасштабных климатических факторов обуславливает наличие как трансатлантических статистических связей в колебаниях численности пополнения между северо-западными и северо-восточными популяциями тресковых рыб, так и региональных связей у близко живущих популяций.

Полученные в ходе исследований данные об общих закономерностях изменчивости пополнения запасов тресковых рыб будут использованы в качестве научной основы для прогнозирования долгосрочной динамики их состояния и численности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Богданов, М.А. О динамике вод Фареро-Исландского порога / М.А. Богданов // Труды ВНИРО. – 1965. – Т. 57. – С. 33-41.

Кровнин, А.С. Роль крупномасштабных климатических факторов Северного полушария в многолетних колебаниях запасов основных объектов российского промысла: специальность 25.00.36 «Геоэкология

(науки о Земле)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук / А.С. Кровнин. – Москва, 2020. – 26 с.

Кровнин, А.С. Динамика запасов тресковых рыб в североатлантическом регионе / А.С. Кровнин, С.П. Мельников // Труды ВНИРО. – 2023. – Т. 192. – С. 55-67.

A robust mode of climate variability in the Arctic: The Barents Oscillation // H.W. Chen, Q. Zhang, H. Körnich, D. Chen. – DOI 10.1002/grl.50551 // Geophysical Research Letters. – 2013. – Vol. 40. – P. 2856-2861.

Population dynamics of cod *Gadus morhua* in the North Sea region: biological density-dependent and climatic density-independent effects // Q. Chen, K.S. Chan, K. Lekve [et al.] // Marine Ecology Progress Series. – 2005. – Vol. 302. – P 219-232.

Cod and future climate change // K. Drinkwater, C. Schrum, K. Brander [Eds.] // ICES Cooperative Research Report. – 2010. – № 305. – 88 pp.

Decline and recovery of North Atlantic cod stocks / K. Brander, G. Ottersen, K. Wieland, G. Lilly // GLOBEC international newsletter. – October 2006. – P. 10-13.

ICES. Workshop on the transport of cod larvae // 2002. – ICES CM: 13. – 45 pp.

PSL. Physical Sciences Laboratory. – Текст: электронный // URL: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/> (дата обращения: 30.11.2023 г.).

Planque, B. Temperature and the recruitment of Atlantic cod (*Gadus morhua*) / B. Planque, T. Fredou // Can. J. Fish. Aquat. Sci. – 1999. – Vol. 56. – P. 2069-2077.

Regional climatic warming drives long-term community changes of British marine fish // M.J. Genner, D.W. Sims, V.J. Wearmouth [et al.] // Proceedings of the Royal Society London. – Ser. B. – 2004. – Vol. 271. – P. 655-661.

Sættersdal, G. Ecological adaptation of reproduction in Northeast Arctic cod // G. Sættersdal, H. Loeng // Fisheries Research. – 1987. – Vol. 5. – P. 253-270.

Wallace, J.M. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // J.M. Wallace, D.S. Gutzler // Mon. Weath. Rev. – 1981. – Vol. 109. – P. 784-812.

МИКРОПЛАСТИК В ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОМ ТРАКТЕ АТЛАНТИЧЕСКОЙ ТРЕСКИ (*GADUS MORHUA*) ИЗ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

**Д.А. Манухова¹, О.В. Ильина², И.А. Жданов³, М.И. Виноградская²,
В.В. Ильинский², А.А. Поярков²**

¹Российский биотехнологический университет
(РОСБИОТЕХ), г. Москва

²Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова (МГУ), г. Москва

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), г. Москва

Аннотация. Исследовано содержимое желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) десяти особей атлантической трески (*Gadus morhua*), выловленных в летнее время в прибрежной зоне юго-восточной части Баренцева моря. У 60 % исследованных особей были обнаружены частицы микропластика с линейными размерами от 0,21 до 3,84 мм. Количество таких частиц варьировало от 0 до 5 на одну особь, в среднем – 1,4. В составе выделенных частиц были идентифицированы полипропилен и полиэфир.

Ключевые слова: экология, микропластик, морской мусор, Баренцево море, атлантическая треска.

ВВЕДЕНИЕ

Частицы пластика, имеющие размеры менее 5 мм и классифицируемые как микропластик (МП), являются универсальным поллютантом водной среды. Они присутствуют во всех исследованных частях Мирового океана, включая самые удаленные акватории (Plastic pollution in..., 2014). Особое беспокойство вызывают возможность накопления МП в трофических цепях и экологические риски, связанные с большой вероятностью его попадания в продукцию рыбной промышленности и аквакультуры (Vázquez-Rowe, Ita-Nagy, Kahhat, 2021).

Поглощение МП и присутствие в содержимом ЖКТ описано для разных форм морских организмов, включая зоопланктон (Microplastic Ingestion by..., 2013), рыб (Microplastic interaction with..., 2016) и морских млекопитающих (Marine mammals and..., 2021). Также показано наличие частиц МП в тканях некоторых организмов, в частности морских млекопитающих (Microplastic in marine..., 2023). Размеры частиц микропластика совпадают со многими планктонными организмами, вследствие чего они способны попадать в организмы детритофагов и планктофагов в ходе их трофической активности (Wright, Thompson, Galloway, 2013). МП в глобальном масштабе обычно не рассматривается как летальный токсический агент, но уже была установлена его способность

влиять на ряд жизненных показателей гидробионтов разных трофических уровней (Лазарева, Рак, Ипатова, 2023).

Баренцево море является зоной международного рыболовного промысла и обычно классифицируется как район Мирового океана с низким уровнем загрязнения окружающей среды (Report of the..., 2017). В то же время, согласно модели распространения морского мусора, учитывающей морские течения (Van Sebille, England, Froyland, 2012), Баренцево море в Арктическом регионе может выступать основной зоной аккумуляции флотирующего пластика. Эта гипотеза позднее подтверждена полевыми исследованиями (The Arctic Ocean..., 2017).

Атлантическая треска (*Gadus morhua*) – одна из важнейших промысловых рыб, в восточной части Атлантики ареал ее обитания распространяется от Бискайского залива до Баренцева моря. Ловля трески в прибрежных водах Баренцева моря также крайне популярна среди местных жителей и туристов. По типу питания треска относится к бентопелагическим демерсальным рыбам, живущим и питающимся как у дна, так и в средних слоях воды. Основу рациона атлантической трески в молодом возрасте составляет планктон, по мере роста рыб доля планктона в их рационе снижается, его место занимает молодь донных рыб, а также ряд пелагических планктоноядных рыб (Питание и некоторые..., 2001).

В организм рыб МП может попадать как напрямую, так и в составе зоопланктона, содержащего его частицы в тканях (Microplastic ingestion by..., 2013). В последние несколько лет проведен ряд исследований, направленных на обнаружение и анализ состава МП в содержимом ЖКТ атлантической трески (Plastic ingestion by..., 2016). В модельных экспериментах с атлантической треской, получавшей порошок полиэтилена вместе с кормом, описаны нарушения ее физиологических и репродуктивных функций, а также трофической активности (Effects of weathered..., 2023).

Проведена оценка количественных показателей МП и идентификация его частиц, обнаруженных в ЖКТ десяти особей атлантической трески, выловленных в прибрежной зоне российской части Баренцева моря вблизи пос. Дальние Зеленцы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вылов взрослых особей атлантической трески проводили на глубинах 40-90 м с борта маломерных судов с использованием средств любительского лова в рамках стандартной туристической квоты. Суда при этом располагались в радиусе 200 м вокруг точки с координатами 69,1468° N, 36,0757° E. Исследованная выборка состояла из десяти особей рыб, имеющих длину от 19,8 до 34,1 см и массу от 72,6 до 432,5 г (см. таблицу).

В полевых условиях производили диссекцию рыб и извлечение образцов ЖКТ, которые фиксировали в 70 %-ном этаноле. В лаборатории ЖКТ промывали дистиллированной водой, вскрывали, подвергали ультразвуковой обработке, его содержимое переносили в чистую стеклянную тару. Дальнейшую пробоподготовку и анализ проводили в соответствии с протоколом NOAA. Он включал окисление органических остатков реактивом Фентона, последующее плотностное разделение и перенос аналита на сетчатые фильтры из нержавеющей стали с размером ячеек 40 мкм. Анализ фильтров проводили с использованием бинокулярного микроскопа с рабочим увеличением $\times 10$ и $\times 40$. Нижний предел визуального обнаружения частиц МП в этом случае составлял 200 мкм. Определение состава частиц проводили с помощью ИК-Фурье спектроскопии на приборе Perkin Elmer Spectrum One, оснащенный приставкой для измерений в режиме нарушенного полного внутреннего отражения (Universal ATR Accessory). Из-за технических ограничений, свойственных данному прибору, спектральный анализ МП с линейным размером менее 3 мм был затруднен, вследствие чего удалось определить состав только трех из четырнадцати обнаруженных частиц. Остальные отнесены к МП по визуальным признакам или по итогам теста горячей иглы, все спорные исключены из анализа. Параметры каждой частицы (форму, цвет, максимальный линейный размер) вносили в базу данных.

Все работы проводили в пылезащищенных боксах с использованием хлопчатобумажной защитной одежды. Контроль загрязнения осуществляли посредством анализа «пустых» фильтров, экспонированных в рабочем пространстве бокса в течение всего времени анализа, а также посредством повторного анализа смыва ЖКТ, который обрабатывали параллельно с экспериментальными образцами. Этот анализ включал те же этапы, что и обработка экспериментальных проб.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Частицы МП были обнаружены в шести из десяти исследованных образцов ЖКТ в количестве от одной до пяти, в среднем $1,4 \pm 0,52$ частиц на одну особь. Суммарно в десяти пробах ЖКТ выявлено 14 частиц МП (см. таблицу). Корреляции между размером обследованных особей и количеством частиц МП в ЖКТ отмечено не было. В контрольных («пустых») фильтрах, экспонированных для контроля их возможного загрязнения, частицы МП не обнаружены.

Распределение частиц МП в выборке и характеристики исследованных особей

Номер образца	Количество частиц МП	Масса особи трески, г	Длина особи трески, см
1	2	258,4	29,5
2	5	337,5	32,8
3	0	308,6	29,8
4	1	235,4	28,8
5	2	344,9	31,3
6	1	370,3	32,0
7	0	432,5	34,1
8	0	272,4	28,8
9	3	387,0	33,0
10	0	72,6	19,8

Линейные размеры выделенных частиц варьировали от 0,21 до 3,84 мм, на этом основании все они были отнесены к категории МП. В общей выборке преобладали частицы с линейным размером 0,5-1 мм (43 %) (рис. 1). Суммарная масса выделенного МП оказалась ниже предела чувствительности использованных аналитических весов (<0,0002 г).

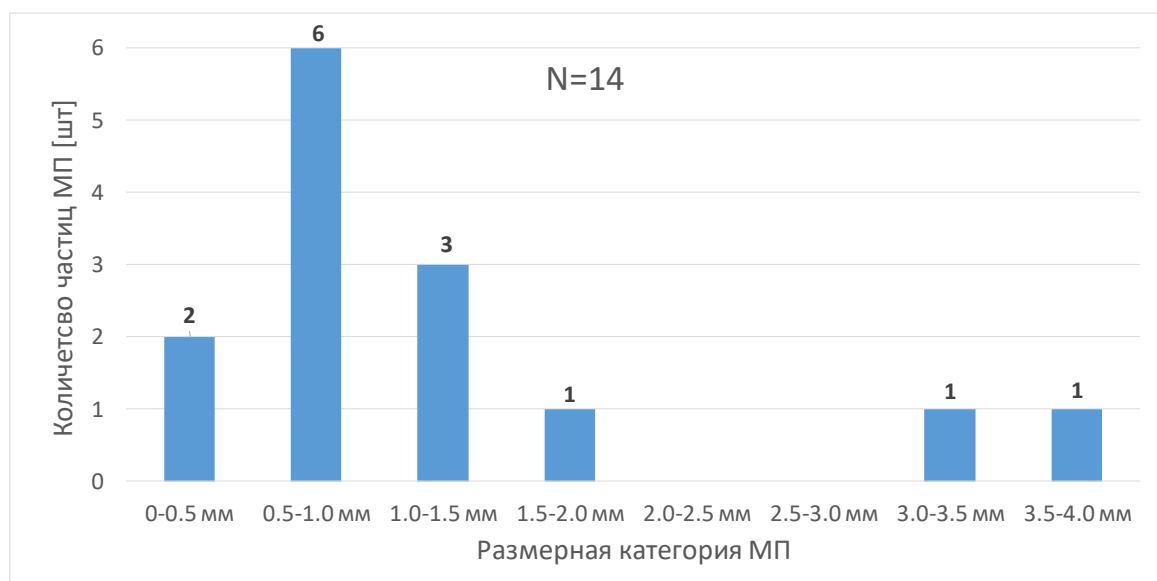


Рис. 1. Количество и размеры частиц микропластика, обнаруженных в желудочно-кишечном тракте атлантической трески

В составе МП преобладали фрагменты неопределенной формы (далее – фрагменты) (50 %), также были отмечены волокна (21,4 %), пленки (14,3 %) и частицы краски (14,3 %) (рис. 2, 3).

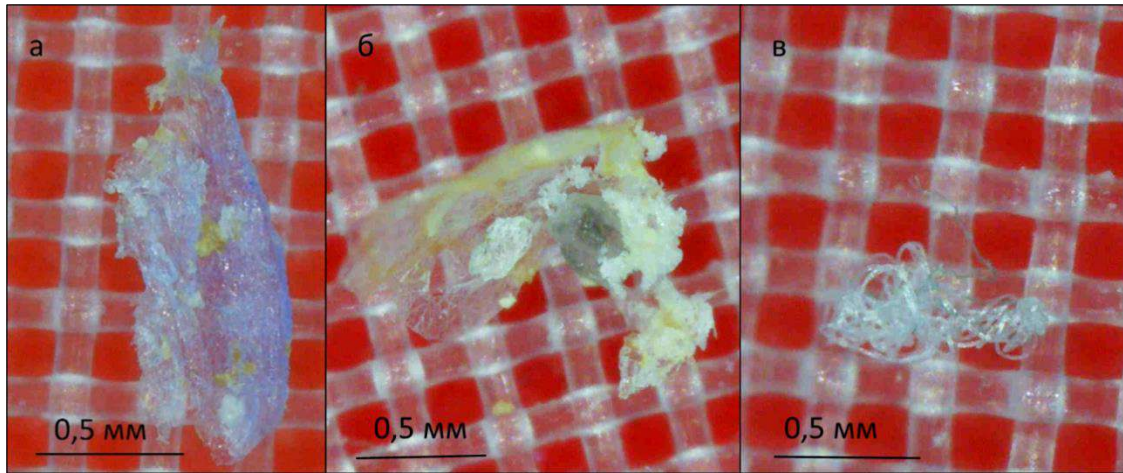


Рис. 2. Общий вид частиц микропластика, обнаруженных в желудочно-кишечном тракте атлантической трески: а – пленка (полипропилен); б – фрагмент неопределенной формы (полипропилен); в – волокна (полиэфир)

Наибольшее разнообразие форм частиц МП в одной пробе ЖКТ отмечено для образца № 2 (см. рис. 3), в котором обнаружено его максимальное суммарное количество. В этом образце были выявлены фрагменты МП, волокна и частицы краски, причем последние присутствовали только в этой пробе ЖКТ.

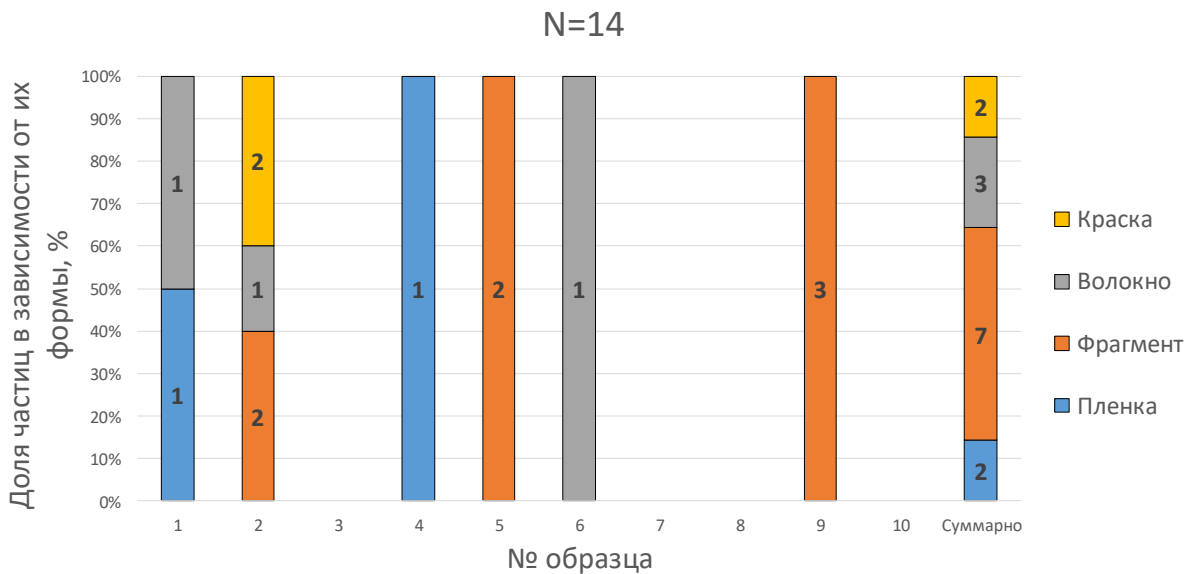


Рис. 3. Относительное количество (%) частиц микропластика различной формы, обнаруженных в желудочно-кишечном тракте атлантической трески

В образце ЖКТ № 1 обнаружено два типа частиц (пленка и волокно). В остальных четырех образцах присутствует МП только одного типа (пленка, фрагменты или волокна в количестве от одного до трех). Такое

распределение формально могло бы указывать на индивидуальные предпочтения отдельных особей в поглощении определенных типов МП, однако для подобного вывода размер исследованной выборки, очевидно, недостаточен.

Что касается распределения МП по цветности, то в выборке преобладали прозрачные частицы (71,4%), также были отмечены частицы синего (7,1%), белого (7,1%), черного (7,1%) и зеленого (7,1%) цветов (рис. 4).

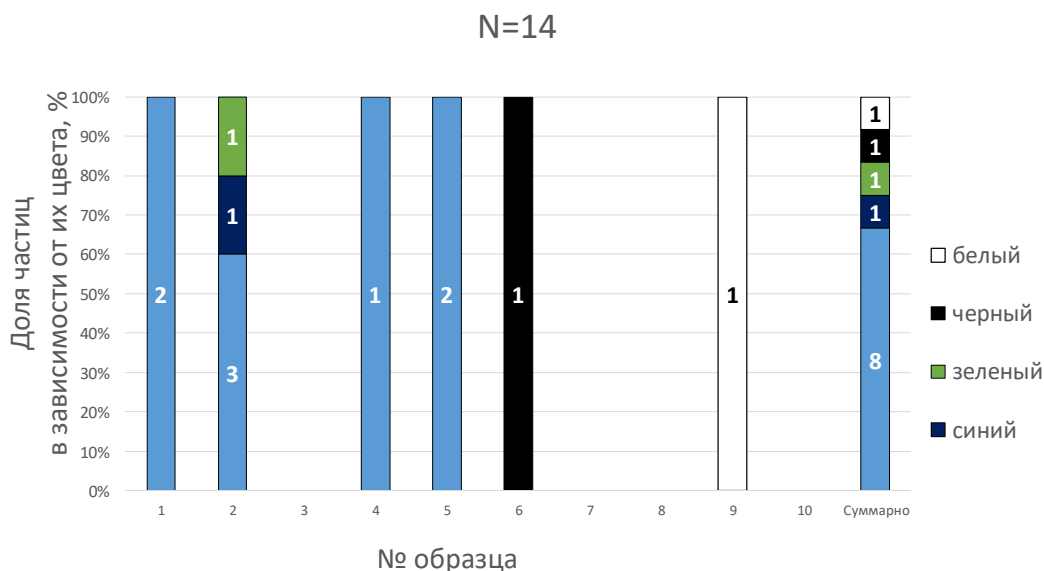


Рис. 4. Относительное количество (%) частиц микропластика разной цветности, обнаруженное в желудочно-кишечном тракте атлантической трески

Прозрачные частицы, относящиеся к наиболее многочисленной цветовой категории МП, обнаружены в четырех из шести образцов, в количестве от одной до трех. Максимальное количество прозрачных частиц отмечено в образце № 2, в котором также наблюдалось и максимальное суммарное количество частиц МП. Частицы других цветов были отмечены в трех из шести образцов в количестве не более одной каждого цвета. Максимальное разнообразие цветов (три) также отмечено в образце № 2. Наблюдаемое распределение свидетельствует, вероятно, об отсутствии избирательного поглощения отдельными особями рыб частиц определенных цветов. Преобладание бесцветных частиц МП в ЖКТ трески ранее было также отмечено в исследовании (Plastic ingestion by..., 2016).

Две частицы (фрагмент и пленка), состав которых был определен методом спектрального анализа, относились к полипропилену, еще одна (волокно) – к полиэфиру. Примечательно, что полипропилен имеет положительную плавучесть, однако был обнаружен в ЖКТ рыбы, которая кормится в водной толще или у дна. Вероятно, это связано с биологическим обрастанием частиц, которое приводит к потере ими плавучести и,

соответственно, к погружению в более глубокие слои воды, где поглощение такого МП треской становится возможным.

Атлантическая треска (*Gadus morhua*), как известно, относится к категории хищных рыб, поэтому ее трофическое поведение включает процессы идентификации, преследования и захвата добычи. В нашей работе исследованы взрослые особи трески, чей рацион включает молодь камбалы, тресковых, нерейд, в большинстве своем объекты питания имеют размеры более одного сантиметра. Маловероятно, что треска осознанно воспринимает в качестве потенциальной добычи частицы МП в обнаруженном нами размерном диапазоне, пусть даже и со значительным уровнем их биологического обрастания. Скорее всего, эти частицы МП попадают в организм рыбы случайно, т.е. в процессе питания непосредственно из воды вместе с пищей или в составе организмов ее жертв. Попадание частиц МП в ротовую полость и далее в ЖКТ через жаберный аппарат также представляется возможным, что может косвенно указывать на случайный характер их поглощения рыбами.

В ряде других исследований (Plastic ingestion by..., 2016; Analysis of microplastic..., 2016) представлены значительно более низкие показатели поглощения частиц пластика атлантической треской, однако существующие различия методов его обнаружения существенно усложняют прямое сравнение. В исследованной выборке особей трески, выловленной в Баренцевом море у побережья Норвегии, 3 % рыб содержали в ЖКТ частицы пластика (Plastic ingestion by..., 2016), однако в упомянутом исследовании рассматривался только МП размером от 3,2 мм и более, в то время как в нашей работе большинство обнаруженных частиц имело размеры менее 2 мм (см. рис. 1). В силу более высокой чувствительности использованного нами метода они составили основную долю обнаруженного МП.

В то же время в более раннем исследовании (Plastic ingestion by..., 2010), в котором рассматривали показатели поглощения пластика планктоядными рыбами в зоне Северного тихоокеанского мусорного пятна и при этом учитывали частицы МП размером менее 1 мм, было показано присутствие последних в ЖКТ у 35 % исследованных особей рыб. Обнаруженное при этом количество частиц МП в ЖКТ рыб составило $2,10 \pm 5,78$ на одну особь. Таким образом, полученные данные при сравнительно небольшом объеме исследованной выборки оказались сопоставимы с показателями, наблюдаемыми у других видов рыб в одной из наиболее загрязненных пластиком зон Мирового океана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно данным, полученным в исследовании, присутствие частиц МП в ЖКТ было обнаружено у 60 % исследованных особей атлантической трески. Эти данные значительно превышают аналогичные показатели, приведенные другими исследователями для атлантической трески из Баренцева моря. Подобные различия могут быть связаны с разной чувствительностью применяемых для обнаружения МП методов. Тем не менее данные о доле в составе выборки особей рыб, у которых обнаружено присутствие пластика в ЖКТ, могут быть интерпретированы как высокие. Характеристики обнаруженного пластика свидетельствуют о том, что процесс его поглощения рыбами имеет, вероятно, случайный характер.

Анализ содержимого ЖКТ атлантической трески является только первым шагом к пониманию проблемы воздействия пластикового загрязнения на этот ценный промысловый вид. Для более полной оценки экологических рисков в этом случае необходимы дальнейшие исследования, включающие анализ присутствия микро- и нанопластика в тканях рыб. Не менее важно продолжить изучение гидробионтов – представителей всех уровней трофической цепи, в пределах которой частицы пластика, подобно некоторым другим поллютантам, способны передаваться с нижних уровней на высшие.

Работы по пробоподготовке и анализу проб были выполнены в рамках Государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема № 121032300131-9). Обработка полученных данных проведена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-44.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Исследование влияния наночастиц пластика на представителей фито- и зоопланктона / А.М. Лазарева, А.Н. Рак, В.И. Ипатова [и др.]. – DOI:10.25791/esip.11.2023.1413 // Экологические системы и приборы. – 2023. – Т. 11. – С. 45-56.

Питание и некоторые черты экологии тресковых рыб западной части Берингова моря в летне-осенний период / В.В. Напазаков, В.И. Чучукало, Н.А. Кузнецова [и др.] // Известия ТИНРО. – 2001. – Т. 128, № 1-3. – С. 907-928.

Analysis of microplastic in the stomachs of herring and cod from the North Sea and Baltic Sea / R. Lenz, K. Enders, S. Beer [et al.] // Naturstyrelsen. – 2016. – Vol. 12, Iss. 1. – P. 1-21.

Effects of weathered polyethylene microplastic ingestion on sexual maturation, fecundity and egg quality in maturing broodstock Atlantic cod *Gadus morhua* / M. Fernández-Míguez, V. Puvanendran, E. Burgerhout [et al.]. – DOI 10.1016/j.envpol.2023.121053 // *Environmental Pollution*. – 2023. – Vol. 320. – Art. 121053.

Marine mammals and microplastics: A systematic review and call for standardisation / L.J. Zantis, E.L. Carroll, S.E. Nelms [et al.]. – DOI 10.1016/j.envpol.2020.116142 // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 269. – Art. 116142.

Microplastic Ingestion by Zooplankton / M. Cole, P. Lindeque, E. Fileman, [et al.]. – DOI 10.1021/es400663f // *Environmental Science & Technology*. – 2013. – Vol. 47, Iss. 12. – P. 6646-6655.

Microplastic interactions with North Atlantic mesopelagic fish / A.L. Lusher, C. O'Donnell, R. Officer [et al.]. – DOI 10.1093/icesjms/fsv241 // *ICES Journal of Marine Science*. – 2016. – Vol. 73, Iss. 4. – Art. 1214-1225.

Microplastics in marine mammal blubber, melon & other tissues: Evidence of translocation / G.B. Merrill, L. Hermabessiere, C.M. Rochman [et al.]. – DOI 10.1016/j.envpol.2023.122252 // *Environmental Pollution*. – 2023. – Vol. 335, Iss. April. – Art. 122252.

Plastic ingestion by Atlantic cod (*Gadus morhua*) from the Norwegian coast / I.L.N. Bråte, D.P. Eidsvoll, C.C. Steindal [et al.]. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2016.08.034 // *Marine Pollution Bulletin*. – 2016. – Vol. 112, Iss. 1-2. – P. 105-110.

Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre / C.M. Boerger, G.L. Lattin, S.L. Moore [et al.]. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2010.08.007 // *Marine Pollution Bulletin*. – 2010. – Vol. 60, Iss. 12. – Art. 2275-2278.

Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea / M. Eriksen, L.C.M. Lebreton, H.S. Carson [et al.]. – DOI 10.1371/journal.pone.0111913 // *PLoS ONE*. – 2014. – Vol. 9, Iss. 12. – Art. e111913.

Report of the Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea / E. Bagøien, B. Bogstad, A.A. Chetyrkin [et al.]. – DOI org/10.17895/ices.pub.8615 // *ICES*, 2017.

The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation / A. Cózar, E. Martí, C.M. Duarte [et al.]. – DOI 10.1126/sciadv.1600582 // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 1-9.

Van Sebille, E. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters / E. Van Sebille, M.H. England, G. Froyland // *Environmental Research Letters*. – 2012. – Vol. 7, Iss. 4. – Art. 044040.

Vázquez-Rowe, I. Microplastics in fisheries and aquaculture: implications to food sustainability and safety / I. Vázquez-Rowe, D. Ita-Nagy, R. Kahhat. – DOI 10.1016/j.cogsc.2021.100464 // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. – 2021. – Vol. 29. – Art. 100464.

Wright, S.L. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review / S.L. Wright, R.C. Thompson, T.S. Galloway. – DOI 10.1016/j.envpol.2013.02.031 // Environmental pollution. – 2013. – Vol. 178. – P. 483-492.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА СОСТОЯНИЕ ЗАПАСОВ ГОРБУШИ *ONCORHYNCHUS GORBUSCHA* И КЕТЫ *ONCORHYNCHUS KETA* В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ЧУКОТСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

С.Л. Марченко

*Всероссийский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), г. Москва*

Аннотация. Рассмотрено влияние климатического сдвига на состояние запасов горбуши и кеты в водных объектах Чукотского автономного округа. Показано, что в становлении запасов видов ведущую роль играют региональные факторы среды, которые могут как повторять тренд глобального сдвига климата, так и отличаться от него. Причиной обвального падения вылова горбуши и кеты в 2023 г. стали экстремальные значения лимитирующих факторов в пресноводный и ранний морской периоды жизни.

Ключевые слова: горбуша, кета, Чукотка, факторы среды, вылов, потепление климата.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальный климатический сдвиг во второй половине XX в. наибольшей интенсивностью характеризовался в северных широтах, в том числе в арктической зоне Дальнего Востока России (Шкаберда, Василевская, 2013; An ensemble data..., 2019; Timmermans, Labe, 2023; Surface Air Temperature, 2023). Он прослеживался как по росту среднегодовой температуры воздуха и расширению периода вегетации, так и по изменению объема атмосферных осадков. Под воздействием климатических факторов на суше деградировали многолетнемерзлые породы, возрастали мощность сезонно-талого слоя и накопление органического материала, повышалась влажность почв, увеличивались высота и проективное покрытие растительности, а также вырос дебит водных объектов и речной сток. В северных морях сократилась площадь льдов и изменились характеристики течений. Перестройка окружающей среды отразилась на продуктивности, распределении и видовом составе биоты (Вековые изменения в..., 2004; Конищев, 2009; Васильев, Дроздов, Москаленко, 2008; Кириллова, Кириллов, Павлов, 2014; Титкова, Виноградова, 2015, 2019; Лепская, Бонк, Дубынин, 2017; Им, Харук, Ли, 2020; Современные тренды популяций..., 2023; Climate change and..., 2015; Climate change drives..., 2020; Intensification and poleward..., 2016; Body condition of..., 2020; High sensitivity of..., 2020; Lewis, van Dijken, Arrigo, 2020), в том числе на состоянии запасов тихоокеанских лососей в отдельных

регионах. В частности, на фоне потепления климата их запасы деградировали в южных частях ареалов, но возросла численность подходов северных стад (Марченко, 2021; Response of Pink..., 2020; Trophic responses of..., 2020).

В 2023 г. рост среднегодовой глобальной температуры продолжился, и она превысила среднемноголетнюю глобальную температуру для 1850-1900 гг. на 1,54 °С (среднегодовая температура суши выросла на 2,10 °С, океана – 1,10 °С). В результате 2023 г. стал самым теплым годом за весь период наблюдений. К наиболее теплым в общем ряду наблюдений также относятся 2015-2022 гг. Среднегодовая глобальная температура каждого из них превышает среднемноголетнюю глобальную температуру для 1850–1900 гг. на 1,2 °С и более.

На фоне продолжающегося потепления климата логичным было ожидание нарастания запасов и, соответственно, увеличения вылова тихоокеанских лососей на северной периферии их ареалов, однако в 2023 г. в арктических районах Дальнего Востока России и Аляски (США) результаты лососевой путины не достигли прогнозных оценок и были значительно ниже объемов добычи в предыдущий год (Марченко, 2024).

Цель настоящей работы – анализ влияния изменения климата на состояние запасов горбуши и кеты в водных объектах Чукотского автономного округа и оценка вероятных причин снижения их вылова в 2023 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основу исследования воздействия изменения климата на состояние запасов горбуши и кеты в водных объектах Чукотского автономного округа положено представление о том, что условия существования данных видов в пресноводный и ранний морской периоды определяются главным образом термическим и водным режимами.

В Чукотском автономном округе основу вылова горбуши и кеты формируют стада, воспроизводящиеся в реках бассейна Анадырского лимана, и в первую очередь в р. Анадырь. По этой причине для анализа метеорологической информации была выбрана метеостанция Марково (ID 25551). Результаты метеонаблюдений на станции о-ва Врангеля (ID 21982) были привлечены для оценки условий, позволивших горбуше проникнуть в водные объекты острова.

Информация о прогнозируемом и фактическом вылове горбуши и кеты в Чукотском автономном округе получена с официального сайта Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (<http://www.vniro.ru/ru/>, дата обращения 22.02.2024), сведения

о динамике вылова – из путинного прогноза (Лососи – 2023..., 2023), а также из архива МагаданНИРО, обобщенного автором в период работы в институте.

Сведения о гидрометеорологических условиях получены из архивов, находящихся в свободном доступе в Интернете:

– температура воздуха и почвы, а также уровень осадков для метеостанций о-ва Врангеля и Марково – с сайта ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Булыгина, Коршунова, Разуваев, 2014), для 2023 г. – с сайта Расписание погоды rp5 (<https://rp5.ru>, дата обращения 22.02.2024);

– аномалия глобальной температуры в 1951-2023 гг. – с сайта Службы Европейского союза по изменению климата Copernicus (Copernicus Climate Change Service (<https://climate.copernicus.eu/>, дата обращения 22.02.2024);

– температура поверхности моря (ТПМ) – с сайта Национального управления океаническими и атмосферными исследованиями (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, <https://ncdc.noaa.gov>, дата обращения 22.02.2024);

– ледовитость морей – с сайта Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC) (<https://nsidc.org/home>, дата обращения 22.02.2024);

– уровень воды в реках – с сайта Уровня воды онлайн (AllRivers) (<https://allrivers.info>, дата обращения 22.02.2024).

В картографическом пакете ArcGIS:

– при помощи макросов, написанных автором в ModelBuilder ArcGIS, из netCDF-файлов¹ отобраны данные и построены распределения ТПМ и изотермы;

– подготовлены распределения льдов.

Продолжительность вегетационного сезона была принята равной периоду, в который среднесуточные температуры воздуха превышали 3 °С.

В электронных таблицах MS Excel, в том числе при помощи процедур, написанных автором в Visual Basic for Applications, построены графики и выполнена проверка достоверности корреляционных зависимостей.

Отбор, обобщение, обработка, визуализация и анализ данных выполнены автором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Со второй половины 1970-х годов и на протяжении последующего почти 40-летнего периода среднегодовая температура воздуха в районе метеостанции Марково и глобальная температура воздуха синхронно

¹ NetCDF (Network Common Data Form) – машинезависимый двоичный формат файлов, являющийся стандартом для обмена научными данными.

возрастали ($R^2 = 0,70$, $p < 0,001$). Максимального значения – минус 4,2 °С – среднегодовая температура воздуха на данной метеостанции достигла в 2016 г., и после этого проявилась тенденция к ее снижению. Глобальная температура сохранила тенденцию к росту и в 2023 г. достигла нового рекордного значения (рис. 1).

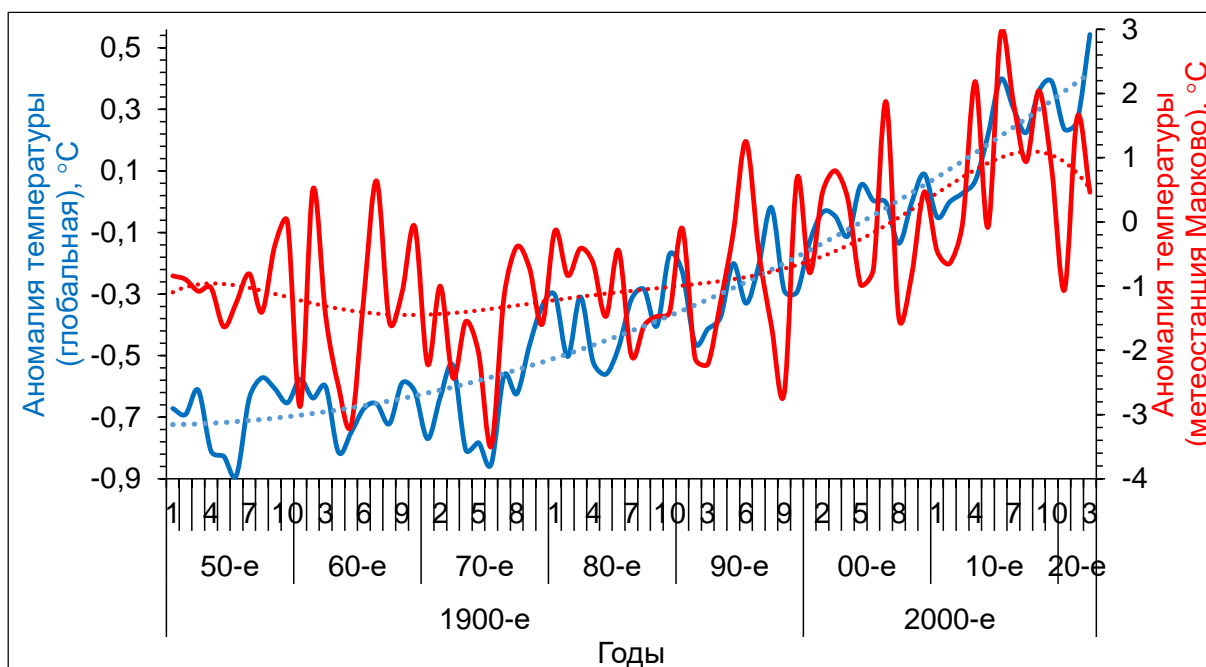


Рис. 1. Динамика аномалии глобальной и региональной (метеостанция Марково) температуры воздуха

Известно (Марченко, 2023; Response of Pink..., 2020), что состояние запасов тихоокеанских лососей тесно связано с термическим режимом. В этом отношении горбуша ряда нечетных лет и кета Чукотского автономного округа не являются исключением. Их уловы в XXI в. росли на фоне потепления климата и в конце 2010-х – начале 2020-х годов достигли максимума, превысив 3000 т. Региональное похолодание климата стало причиной снижения объемов добычи кеты в 2023 г. до 715 т, горбуши ряда нечетных лет – до 243 т (рис. 2). При этом негативное влияние внешних факторов среды проявлялось в виде снижения вылова с задержкой, равной длительности полового созревания рыб возрастных групп, составляющих основу репродуктивной части стада, т.е. ведущую роль в становлении запасов имели пресноводный и ранний морской периоды жизни.

На диаграммах рассеяния, отражающих зависимость уловов от термического режима (см. рис. 2), не все точки ложатся вдоль тренда, часть из них (выделены зеленым цветом) выпадает из общего облака. Кроме того, одной и той же средней температуре соответствуют разные объемы вылова. Эти особенности свидетельствуют о наличии дополнительных факторов,

влияющих на формирование численности и последующие уловы тихоокеанских лососей. Несмотря на это, термический режим относится к ключевым факторам, лимитирующим численность данной группы рыб, и наиболее наглядным примером этого является проникновение горбуши в водные объекты о-ва Врангеля. Ее первые относительно интенсивные подходы в крупные реки и лагуны острова были отмечены в 2008 и 2009 гг. (<https://www.tsuren.ru/news/ostrov-vrangelya/>, дата обращения 22.02.2024).

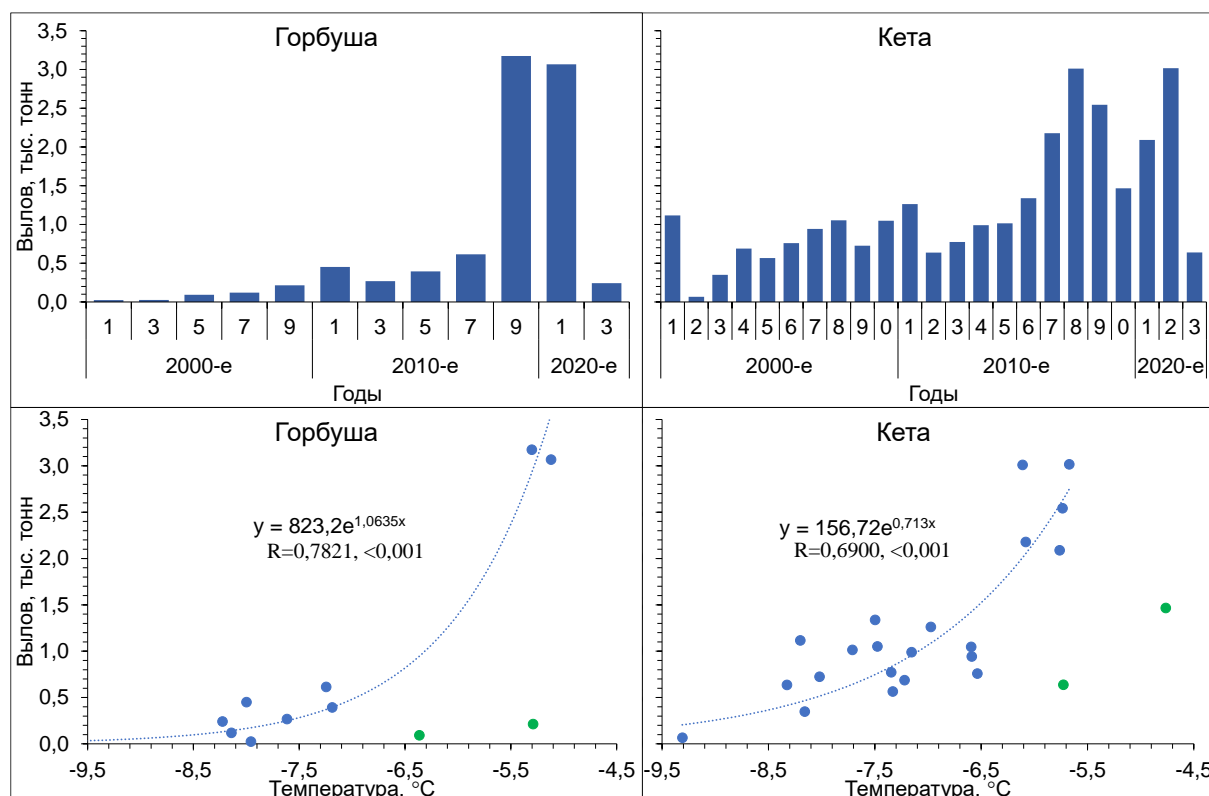


Рис. 2. Динамика вылова горбуши ряда нечетных лет и кеты в Чукотском автономном округе в XXI в. и зависимость объемов вылова от среднегодовой температуры воздуха в год нереста производителей

Появление горбуши в водных объектах острова отмечено на фоне повышения среднегодовой температуры воздуха, которая во второй половине 2000-х годов в районе метеостанции о-ва Врангеля достигла минус 6,5 °С (среднеголетняя для 1951-2000 гг. – минус 11,1 °С). Потепление климата сопровождалось расширением периода вегетации и ростом количества тепла, поступавшего на его протяжении. Так, если в 1951-2000 гг. вегетационный сезон, как правило, не превышал 4 пентады/год, а объем поступавшего тепла – 70 градусо-дней/год (в 1976-1980-х годах – 7 пентад/год и 115 градусо-дней/год), то в 2001-2005 и 2006-2010 гг. период вегетации расширился до 10 и 16 пентад/год соответственно, а объем поступавшего тепла увеличился до 201 и

339 градусо-дней/год соответственно (рис. 3). Тем не менее этого количества тепла недостаточно для завершения личиночного периода развития и перехода молоди горбуши в покатное состояние (Смирнов, 1975; Хованская, 2007; Effects of seeding..., 1980). В таких условиях натурализация горбуши в водных объектах о-ва Врангеля возможна только при поступлении на ее нерестилища тепла из иных источников, например ключей. В таком случае размножение горбуши происходит либо на ключевых нерестилищах, либо на нерестилищах смешанного типа, т.е. попадающих под отепляющее влияние грунтовых вод. В частности, горбуша, в недавнем прошлом колонизировавшая р. Пясина (Крупницкий, Устюгов, 1977; Заделенов, Званцев, Форина, 2019), для размножения в районе оз. Пясина использует ключевые нерестилища (Заделенов, личное сообщение).

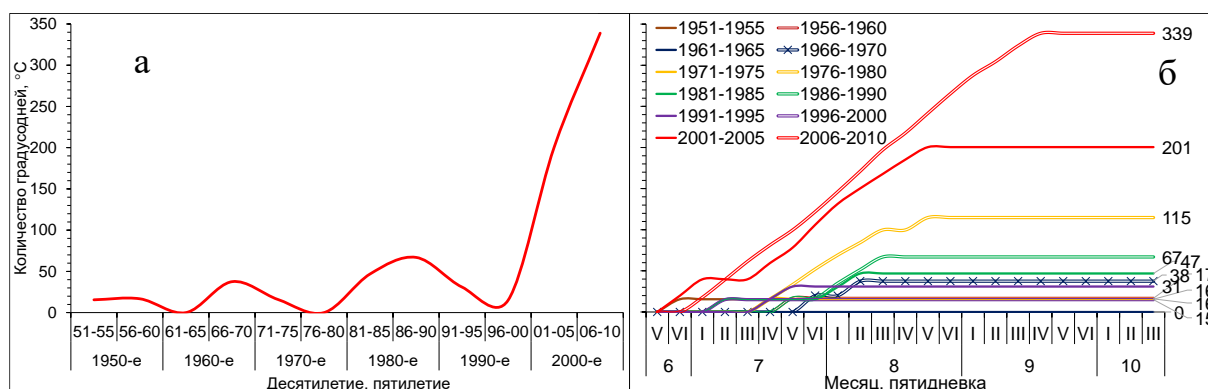


Рис. 3. Динамика количества тепла, поступившего в период вегетации за год (а), и его накопление в течение вегетационного сезона (б) на метеостанции о-ва Врангеля. Данные осреднены по пятилетиям

В отличие от о-ва Врангеля, в реках бассейна Анадырского лимана горбуша – постоянный компонент ихтиофауны (Берг, 1932), а с 2001 по 2019 г. ее численность значительно выросла, что прослеживалось по увеличению ее вылова в 134 раза – с 24 до 3174 т. В 2021 г. объем добычи незначительно снизился – до 3067 т (минус 3,4 % по сравнению с выловом 2019 г.), а в 2023 г. по сравнению с выловом 2021 г. обрушился в 12,6 раза – до 243 т.

Падение уловов горбуши в 2023 г. не было связано с неблагоприятными условиями в ранний морской период, в который, как известно (Варнавский, 1990; Карпенко, 1998), погибает большая часть покатников-сеголеток. В частности, несмотря на сохранение в середине июня 2022 г. в Анадырском лимане и прилежащих к нему водах Анадырского залива полей битого льда, поверхностные воды акваторий прогрелись до 2 и 3-5 °С соответственно (рис. 4). Температура воды в

Анадырском лимане была ниже пороговой для перехода молоди горбуши на интенсивное внешнее питание – 2,5-3,5 °С (Азбелев, Яковенко, 1963; Смирнов, 1975), но она нелетальна для молоди (Леванидов, 1955; Чебанова, 2002).

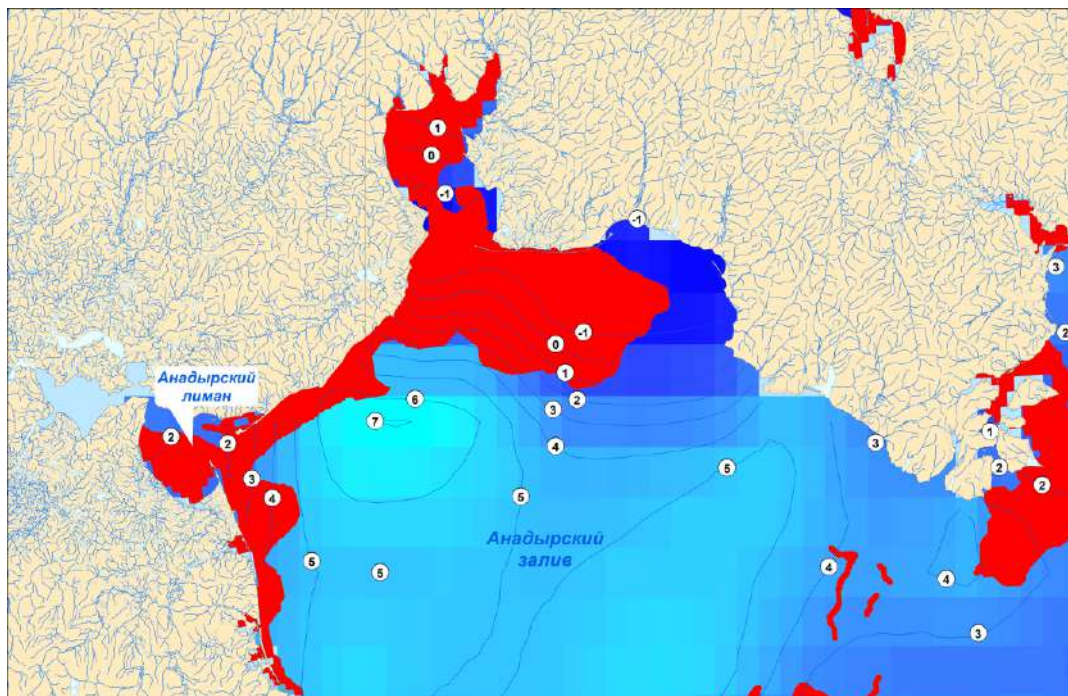


Рис. 4. Распределение ледовых полей (■) и ТПМ (цифры в белых кругах, °С) в Анадырском лимане и Анадырском заливе на 15.06.2022 г.

Большее влияние на становление численности горбуши поколения 2021 г. оказал гидрологический режим нерестовых рек, который в летний период года зависит от количества дождей. В 2021 г. с июля до конца теплого периода года суммарный уровень дождей в районе метеостанции Марково составил 121,6 мм, что на 35,6 % ниже среднемноголетней величины для пяти предыдущих циклических лет. Как следствие, уровень воды в р. Анадырь в летнюю и зимнюю межени был существенно ниже среднемноголетнего значения (рис. 5).

Малая водность р. Анадырь в 2021 г. была причиной сокращения площади нерестилищ горбуши, что при пропуске в реки порядка 5-6 млн особей (Лососи – 2023..., 2023) привело к формированию плотных скоплений производителей на локальных участках, однако горбуша не прекращает нерест даже при экстремально высокой плотности размножающихся рыб (до 15 пар/м²), а производители несколькими волнами сменяют друг друга на нерестилищах (Семко, 1939; Двинин, 1952; Бирман, 1964; Павлов, Савваитова, Кузищин, 2009). В данном случае снижение эффективности воспроизводства, по-видимому, было связано с

перекапыванием ранее построенных нерестовых бугров, в которых под влиянием механического воздействия погибала вся икра, не прошедшая процесс эпиболлии (Смирнов, 1975).

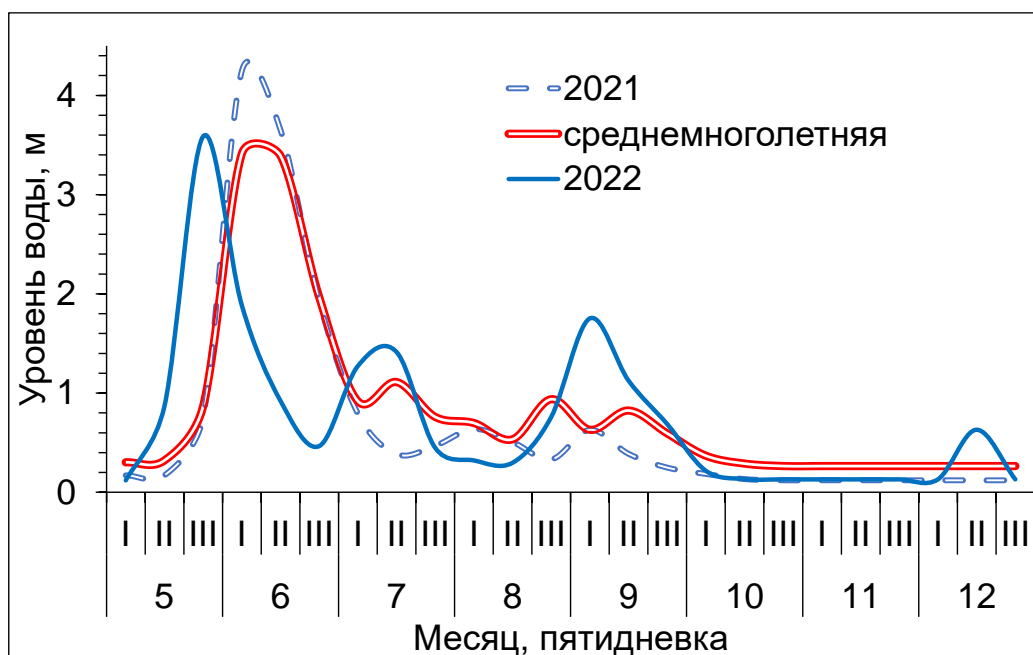


Рис. 5. Динамика уровня воды в р. Анадырь в мае-декабре 2021 и 2022 гг. и его среднемноголетняя величина для ряда нечетных лет в 2011-2019 гг.

В зимнюю межень экстремальное снижение уровня воды сопровождалось обсыханием и последующем промерзанием нерестовых бугров, что было причиной резкого роста смертности формирувавшегo поколения (Марченко, 2022). На участках нерестилищ, на которых речной сток в эмбрионально-личиночный период развития горбуши сохранился, дополнительной причиной низкой выживаемости поколения, по-видимому, стало ослабление интенсивности водообмена в грунте. В результате в нерестовых гнездах горбуши замедлялся транспорт растворенных в воде газов и накапливались продукты метаболизма, в том числе аммиак (Яржомбек, 1966, 1970; Rice, Stokes, 1975; Rice, Bailey, 1980; Effects of seeding..., 1980), к воздействию которого все тихоокеанские лососи крайне чувствительны (Яржомбек, 1970; Experiments with inorganic..., 1960). Протектором к токсину выступает астаксантин, но его содержание в икре горбуши низкое – 0,96-1,23 мг% (Яржомбек, 1970), и накопление аммиака в воде в условиях низкой интенсивности водообмена и высокой плотности нерестовых бугров приводит к росту смертности развивающейся икры и личинок. В частности, на примере горбуши Британской Колумбии показано,

что при уменьшении скорости подруслового потока с 2,7 до 1,1 см/с смертность икры возрастает в 2,3 раза (Wickett, 1958).

Высокая выживаемость поколения горбуши напрямую связана с подъемом на плав физиологически подготовленной к смене среды обитания молоди непосредственно к половодью фенологической весной или в период его прохождения. Транспортную силу речного потока покотники используют для быстрой миграции с нерестилищ на морское побережье, в котором переходят на интенсивное внешнее питание (Марченко, 2022).

Развитие рыб, в том числе горбуши, зависит от термического режима водных объектов (Смирнов, 1975; Хованская, 2007). Большую часть тепла, необходимого для достижения молодь физиологической готовности к смене среды обитания, горбуша получает в предзимний период, меньшую – фенологической весной, перед половодьем и в период его прохождения. Зимой, когда температура воды опускается до положительных значений, близких к 0 °С, ее развитие максимально замедляется.

Половодье на р. Анадырь выходит на максимум обычно в первой-второй декадах июня, однако в 2022 г. из-за раннего развития весенних процессов его пик был раньше – в третьей декаде мая (см. рис. 5). Это позволяет предположить, что речной поток выносил в морское побережье физиологически не подготовленную к смене среды обитания молодь. Экспериментальными работами показано, что 50 %-ная смертность таких покотников в морской воде с соленостью 31,8 ‰ наблюдается в течение 69-85 ч (Weisbart, 1968).

Часть молоди горбуши могла скатиться из рек уже после прохождения пика половодья фенологической весной. В таком случае скорость ее миграции на нагул в море была значительно меньше, и на внешнее питание она перешла уже в пресных водах, что свойственно молоди горбуши в условиях замедленного стока (Смирнов, 1975; Карпенко, 1998). При этом эффективность питания молоди до выхода в морское побережье не велика, так как плотность доступных кормовых объектов значительно ниже, чем в морском побережье. Учитывая, что выживаемость молоди всех тихоокеанских лососей напрямую зависит от обилия кормовых объектов (Ecosystem controls of..., 2001; Ecological processes influencing..., 2001; Higher marine survival..., 2005), переход покотной молоди видов с коротким пресноводным периодом жизни (горбуши, кеты) на внешнее питание до ската в море негативно сказывается на их выживаемости и является одной из причин формирования малоурожайных поколений. Наглядным примером этого служит горбуша, вселенная в реки Европейского Севера России, у которой низкой численностью часто характеризуются поколения, поднявшиеся на плав в сроки, отличные от сроков прохождения максимума

половодья фенологической весной, и перешедшие на внешнее питание в реках (Полиморфизм покатной молоди..., 2016).

В отличие от горбуши, возвраты которой представлены рыбами одного поколения, подходы кеты формируют несколько поколений. В частности, анадырская кета возвращается на нерест в возрасте от 2+ до 5+, а основу ее подходов (более 90 %) формируют четырех- и пятилетние особи.

В 2023 г. в возрасте 4+ на нерест вернулись рыбы поколения 2018 г., в возрасте 3+ – поколения 2019 г. Оба поколения в период покатной миграции попали под негативное влияние низких температур воды в Анадырском лимане и прилежащих к нему водах Анадырского залива в 2019 и 2020 гг. соответственно. При этом если в 2019 г. выхоложенные воды занимали главным образом Анадырский лиман, то в 2020 г. они также охватывали воды Анадырского залива, прилежащие к Анадырскому лиману (рис. 6).

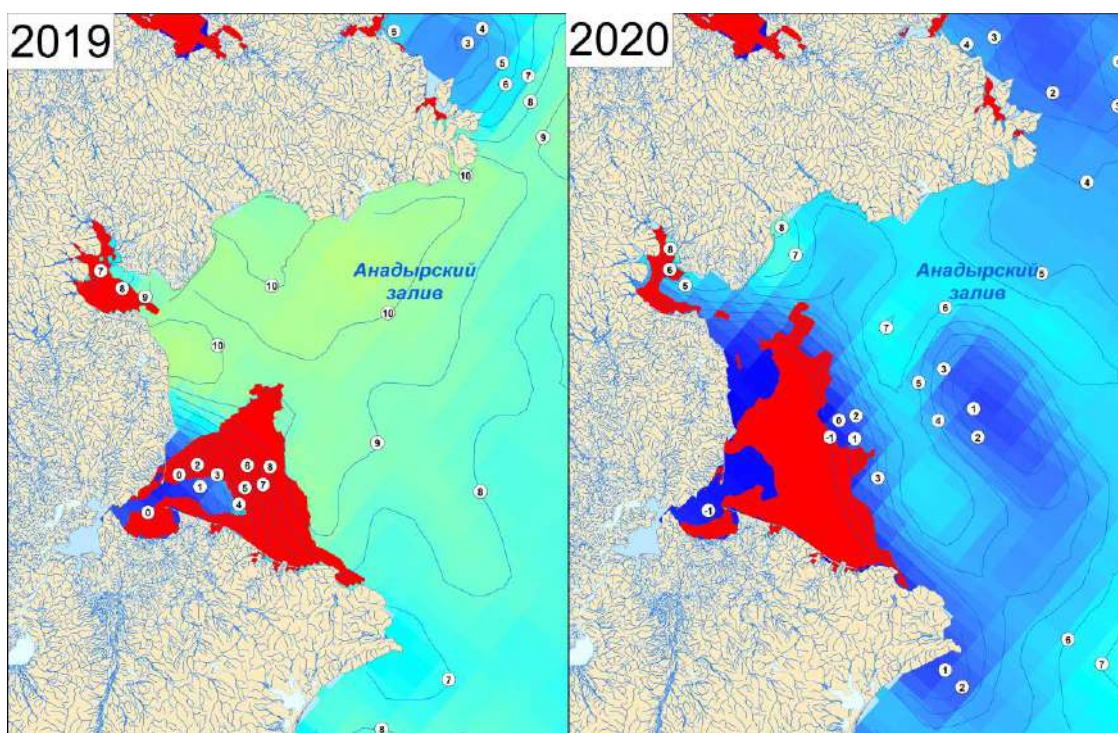


Рис. 6. Распределение ледовых полей (■) и ТММ (цифры в белых кругах, °С) в Анадырском лимане и Анадырском заливе на 15 июня в 2019 и 2020 гг.

Негативное влияние на выживаемость кеты поколений 2018 и 2019 гг. также оказал водный режим р. Анадырь. В 2019 г. в периоды нереста производителей кеты и эмбрионально-личиночного развития ее потомства уровень воды был ниже среднемноголетнего (рис. 7) и негативное влияние пониженного уровня воды на становление численности кеты, по-видимому, было аналогично таковому для горбуши.

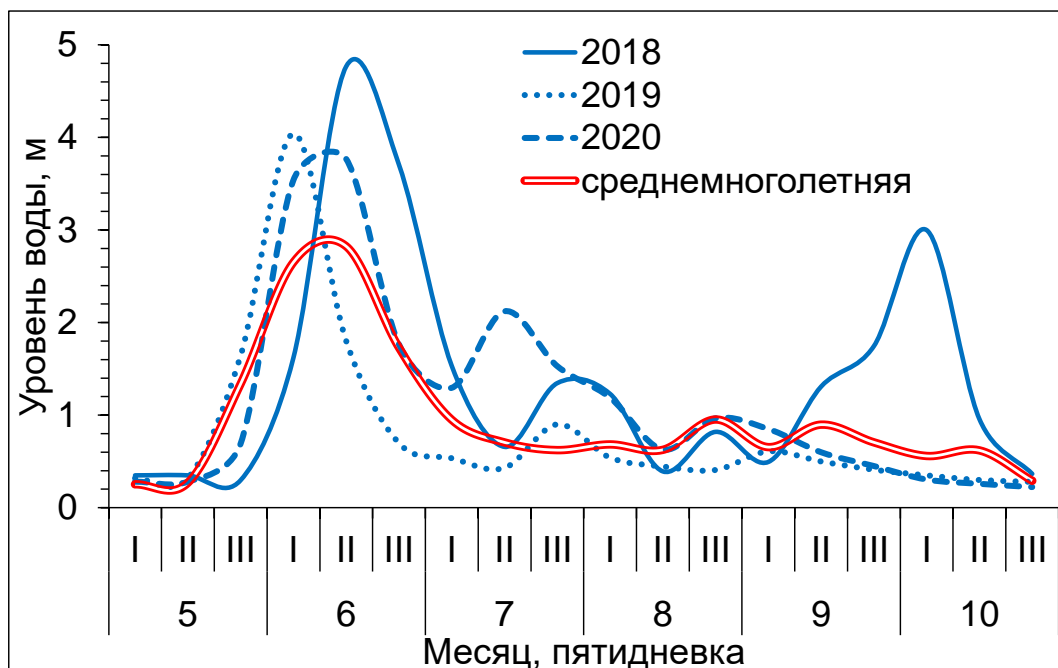


Рис. 7. Динамика уровня воды в р. Анадырь в мае-октябре 2018-2020 гг. и его среднемноголетняя величина в 2011-2019 гг.

Принципиально иной была ситуация в 2018 г. В конце сентября – начале октября 2018 г. на р. Анадырь прошел мощный дождевой паводок, в который уровень воды достиг 3,00 м (для сравнения, в период половодья фенологической весной 2018 г. уровень воды поднялся до 4,77 м) (см. рис. 7). Ко времени его прохождения развивающаяся икра кеты прошла критическую стадию развития и стала нечувствительна к механическому воздействию. В этом случае негативное влияние экстремально мощного осеннего паводка было связано с изменением морфологии речных русел, в ходе которого происходит механическое разрушение нерестилищ, что сопровождается массовой гибелью икры. Негативное влияние мощного осеннего паводка, вызванного обильными дождями, описано на примере горбуши северо-восточного побережья Сахалина (Марченко, 2023). Этот паводок был причиной более чем пятикратного снижения уловов горбуши в 2017 г. по сравнению с 2015 г.

Дополнительными факторами, негативно повлиявшими на численность анадырской кеты поколений 2018 и 2019 гг., по-видимому, были мощные половодья фенологической весной в 2019 и 2020 гг., когда уровень воды превысил среднемноголетнюю величину на 34 и 25 % соответственно (см. рис. 7). Ранее лимитирующее влияние экстремальных паводков фенологической весной было показано на примере горбуши Магаданской области (Волобуев, Марченко, 2011; Марченко, 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опираясь на проведенное исследование, можно с определенной долей уверенности говорить о тесной связи изменения уловов горбуши ряда нечетных лет и кеты в водных объектах Чукотского автономного округа с климатическими условиями, при этом в формировании запасов этих рыб ведущую роль играют региональные факторы, которые могут как повторять тренд глобального сдвига климата, так и отличаться от него.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Азбелев, В.В. Материалы по акклиматизации горбуши в бассейне Баренцева и Белого морей / В.В. Азбелев, А.А. Яковенко // Труды ПИНРО. – 1963. – Вып. 15. – С. 7-26.

Берг, Л.С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. Часть 1 / Л.С. Берг. – Л.: ВНИОРХ, 1932. – 543 с.

Бирман, И.Б. Некоторые данные к исследованию локальных стад и расового состава камчатской кеты / И.Б. Бирман // Вопросы географии Камчатки. – 1964. – Вып. 2. – С. 82-87.

Булыгина, О.Н. Специализированные массивы данных для климатических исследований / О.Н. Булыгина, Н.Н. Коршунова, В.Н. Разуваев // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. – 2014. – № 177. – С. 136-148.

Варнавский, В.С. Смолтификация лососевых / В.С. Варнавский. – Владивосток: ДВО РАН, 1990. – 180 с.

Васильев, А.А. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата / А.А. Васильев, Д.С. Дроздов, Н.Г. Москаленко // Криосфера Земли. – 2008. – Т. 12, № 2. – С. 10-18.

Вековые изменения в составе и числе рыб-южных мигрантов в ихтиофауне северо-западной части Японского моря / А.С. Соколовский, Т.Г. Соколовская, И.В. Епур [и др.] // Известия ТИНРО. – 2004. – Т. 136. – С. 41-57.

Волобуев, В.В. Тихоокеанские лососи континентального побережья Охотского моря (биология, популяционная структура, динамика численности, промысел) / В.В. Волобуев, С.Л. Марченко. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2011. – 303 с.

Двинин, П.А. Лососи Южного Сахалина / П.А. Двинин // Известия ТИНРО. – 1952. – Т. 37. – С. 69-108.

Заделенов, В.А. Рыбы бассейна р. Пясины / В.А. Заделенов, В.В. Званцев, Ю.Ю. Форина // Современное состояние водных биоресурсов: Материалы, 2019. – С. 77-80.

Им, С.Т. Миграция северной границы вечнозелёных хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии / С.Т. Им, В.И. Харук, В.Г. Ли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 176-187.

Карпенко, В.И. Ранний морской период жизни тихоокеанских лососей / В.И. Карпенко. – М.: Изд-во ВНИРО, 1998. – 165 с.

Кириллова, Е.А. Изменения структуры ихтиофауны Курильского озера (южная Камчатка) / Е.А. Кириллова, П.И. Кириллов, Д.С. Павлов // Чтения памяти В.Я. Леванидова. – Владивосток: Дальнаука, 2014. – Вып. 6. – С. 301-310.

Конищев, В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата / В.Н. Конищев // Вестник Московского университета. – 2009. – Серия 5. География. – № 4. – С. 10-20.

Крупницкий, Ю.Г. Горбуша *Oncorhynchus gorbuscha* (Walb.) в реках севера Красноярского края / Ю.Г. Крупницкий, А.Ф. Устюгов // Вопросы ихтиологии. – 1977. – Т. 17, № 2. – С. 360-363.

Леванидов, В.Я. Питание и рост мальков кеты в пресных водах / В.Я. Леванидов. // Зоологический журнал. – 1955. – Т. 34, вып. 2. – С. 371-379.

Лепская, Е.В. К вопросу об оптимуме нерестового пропуска в озеро Курильское в связи с направленностью экосистемных процессов в нем в последнее десятилетие / Е.В. Лепская, Т.В. Бонк, В.А. Дубынин // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-запада Тихого океана. 2017. – Вып. 44. – С. 16-30.

Лососи – 2023 (путинный прогноз). – Владивосток: ТИНРО, 2023. – 104 с.

Марченко, С.Л. Тихоокеанские лососи в условиях глобального изменения климата / С.Л. Марченко // Вопросы рыболовства. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 63-74. – DOI 10.36038/0234-2774-2021-22-4-63-74.

Марченко, С.Л. Горбуша *Oncorhynchus gorbuscha* (Salmoniformes, Salmonidae) материкового побережья Охотского моря. Сообщение 1. Производители / С.Л. Марченко // Изв. ТИНРО. – 2022. – Т. 202, вып. 4. – С. 741-773.

Марченко, С.Л. Роль отдельных факторов среды в формировании численности горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* / С.Л. Марченко // Лососевые рыбы: биология, воспроизводство, промысел: материалы всероссийской научно-практической конференции (г. Мурманск, 23-24 марта 2023 г.). – Мурманск: ПИНРО, 2023. – С. 268-285.

Марченко, С.Л. Итоги лососевой путины в северной части Тихого океана и сопредельных водах Северного Ледовитого океана в 2023 году / С.Л. Марченко // Бюл. № 18 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. – Владивосток: ТИНРО, 2024. – С. 3-14.

Павлов, Д.С. Жизненные стратегии и экологические механизмы формирования внутривидового разнообразия у лососевых рыб / Д.С. Павлов, К.А. Савваитова, К.В. Кузищин // Тез. докл. 10 съезда Гидробиологического общества при РАН. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – С. 302-303.

Полиморфизм поклатной молодежи горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* в реке Индера (Кольский полуостров) / А.Е. Веселов, Д.С. Павлов, И.А. Барышев [и др.] // Вопросы ихтиологии. – 2016. – Т. 56, № 5. – С. 571-576

Семко, Р.С. Камчатская горбуша / Р.С. Семко // Известия ТИНРО. – 1939. – Т. 16. – 111 с.

Смирнов, А.И. Биология, размножение и развитие тихоокеанских лососей / А.И. Смирнов. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 334 с.

Современные тренды популяций стерха (*Grus leucogeranus*) и канадского (*Grus canadensis*) журавля (Gruidae, Gruiformes) в тундрах Якутии и Чукотки по данным авиаучетов / С.Б. Розенфельд, И.П. Бысыкатова-Харми, Д.А. Барыкина [и др.] // Зоологический журнал. – 2023. – Т. 102, № 2. – С. 181-194.

Титкова, Т.Б. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века / Т.Б. Титкова, В.В. Виноградова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 3. – С. 75-86.

Титкова, Т.Б. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов / Т.Б. Титкова, В.В. Виноградова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 310-323. – DOI 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323.

Хованская, Л.Л. Влияние температуры воды на рост и развитие личинок и молодежи тихоокеанских лососей на ЛРЗ Магаданской области / Л.Л. Хованская // Известия ТИНРО. – 2007. – Т. 150. – С. 328-351.

Чебанова, В.В. О значении бентоса и дрифта донных беспозвоночных в питании молодежи лососей / В.В. Чебанова // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана. – 2002. – Вып. 6. – С. 260-271.

Шкаберда, О.А. Оценка изменений температуры воздуха на Камчатке за последние 60 лет / О.А. Шкаберда, Л.Н. Василевская // Вестник ДВО РАН. – 2013. – № 3. – С. 69-77.

Яржомбек, А.А. Динамика жира и астаксантина в гонадах лососей / А.А. Яржомбек // Вопросы ихтиологии. – 1966. – Т. 6, вып. 1 (38). – С. 171-176.

Яржомбек, А.А. Каротиноиды лососевых и их связь с воспроизводством этих рыб / А.А. Яржомбек // Труды ВНИРО. – 1970. – Т. 69. – С. 234-267.

An ensemble data set of sea surface temperature change from 1850: the Met Office Hadley Centre HadSST.4.0.0.0 data set / J.J. Kennedy, N.A. Rayner, C.P. Atkinson [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2019. – Vol. 124. – DOI 10.1029/2018JD029867.

Body condition of phocid seals during a period of rapid environmental change in the Bering Sea and Aleutian Islands, Alaska / P.L. Boveng, H.L. Ziel, B.T. McClintock [et al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2020. – Vol. 181. – 104904. – DOI 10.1016/j.dsr2.2020.104904.

Climate change and marine vertebrates / W.J. Sydeman, E. Poloczanska, T.E. Reed [et al.] // Science. – 2015. – Vol. 350 (6262). – P. 772-777. – DOI 10.1126/science.aac9874.

Climate change drives poleward increases and equatorward declines in marine species / R.A. Hastings, L.A. Rutterford, J.J. Freer [et al.] // Current Biology. – 2020. – Vol. 30 (8). – P. 1572-1577. – DOI 10.1016/j.cub. 2020. 02. 043.

Ecological processes influencing mortality of juvenile salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) in Prince William Sound, Alaska / T.M. Willette, R.T. Cooney, V. Patrick [et al.] // Fisheries Oceanography. – 2001. – Vol. 10. – P. 14-41. – DOI 10.1046/j.1054-6006.2001.00043.x.

Ecosystem controls of juvenile pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) and Pacific herring (*Clupea pallasii*) populations in Prince William Sound, Alaska / R.T. Cooney, J.R. Allen, M.A. Bishop [et al.] // Fisheries Oceanography. – 2001. – Vol. 10. – P. 1-13. – DOI 10.1046/j.1054-6006.2001.00039.x.

Effects of seeding density of pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha*, eggs on water chemistry, fry characteristics, and fry survival in gravel incubators / J.E. Bailey, S.D. Rice, J.J. Pella [et al.] // Fish. Bull. U.S. – 1980. – Vol. 78. – P. 649-658.

Experiments with inorganic pollutants – ammonia. Toxic effects of organic and inorganic pollutants on young salmon and trout / G.A. Holland, J.E. Lasater, E.D. Neumann [et al.] // State of Washington, Department of Fisheries. – 1960. – Research Bulletin № 5. – P. 183-187.

High sensitivity of Bering Sea winter sea ice to winter insolation and carbon dioxide over the last 5500 years / M.C. Jones, M. Berkelhammer, K.J. Keller

[et al.] // Science advances. – 2020. – Vol. 6, Iss. 36. – DOI 10.1126/sciadv.aaz9588.

Higher marine survival associated with faster growth for pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) / J.H. Moss, D.A. Beauchamp, A.D. Cross [et al.] // Trans. Am. Fish. Soc. – 2005. – Vol. 134. – P.1313-1322. – DOI 10.1577/T05-054.1.

Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate / H. Yang, G. Lohmann, W. Wei [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2016. – Vol. 121 (7). – P. 4928-4945. – DOI 10.1002/2015JC011513.

Lewis, K.M. Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production / K.M. Lewis, G.L. van Dijken, K.R. Arrigo // Science. – 2020. – Vol. 369 (6500). – P. 198-202. – DOI 10.1126/science.aay8380.

Response of Pink salmon to climate warming in the northern Bering Sea / E.V. Farley Jr., J.M. Murphy, K. Cieciel [et al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2020. – Vol. 177. – P. 1-13. – DOI 10.1016/j.dsr2.2020.104830.

Rice, S.D. Acute toxicity of ammonia to several developmental stages of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) / S.D. Rice, R.M. Stokes // U. S. National Marine Fisheries Service Fishery Bulletin. – 1975. – Vol. 73. – P. 207-211.

Rice, S.D. Ammonia concentrations in pink salmon redds / S.D. Rice, J.E. Bailey // Fish. Bull. – 1980. – Vol. 78, № 3. – P. 809-811.

Surface Air Temperature / T.J. Ballinger, S. Bigaalke, J.E. Walsh [et al.] // NOAA Arctic Report Card 2023. – 2023. – DOI 10.25923/x3ta-6e63.

Timmermans, M.-L. Sea Surface Temperature / M.-L. Timmermans, Z. Labe // NOAA Arctic Report Card 2023. – 2023. – DOI 10.25923/e8jc-f342.

Trophic responses of juvenile Pacific salmon to warm and cool periods within inside marine waters of Southeast Alaska / E. Fergusson, T. Miller, M.V. McPhee [et al.] // Progress in Oceanography – 2020. – DOI 10.1016/j.pocean.2020.102378.

Weisbart, M. Osmotic and ionic regulation in embryo, alevins and fry of the five species of Pacific salmon / M. Weisbart // Can. J. Zool. – 1968. – Vol. 46. – P. 385-397. – DOI 10.1139/z68-056.

Wickett, W.P. Review of certain environmental factors affecting the production of pink and chum salmon / W.P. Wickett // J. Fish. Res. Bd. Can. – 1958. – Vol. 15. – P. 1103-1126. – DOI 10.1139/f58-058.

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ОБИЛИЯ МИДИЙ *MYTILUS* НА МУРМАНЕ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Ю.Т. Марченко¹, В.М. Хайтов^{1,2}, С.С. Малавенда³, П.П. Стрелков¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),
г. Санкт-Петербург

²Кандалакшский государственный природный заповедник, г. Кандалакша

³Мурманский арктический университет (МАУ), г. Мурманск

Аннотация. Известно, что обилие гидробионтов в Арктике меняется в зависимости от изменений климата. Это постулировалось и для мидий *Mytilus* в Баренцевом море. Мы обобщили собственные и литературные данные об обилии литоральных мидий на побережье Мурмана за все время исследований (1930-2010-е годы) и сопоставили их с материалами о температуре воды на разрезе «Кольский меридиан». Полученные результаты свидетельствуют о том, что популяции мидий претерпели коллапс в 1960-е годы и в дальнейшем полностью не восстановились. Изменениями температуры воды этот паттерн полностью объяснить не удастся.

Ключевые слова: мидии *Mytilus*, динамика обилия, Баренцево море, климат.

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – двустворчатые моллюски мидии *Mytilus* spp. Будучи важным компонентом морской прибрежной биоты и одним из самых массовых объектов аквакультуры, мидии также являются ценным источником стратиграфических данных для палеоклиматических реконструкций. Наличие ископаемых створок мидий в осадках считается маркером бореальных условий в Арктике (Blake, 2006). Известно, что в теплые периоды плейстоцена и голоцена обилие мидий в Баренцевом море возрастало, а их ареал расширялся вглубь Арктики (Late Pleistocene and..., 2011; Mangerud, Svendsen, 2018). Ярким примером такой динамики является появление мидий на арх. Шпицберген в начале XXI в. после их тысячелетнего отсутствия (Ocean temperature oscillations..., 2005).

Данные океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» показывают, что среднегодовая температура воды в Баренцевом море демонстрирует существенную межгодовую и десятилетнюю изменчивость (www.pinro.vniro.ru). Общепринято, что вся экосистема Баренцева моря меняется в зависимости от климатических изменений (Climate and cyclic..., 2012; Physical manifestations and..., 2021). Для наиболее изученных ее компонентов, таких как промысловые виды рыб, сублиторальный бентос и зоопланктон, оценена динамика обилия в контексте климатических изменений (Denisenko, 2001; Johannesen, Høines, Dolgov, 2012; Overexploitation, recovery and..., 2021), однако данные об

обилии литоральных мидий Баренцева моря в антропоцене фрагментарны и никем не обобщались.

Район исследования – баренцевоморское побережье Кольского полуострова, также известное как Мурман (68-70° с.ш. и 31-40° в.д., рис. 1). Помимо аборигенного вида мидий *Mytilus edulis*, на Мурмане был отмечен инвазивный вид *M. trossulus*. Считается, что инвазия произошла в середине прошлого века (Väinölä, Strelkov, 2011). Таким образом, популяции мидий Мурмана в XX в. были подвержены не только климатическим флюктуациям, но и последствиям инвазии (Patterns of spatial..., 2023).

В работе мы обобщили литературные и собственные материалы об обилии литоральных мидий *Mytilus* spp. на побережье Мурмана за все время исследований и сопоставили их с данными о температуре воды на разрезе «Кольский меридиан».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве меры обилия мидий использовали среднюю биомассу моллюсков, оцененную минимум по трем случайным пробам (учетным рамкам), собранным на вертикальных разрезах через населенную мидиями зону литорали. Биомасса лучше, чем численность, отражает обилие взрослых моллюсков и репродуктивный потенциал популяции и менее чувствительна к методике обработки проб. Мидии неравномерно распределены по литорали, формируют агрегации, поэтому единичные или неслучайные оценки их обилия не отражают состояние популяций.

Собственные опубликованные (Стрелков, Добрецов, Зубаха, 2001; Patterns of spatial..., 2023) и неопубликованные данные представлены 44 оценками биомассы для 12 участков побережья (далее – поселений мидий), полученными в 2000-2017 гг. Все эти поселения были выбраны неслучайно, для них имеются исторические данные. Наиболее долгий ряд наблюдений для отдельного поселения (литоральная отмель в губе Ярнышная) – 20 за 78 лет. Опубликованные данные искали в Библиотеке Российской академии наук (советский и ранний постсоветский периоды до 2005 г.) и Google Академии по ключевым словам: «мидии», «*Mytilus*», «Barents Sea», «Kola Bay». Также в анализ включены материалы Летописи природы Кандалакшского государственного природного заповедника и архивов кафедры ихтиологии и гидробиологии СПбГУ. В результате был сформирован массив данных для анализа.

В ходе предварительного анализа данных были определены наиболее подробно изученные районы побережья и поселения. В пределах каждого района выявлены наиболее репрезентативные для изучения динамики поселения (далее – мониторинговые поселения). Критерии выбора мониторинговых поселений были следующими:

- поселение изучено в разные декады XX и XXI вв.;
- описания мест исследований в работах разных лет указывают, что изучали один и тот же выдел литорали. Анализировали как весь массив данных в целом, так и данные по отдельным районам.

Временную динамику для разных районов побережья анализировали с использованием регрессионных моделей (GAM). В моделях в качестве зависимой переменной выступали логарифмированные значения биомассы (кг), а в качестве предиктора – год исследований. Для иллюстрации динамики температуры в Баренцевом море использовали среднегодовые значения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» (ст. 3-7, слой 0-200 м) по данным Ю.А. Бочкова (2005) и Полярного филиала «ВНИРО» (www.vniro.pnro.ru). При анализе распределения мидий вдоль побережья, расположенного в долготном направлении, биомассу в поселениях коррелировали с их географической долготой, считая, что расстояние между точками примерно пропорционально расстоянию между ними вдоль берега.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Объем и структура данных об обилии литоральных мидий Мурмана представлены на рис. 1 и в таблице. Всего мы располагаем 166 оценками биомассы в 60 поселениях, изученных в 1933-2017 гг.

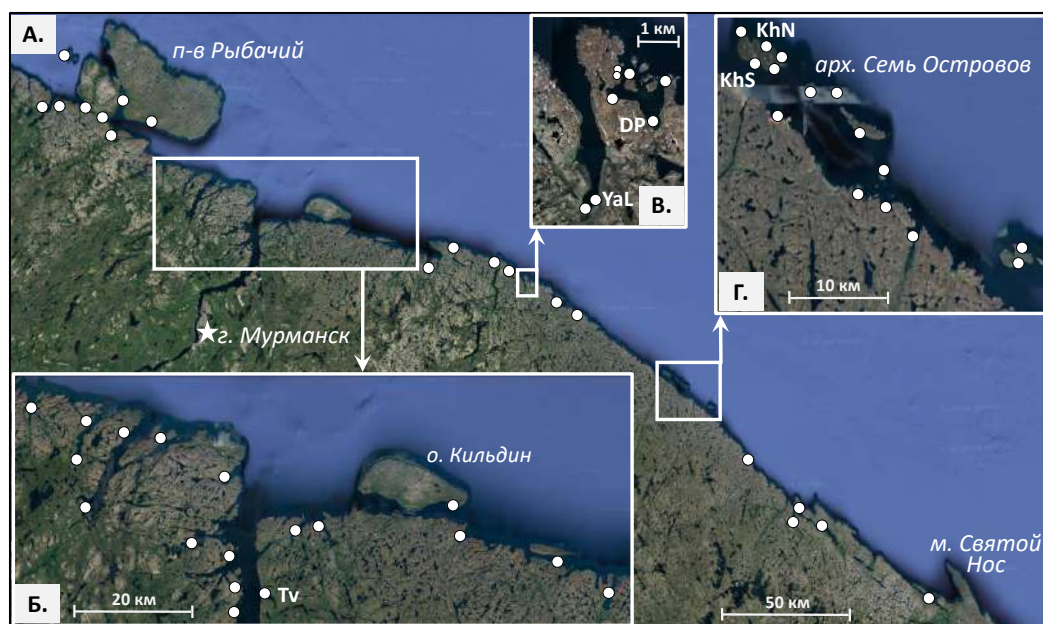


Рис. 1. Карта-схема района исследования: А – побережье Мурмана; Б – Кольский залив и окрестности; В – район пос. Дальние Зеленцы; Г – район арх. Семь Островов; точки – изученные поселения мидий. Мониторинговые поселения: Тв – губа Тюва; YaL – литоральная отмель в губе Ярнышная; DP – Дальний пляж в губе Дальне-Зеленецкая; KhS – безымянная бухта на южном берегу о-ва Харлов; KhN – бухта Леонтия на северном берегу о-ва Харлов

Наиболее изученными районами являются Кольский залив и окрестности (37 оценок, 18 поселений, 1933-2010 гг., рис. 1Б), район пос. Дальние Зеленцы (50 оценок, 8 поселений, 1934-2017 гг., рис. 1В) и район арх. Семь Островов (47 оценок, 15 поселений, 1939-2008 гг., рис. 1Г). Наиболее интенсивные исследования велись в 1960-х годах. Полностью отсутствуют данные за 1940-е и 1990-е годы (см. таблицу). Число мониторинговых поселений – 5 (см. рис. 1).

Структура данных об обилии литоральных мидий на Мурмане, использованных в работе. Число изученных поселений мидий и их исследований в разные десятилетия XX-XXI вв.*

Десятилетие	Количество		Источники
	исследований	поселений	
1930-е	18	18	Зацепин, Зенкевич, Филатова, 1948; Гурьева, 1949; Матвеева, 1949; Раскина, 1963
1950-е	7	7	Кусакин, 1963
1960-е	52	45	Романова, 1969; архивы Кандалакшского заповедника
1970-е	27	13	Количественное распределение хозяйственно-ценных..., 1984; Стрельцов, Агарова, Стрельцова, 1978; Карпович, Шкляревич, 1997; Стрелков, Добрецов, Зубаха, 2001
1980-е	10	10	Количественное распределение хозяйственно-ценных..., 1984; Костылев, 1989; архивы кафедры ихтиологии и гидробиологии СПбГУ
2000-е	38	18	Милютин, Соколов, 2006; Стрелков, Добрецов, Зубаха, 2001; Patterns of spatial..., 2023; наши данные
2010-е	14	3	Patterns of spatial..., 2023; наши данные

**Некоторые поселения изучались неоднократно, число исследований в ряде случаев больше числа поселений.*

В географическом отношении самые масштабные исследования проведены ПИНРО и ВНИРО в 1960-1961 (Романова, 1969), 1971, 1981 (Количественное распределение хозяйственно-ценных..., 1984) и 2002-2005 гг. (Милютин, Соколов, 2006). Эти данные лучше всего иллюстрируют основные тренды пространственно-временной динамики мидий Мурмана в XX в. (рис. 2). В 1960-1961 гг. обилие мидий было выше, чем во всех последующих исследованиях, причем на Западном Мурмане (31-33° в.д.) –

на порядок выше. В 1960-1961 гг. (съёмка I, см. рис. 2) наблюдали значимую тенденцию к снижению обилия мидий с запада на восток (коэффициент корреляции Пирсона между долготой и обилием $r = -0,57$, $df = 36$, $p < 0,001$). В дальнейшем этот тренд не прослеживался, мидий всегда и везде было стабильно мало (съёмки II-IV, см. рис. 2).

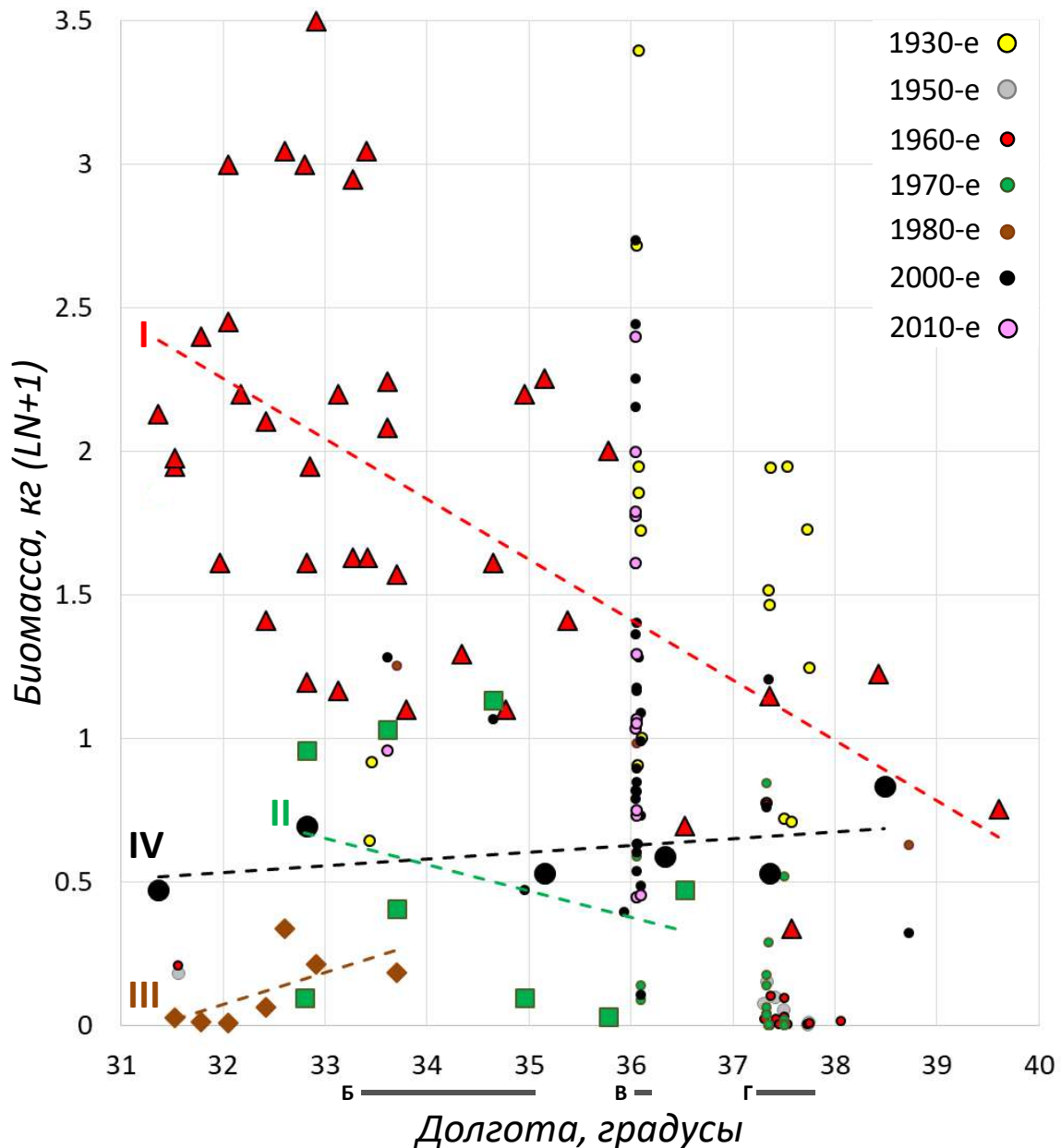


Рис. 2. Обилие мидий вдоль побережья Мурмана в разные годы исследований: крупные значки – исследования ВНИРО и ПИНРО, данные по каждой съёмке аппроксимированы линейными трендами (пунктирные линии). Римскими цифрами обозначены номера съёмок в хронологическом порядке (подробнее см. текст). На оси абсцисс линиями отмечены наиболее изученные районы Мурмана (буквы соответствуют выделениям на рис. 1)

Более детально о временной динамике можно судить по данным рис. 3А, где показано, как менялась биомасса мидий в поселениях разных районов.

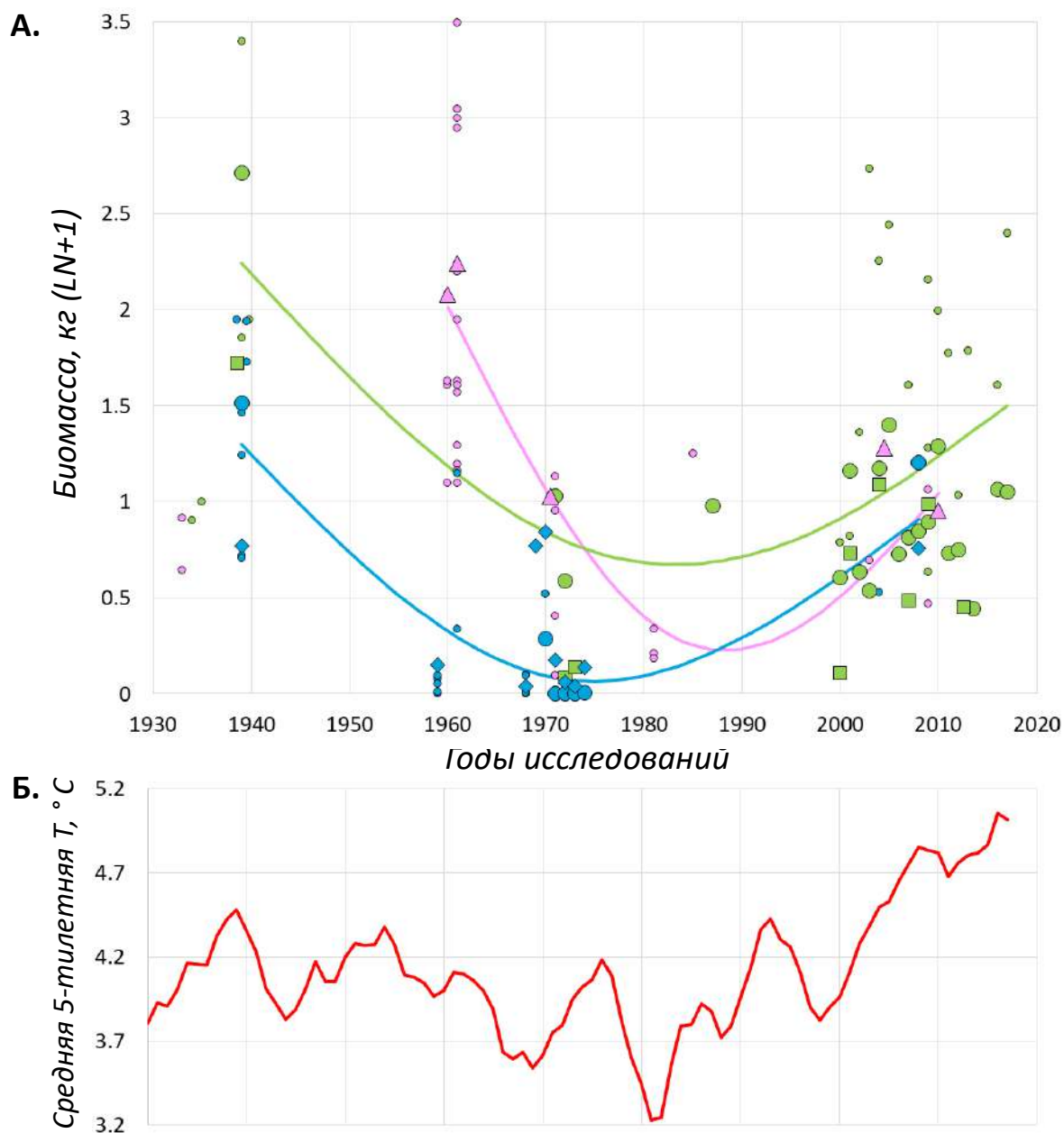


Рис. 3. Динамика обилия мидий и температуры воды на Мурмане: А – динамика биомассы мидий в разных районах Мурмана; значки – оценки биомассы мидий, размером и формой выделены мониторинговые поселения; линии – линии регрессии (GAM) (цвет значков и линий отражает разные районы: розовый – Кольский залив и окрестности; зеленый – район пос. Дальние Зеленцы; голубой – район арх. Семь Островов); Б – динамика температуры воды на Мурмане

Во всех районах и мониторинговых поселениях прослеживается одна и та же тенденция. С конца 1930-х до начала 1960-х годов мидий было

относительно много (данные начала 1930-х годов не включены в регрессионный анализ из-за малого числа наблюдений). К началу 1970-х годов обилие резко снизилось и оставалось низким до рубежа столетий. В самые последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению обилия, но до значений середины прошлого века еще далеко.

В 1960-е годы, когда резко сократилось обилие мидий на Мурмане, произошло похолодание в Баренцевом море (рис. 3Б). Это совпадение легло в основу «климатической» гипотезы, связывающей сокращение обилия мидий на побережье с понижением температуры воды (Количественное распределение хозяйственно-ценных..., 1984; Костылев, 1989). Эта гипотеза, безусловно, является актуальной. Считается, что все компоненты экосистемы Баренцева моря так или иначе реагируют на изменения климата (Climat and cyclic..., 2012; Physical manifestations and, 2021). Мидии – бореальные животные, а Мурман – самый северо-восточный район, где они формируют массовые литоральные поселения (Зацепин, Зенкевич, Филатова, 1948). Такие популяции должны особенно чутко реагировать на изменения климата. В плейстоцене и голоцене, в «эволюционном» масштабе времени, распространение мидий в Арктике менялось согласно изменениям климата (Late Pleistocene and..., 2011; Mangerud, Svendsen, 2018), однако очевидно, что в масштабе десятилетий связь между температурой на разрезе «Кольский меридиан» и обилием мидий нелинейная. Последние периоды были очень теплыми, но это, судя по имеющимся данным, не привело к полному восстановлению популяций (см. рис. 3). Ранее мы высказали гипотезу, объясняющую слабую реакцию популяций мидий на текущее потепление. Считается, что *M. trossulus* поселился в Баренцевом море в середине прошлого века (Väinölä, Strelkov, 2011). Если это так, то конкуренция и гибридизация между инвазивным *M. trossulus* и аборигенным *M. edulis* должны были негативно сказаться на приспособленности популяций мидий, ограничивая их потенциал к росту (Patterns of spatial..., 2023). Эта гипотеза пока не доказана, потому что никаких исторических данных о таксономической структуре поселений мидий Мурмана в нашем распоряжении нет. Поэтому мы были бы благодарны за предоставленные нам коллекции мидий прошлых лет, пригодные для таксономического анализа (коллекции створок, фиксированные пробы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объем количественных данных о мидиях Мурмана (166 оценок средней биомассы на литоральных разрезах, охватывающих период с 1930-х по 2010-е годы) является беспрецедентно большим для литоральных гидробионтов в Субарктике. Аккумулированные за более чем 80 лет

исследований данные распределены в пространстве и времени неравномерно. Большому объему материалов по заповедному арх. Семь Островов, району академического стационара в пос. Дальние Зеленцы и наиболее богатому мидиями Западному Мурману, мы в первую очередь обязаны ученым Кандалакшского заповедника, ММБИ РАН, ВНИРО и ПИНРО соответственно. Пробелами в летописи исследований по понятным причинам оказываются 1940-е и 1990-е годы. Имеющиеся данные позволяют охарактеризовать долгосрочную динамику мидий следующим образом: коллапс популяций между 1960 и 1970 гг., последующий сорокалетний период низкого обилия и частичное восстановление в самые последние десятилетия. Рабочей гипотезой исследований долгосрочной динамики любых морских популяций, тем более северных, является связь динамики с изменениями климата. Для мидий Мурмана эта связь неоднозначна: если коллапс действительно совпал с похолоданием, то даже последние аномально теплые десятилетия, по-видимому, не принесли полного восстановления.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-74-20024-П.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Бочков, Ю.А. Крупномасштабные колебания температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и их прогнозирование / Ю.А. Бочков // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: тезисы докладов. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2005. – С. 47-65.

Гурьева, Т.П. Качественная и количественная характеристика литорального населения каменистой фации в губе Дальнезеленецкой (Восточный Мурман) / Т.П. Гурьева // Труды Мурманской биологической станции. – 1948. – Т. 1. – С. 102-122.

Зацепин, В.И. Материалы по количественному учету донной фауны литорали Кольского залива / В.И. Зацепин, Л.А. Зенкевич, З.А. Филатова // Труды государственного океанографического ин-та. – 1948. – Т. 6. – С. 13-54.

Карпович, В.Н. О возможной зависимости динамики численности обыкновенной гаги в Кандалакшском заповеднике от естественных колебаний биомассы мидий / В.Н. Карпович, Г.А. Шкляревич // Экология птиц и тюленей в морях Северо-Запада России. – Апатиты: Мурманский морской биологический ин-т, 1997. – С. 44-66.

Количественное распределение хозяйственно-ценных беспозвоночных у побережья Мурмана / Т.В. Антипова, О.В. Герасимова,

Л.Д. Панасенко, А.М. Сенников // Бентос Баренцева моря. Распределение, экология и структура популяций. – Апатиты: КФ АН СССР, 1984. – С. 113-123.

Костылев, В.Э. Состояние мидиевых поселений в губе Зеленецкая Западная (1985) / В.Э. Костылев // Трофические взаимоотношения организмов бентоса. – 1989. – С. 92-95.

Кусакин, О.Г. Материалы к количественной характеристике растительности и животного мира литорали баренцевоморских островов Кандалакшского государственного заповедника / О.Г. Кусакин // Труды Кандалакшского государственного заповедника. – 1963. – Вып. 4. – С. 183-233.

Матвеева, Т.А. Биология *Mytilus edulis* / Т.А. Матвеева // Труды Мурманской биологической станции. – 1948. – Т. 1. – С. 215-241.

Милютин, Д.М. Плотность распределения и биомасса мидий *Mytilus edulis* в прибрежной зоне Кольского полуострова / Д.М. Милютин, В.И. Соколов // VII Всероссийская конференция по промысловым беспозвоночным (Мурманск, 9-13 окт. 2006 г.): тезисы докладов. – М.: Изд-во ВНИРО, 2006. – С. 241-242.

Раскина, Е.Е. Распределение биомассы бентоса на литорали Семи Островов и прилегающего к ним побережья Кольского полуострова / Е.Е. Раскина // Труды Кандалакшского государственного заповедника. – 1963. – Вып. 4. – С. 234-242.

Романова, Н.Н. О промысловых моллюсках Баренцева моря / Н.Н. Романова // Труды ВНИРО. – 1969. – Т. 65. – С. 436-448.

Средняя температура воды (°С) Основной ветви Мурманского течения на разрезе «Кольский меридиан» (ст. 3-7) в слое 0-200 м в 1951-2020 гг. – Текст: электронный // Полярный филиал ФГБНУ ВНИРО. – URL: <http://www.pinro.vniro.ru/ru/razrez-kolskij-meridian/ryady-nablyudenij/2-uncategorised/166-ct-3-7-sloj-0-200-m-2> (дата обращения 25.01.2024).

Стрелков, П.П. Репродуктивный цикл и популяционная динамика мидии *Mytilus edulis* L. в условиях Восточного Мурман (Баренцево море) / П.П. Стрелков, С.В. Добрецов, М.А. Зубаха, Н.В. Максимович // Вестник СПбГУ. – 2001. – Сер. 3, № 27. – С. 46-50.

Стрельцов, В.Е. Распределение и экология массовых форм зообентоса на одной из литоральных отмелей Восточного Мурман / В.Е. Стрельцов, И.Я. Агарова, С.И. Стрельцова // Советско-Американский симпозиум по программе «Биологическая продуктивность и биохимия мирового океана»: тезисы докладов. – Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1978. – С. 81-83.

Blake, W. Occurrence of the *Mytilus edulis* complex on Nordaustlandet, Svalbard: radiocarbon ages and climatic implications / W. Blake. – DOI

10.1111/j.1751-8369.2006.tb00028.x // Polar Research. – 2006. – Vol. 25, Iss. 2. – P. 123-137.

Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries. / G. Matishov, D. Moiseev, O. Lyubina [et al.]. – DOI 10.1007/s00300-012-1237-9 // Polar biology. – 2012. – Vol. 35, Iss. 12. – P. 1773-1790.

Denisenko, S.G. Long-term changes of zoobenthos biomass in the Barents Sea / S.G. Denisenko // Proc. Zool. Inst. Russ. Acad. Sci. – 2001. – Vol. 289. – P. 59-66.

Johannesen, E. Demersal fish assemblages and spatial diversity patterns in the Arctic-Atlantic transition zone in the Barents Sea / E. Johannesen, Å.S. Høines, A.V. Dolgov, M. Fossheim. – DOI 10.1371/journal.pone.0034924 // PLoS One. – 2012. – Vol. 7, Iss. 4. – Art. e34924.

Late Pleistocene and Holocene distribution of *Mytilus edulis* in the Barents Sea region and its palaeoclimatic implications / J. Hansen, N.-M. Hanken, J.K. Nielsen, E. Thomsen. – DOI 10.1111/j.1365-2699.2010.02473.x // Journal of Biogeography. – 2011. – Vol. 38, Iss. 6. – P. 1197-1212.

Mangerud, J. The Holocene thermal maximum around Svalbard, Arctic North Atlantic; molluscs show early and exceptional warmth / J. Mangerud, J.I. Svendsen. – DOI 10.1177/0959683617715701 // The Holocene. – 2018. – Vol. 28, Iss. 1. – P. 65-83.

Ocean temperature oscillations enable reappearance of blue mussels *Mytilus edulis* in Svalbard after a 1000 year absence / J. Berge, G. Johnsen, F. Nilsen [et al.]. – DOI 10.3354/meps303167 // Marine Ecology Progress Series. – 2005. – Vol. 303. – P. 167-175.

Overexploitation, recovery and warming of the Barents Sea ecosystem during 1950-2013 / T. Pedersen, N. Mikkelsen, U. Lindstrøm [et al.]. – DOI 10.3389/fmars.2021.732637 // Frontiers in Marine Science. – 2021. – Vol. 8. – Art. 732637.

Patterns of spatial and temporal dynamics of mixed *Mytilus edulis* and *M. trossulus* populations in a small subarctic inlet (Tyuva Inlet, Barents Sea) / J.T. Marchenko, V.M. Khaitov, M.V. Katolikova [et al.]. – DOI 10.3389/fmars.2023.1146527 // Frontiers in Marine Science. – 2023. – Vol. 10. – Art. 1146527.

Physical manifestations and ecological implications of Arctic Atlantification. Ingvaldsen / R.B. Ingvaldsen, K.M. Assmann, R. Primicerio [et al.]. – DOI 10.1038/s43017-021-00228-x // Nature Reviews Earth & Environment. – 2021. – Vol. 2, Iss. 12. – P. 874-889.

Väinölä, R. *Mytilus trossulus* in northern Europe / R. Väinölä, P. Strelkov. – DOI 10.1007/s00227-010-1609-z // Marine biology. – 2011. – Vol. 158. – P. 817-833.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, СОЛЕННОСТИ И СОСТАВА ВОД БАРЕНЦЕВА МОРЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 100 ЛЕТ

А.А. Намятов

Мурманский морской биологический институт РАН (ММБИ РАН), г. Мурманск

Аннотация. Представлена методика оценки содержания базовых вод (атлантических, речных, талых и объемов вод, изъятых на ледообразование) в морской воде на основе уравнений смешения с применением значений солёности и изотопного параметра $\delta^{18}\text{O}$. Данные о температуре и солёности получены из баз NCEI и HYCOM, значения параметра $\delta^{18}\text{O}$ – из базы NASA, использованы также собственные материалы. Рассчитаны средневзвешенные по объёму моря относительные величины содержания базовых вод, а также температуры и солёности с 1920 по 2022 г. с осреднением в 5 лет.

Ключевые слова: Баренцево море, температура, солёность, $\delta^{18}\text{O}$, атлантические воды, речные воды, талые воды, лед.

ВВЕДЕНИЕ

Проведение исследований на разрезе «Кольский меридиан» имеет важное значение в изучении изменения различных характеристик вод Баренцева моря. Долговременность этих исследований позволяет оценивать изменения получаемых характеристик в климатическом масштабе, однако метод исследования, основанный на выполнении разреза, имеет один недостаток: он не определяет акватории или объём моря, где получаемые данные репрезентативны. Но 125 лет назад другие методы исследования невозможно было предложить, а тем более выполнить. В настоящее время накоплено значительное количество как измеренных величин, так и данных моделирования, которое позволяет перейти к оценке климатической изменчивости, в частности гидрологических параметров, всего объёма Баренцева моря.

За несколько последних десятилетий в Арктическом регионе наблюдалось потепление поверхности более чем в два раза быстрее, чем в глобальном масштабе (Divergent consensus on..., 2020). Результаты оценок изменчивости температуры и солёности воды в Баренцевом море в работах сотрудников ПИНРО (120 лет океанографических..., 2022; Voitsov, Karsakov, Trofimov, 2012) с использованием данных на разрезе «Кольский меридиан» показали, что в «течение 2000-2009 годов среднегодовая температура демонстрировала положительные аномалии в 0,5-1,28 °C по сравнению со средним значением за 1951-2000 годы. С середины 2000-х годов во всех слоях и на всех участках разреза отмечаются рекордно высокие значения температуры воды». С 1978 по 1979 г. характеризуется

как аномально холодный, а современный с 2015 по 2018 г. – как аномально теплый (120 лет океанографических..., 2022).

Термин «атлантификация» в последнее время занял устойчивое место в научной литературе. Он характеризует возрастание притока атлантических вод (AW) и влияние этого процесса на морскую среду. Но при изучении притока атлантической воды необходимо изучить динамику притока (содержания) и других типов вод. Первоначально важно внести понятие в разницу терминов «атлантическая вода» и «атлантическая водная масса». Атлантическая вода (AW) – это своеобразный «ген», характеризующий воды, поступающие в Баренцево море через западную и северную границы моря, а атлантическая водная масса (AWM) – это некоторый объем воды, имеющий свои границы распространения и характеризующийся наибольшим содержанием атлантических вод. Кроме атлантической воды, реальная морская вода состоит из комбинации базовых вод – речной, талой, а также вод, трансформированных в результате ледообразования. Цель настоящей работы – исследование климатической изменчивости температуры и солености воды, а также содержания базовых вод в Баренцевом море с 1920 по 2020 г.

Сокращения и аббревиатуры:

WS – весь объем Баренцева моря,

WO – Мировой океан,

NH – Северное полушарие Мирового океана,

AW – атлантическая вода,

RW – речная вода,

MW – талые воды,

IW – ледовые воды (сумма объемов талых вод и льда).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика оценки содержания базовых вод основана на простой системе уравнений смешения вод (1), исходными величинами являются значения солености и изотопного параметра $\delta^{18}\text{O}$, эта методика описана во многих работах (Namyatov, 2021):

$$\begin{aligned} f_a \times S_a + f_r \times S_r + f_i \times S_i &= S_{meas}, \\ f_a \times I_a + f_r \times I_r + f_i \times I_i &= I_{meas}, \\ f_a + f_r + f_i &= 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где S_r (psu) и I_r (‰) – соленость и изотопный параметр «чистых» речных вод (S_r всегда равно 0);

S_i и I_i – соответствующие параметры для льда;

S_a и I_a – для «чистой» атлантической воды;

f_a , f_r и f_i – вклады атлантических, речных и ледовых вод, %;

S_{meas} и I_{meas} – результирующие (измеренные) величины солености и изотопного параметра $\delta^{18}\text{O}$.

Под ледовой водой (f_i) понимается вклад талых вод при положительной величине f_i , при отрицательной f_i – объем льда. Эта система справедлива только при преобладании талых вод ($f_i > 0$) (Modification of Laptev..., 2019). Для случая, когда первостепенное значение имеют воды, изъятые на ледообразование ($f_i < 0$), эта система уравнений дополняется уравнениями (3) и (4) (Namyatov, 2021):

$$f_a^p \times S_a + f_r^p \times S_r + abs(f_i \times S_i) = S_{meas}, \quad (2)$$

где f_a^p и f_r^p – относительные величины «чистых» атлантических и речных вод в период ледообразования.

Отсюда
$$f_a^p = (S_{meas} - abs(f_i \times S_i))/S_a, \quad (3)$$

$$f_r^p = 1 - f_a^p - abs(f_i). \quad (4)$$

Используя уравнения (1)-(4), можно исследовать климатическую изменчивость содержания базовых вод, но для этого необходимы ряды солености и изотопного параметра $\delta^{18}\text{O}$.

Для подобных исследований данные должны быть однородны или квазиоднородны как во времени, так и в пространстве. К сожалению, океанографические исследования на длительном промежутке времени (порядка 100-120 лет) не обладают этими свойствами. Для получения квазиоднородных выборок использовалась комбинация измеренных величин из «World Ocean Database» (WOD) и реанализа HYCOM (HYCOM) с 1 июня по 30 сентября на стандартных горизонтах 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 м. Зимние данные были исключены, поскольку их количество намного меньше и их присутствие значительно изменяет полученное значение по сравнению с отсутствием.

На каждом стандартном горизонте данные интерполировались в узлы сетки с шагом $0,1^\circ$ по широте и $0,5^\circ$ по долготе методом средневзвешенного интерполирования при помощи программного комплекса ODV Alfred Wegener Institute (Schlitzer, 2021). Интерполяция данных на стандартные горизонты также проводилась в среде ODV. На поверхности было около 8700 точек интерполирования и около 2600 на горизонте 400 м.

Получение значений параметра $\delta^{18}\text{O}$ описано подробно (Parameter $\delta^{18}\text{O}$ in..., 2023a). Значения параметра $\delta^{18}\text{O}$ для вод в Баренцевом море были получены из открытых баз данных NASA (Global Seawater Oxygen-18..., 2024) и WOD (Temperature and salinity..., 2023). Кроме того, имеются и собственные данные 2021 г. (Namyatov, Tokarev, Pastukhov, 2023b). Всего использовано 2283 значения независимо от района работ, горизонта, сезона и авторов проведения исследований. В результате была построена зависимость между значениями солености и $\delta^{18}\text{O}$. Коэффициент корреляции этой зависимости близок к единице ($R^2 = 0,91$). Значимость этой

регрессии проверялась при помощи критерия Фишера, а оценка статистической значимости сходства (различия) средних – с помощью критерия Стьюдента. В обоих случаях значимость была на уровне $p < 0,01$. С использованием этой зависимости для каждого значения солёности была рассчитана величина параметра $\delta^{18}\text{O}$.

Далее вычислялись средние взвешенные значения температуры и солёности воды по всему объёму моря, а также величины относительных и абсолютных объёмов базовых вод. Величина f_i в формуле (1) может принимать положительные, что соответствует объёму талых вод (MW), и отрицательные значения, что соответствует относительному объёму изъятия вод на ледообразование, т.е. объёму образованного льда (IW), поэтому вычисления проводились отдельно для положительных и отрицательных значений f_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате были получены средние взвешенные по всему объёму Баренцева моря значения температуры воды и солёности, а также величины объёмов AW, RW, MW и IW, осреднённые по пятилетиям за 100 лет (1920-2022 гг.) (рис. 1).

Линейная регрессия содержания RW с содержанием AW отрицательна, коэффициент корреляции близок к единице при уровне значимости $p \ll 0,00001$ (рис. 2). Следовательно, периоды положительных и отрицательных аномалий объёма RW должны соответствовать таковым для AW, но знаки аномалий должны быть противоположными. Среднее содержание атлантических вод (AW) для всего объёма Баренцева моря за весь рассматриваемый период составило 99,0 %, речных вод (RW) – 0,87 %, что составляет 476209 ± 5899 и $4188,2 \pm 52,2$ км³ соответственно. Линейный тренд в изменении этих величин не выражен, но наблюдаются периоды с положительными и отрицательными аномалиями. От 1943-1947 до 1978-1982 гг. – период положительных аномалий объёма AW. Содержание AW увеличивается до 99,1 %, а содержание RW уменьшается до 0,72 %. В периоды от 1978-1982 до 2013-2017 гг. знак аномалий меняется на противоположный. Содержание AW уменьшается до 98,8 %, а RW увеличивается до 1,03 %. В настоящее время наблюдаются положительные аномалии содержания AW (до 99,2 %) и отрицательные – RW (0,68 %) Максимально аномалии составили 0,2 % от среднего в ту и другую стороны. В абсолютных величинах наибольшая положительная аномалия объёма AW – 1056 км³, наибольшая отрицательная – 930 км³, RW – 836 и 701 км³ соответственно. Полный цикл чередования знаков составил ~80 лет – примерно от 1945 до 2015 г.

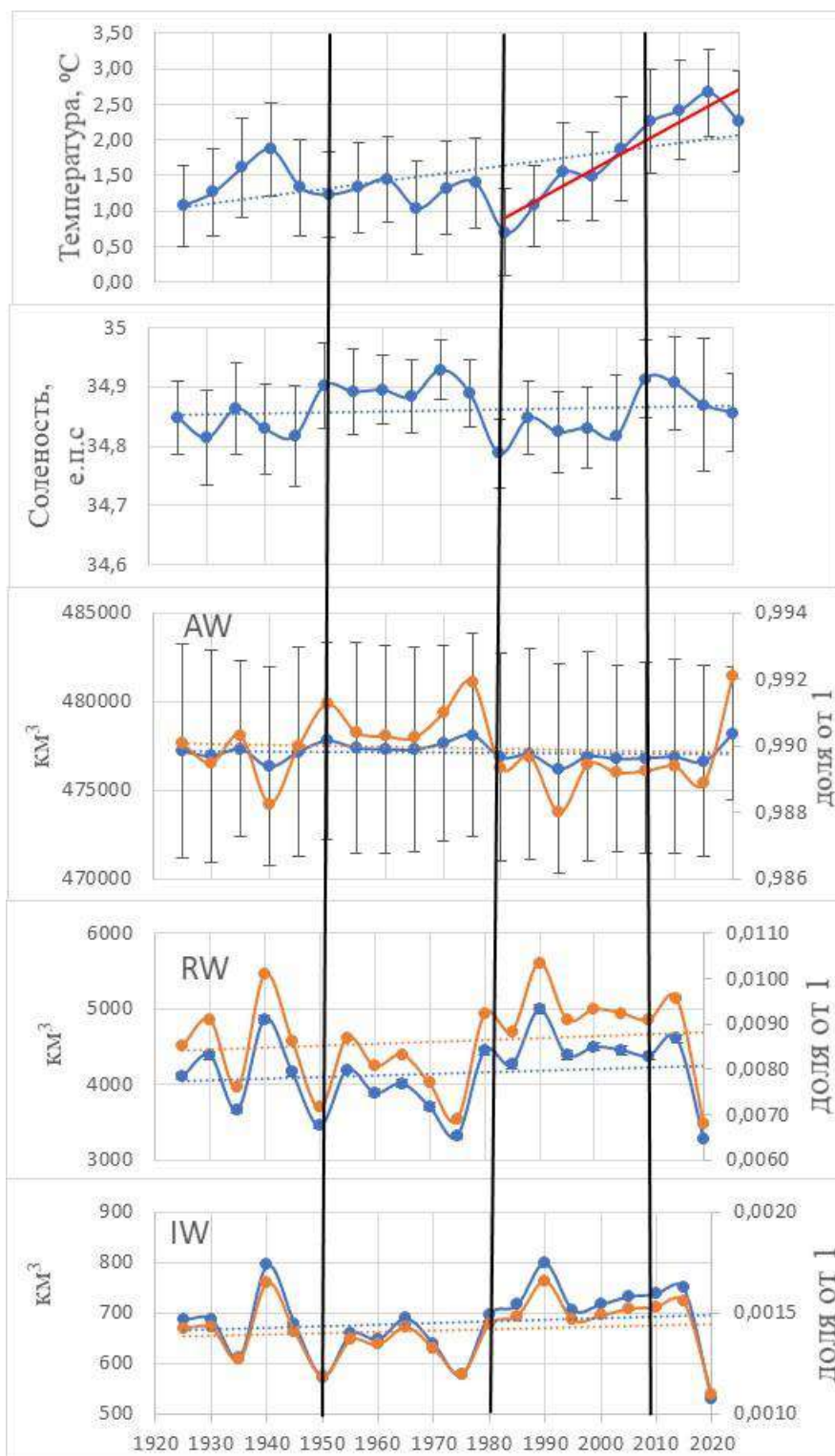


Рис. 1. Средневзвешенные по всему объему Баренцева моря величины температуры и солёности, а также абсолютные (синяя линия, левая ось) и относительные (оранжевая линия, правая ось) содержания AW, RW и IW. Черные линии – смены знаков аномалий солёности (осреднение за 5 лет)

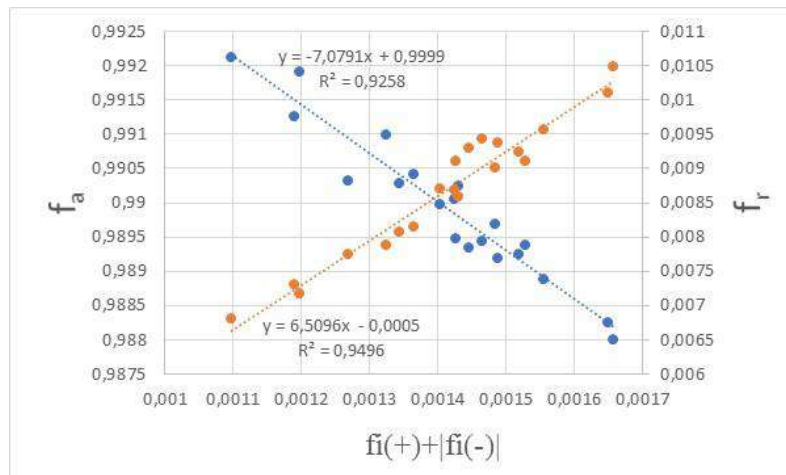


Рис. 2. Линейная регрессия между относительными средними (осреднение за 5 лет) объемами (относительно 1) AW и IW (голубая линия) и между RW и IW (оранжевая линия) для всего объема Баренцева моря (значимость $p < 0,0001$)

В морской воде с точки зрения изотопного состава могут наблюдаться трансформированные воды как в результате ледообразования, так и в результате ледотаяния. Если бы не было оттока или притока льда из-за пределов моря, то под объемом льда понималась бы сумма

$$V_i^{abs} = V_{i+} + abs(V_{i-}), \quad (5)$$

где V_{i+} и V_{i-} – объем талых вод и объем льда;
 V_i^{abs} – под этой величиной можно понимать объем льда на максимуме годового цикла.

Так как в настоящей работе рассматривается только летний период, то V_{i-} можно трактовать как объем оставшегося льда или объем трансформированной в результате ледообразования воды, но не скомпенсированной талой водой. Превышение поступления льда над выносом составляет 2,8 % от максимальной величины объема льда в море, которая наблюдается в апреле (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1990). Эта величина не будет учитываться при оценке значений $V_{i-}(f_{i-})$, но будет приниматься во внимание в оценке величины $V_{i+}(f_{i+})$ при условии, что поступивший лед растает полностью или частично. Средняя величина f_i^{abs} для всего объема Баренцева моря составляет 0,146 % при максимуме 0,177 % и минимуме 0,107 %. В этом случае средняя величина объема льда (V_i^{abs}) для всего Баренцева моря за период исследований в 100 лет составляет 706,06 км³ при максимуме 852,12 км³ и минимуме 516,62 км³ (см. рис. 1). Эти значения неплохо согласуются со значениями, представленными в монографии «Проект Моря СССР» (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1991), где средний (максимальный из средних месячных, наблюдаемый в апреле) объем льда (лед, образованный в Баренцевом море и привносимый извне) составил 1190,68 км³. По мнению авторов,

относительная погрешность их оценок 40 %. Коэффициент корреляции между содержанием AW и RW, с одной стороны, и содержанием IW – с другой (осреднение за 5 лет) составил 0,97 при уровне значимости $p \ll 0,0001$. Зависимость между AW и IW отрицательная, а между RW и IW положительная (см. рис. 2). Следовательно, периоды с положительными и отрицательными аномалиями содержания IW должны соответствовать периодам с такими же аномалиями для RW и с обратными по знаку аномалиями – для AW (см. рис. 1).

Вызывают интерес оценки соответствия глобальных масштабов изменений температуры воды: с одной стороны, весь Мировой океан или его Северное полушарие, а с другой – одно море, например Баренцево. Поэтому для сравнения были вычислены средние за 5 лет аномалии глобальной температуры поверхности морских вод HadSST4 (HadCRUT) для всего Мирового океана (WO) и Северного полушария (NH) (см. рис. 1, 3). Как в Мировом океане, так и в Баренцевом море наблюдаются явно выраженный положительный линейный тренд в изменениях температуры воды и циклическая составляющая с периодом около 75 лет. Минимум этой циклической составляющей приходился на 1965-1970 гг. в WO и NH, а переход от роста к снижению на момент 2022 г. еще не наступил (см. рис. 3).

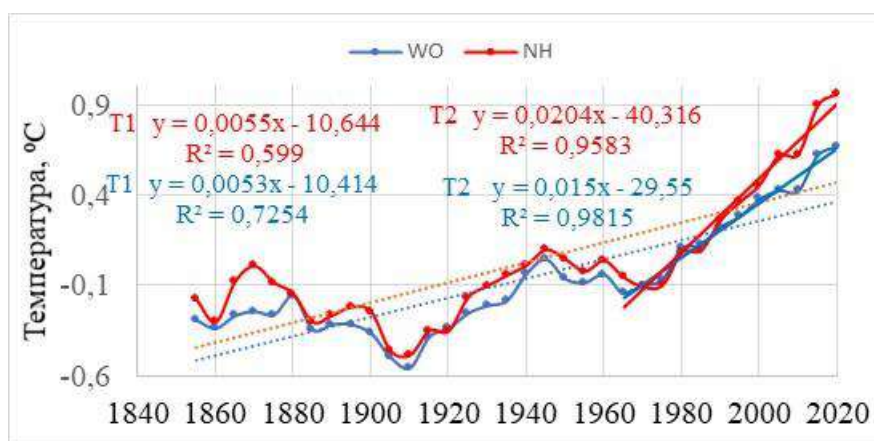


Рис. 3. Изменение аномалий поверхностной температуры воды всего Мирового океана (WO, синий цвет) и Северного полушария (NH, красный цвет)

В Баренцевом море также наблюдается циклическая составляющая, но минимум приходится на 1978-1982 гг., а переход от роста к снижению наметился около 2013-2017 гг. (см. рис. 1). Для дальнейшего анализа обозначим линейный тренд, наблюдающийся в течение всего периода (около 100 лет), как T1. Полный период циклической составляющей температуры воды в Баренцевом море составляет примерно 75 лет от предыдущего максимума в 1938-1942 гг. до последующего в 2013-2017 гг. Полное исследование проявления данного цикла в настоящей работе не

предусмотрено, но будут показаны величины положительного тренда температуры воды от последнего минимума к максимуму. Обозначим этот тренд как T2 (см. рис. 1). Скорость роста температуры воды в глобальном тренде T1 во всем объеме Баренцева моря в 1,9 раза больше, чем в поверхностных водах WO и NH – $0,101 \pm 0,041$ °C за 10 лет против $0,055 \pm 0,010$ и $0,053 \pm 0,010$ °C за 10 лет для WO и NH соответственно. Ранжирование величины T1 выглядит следующим образом: $WS(0,101) > NH(0,055) > WO(0,053)$ °C за 10 лет. Для WO и NH величина тренда T2 почти в 2 и 3 раза соответственно больше величины глобального тренда T1. Скорость роста температуры воды в Баренцевом море на восходящей ветви цикла (тренд T2) почти в 3,5 раза больше, чем за весь период (тренд T1): $WS(0,349) > NH(0,149) > WO(0,100)$ °C за 10 лет.

Тренд T1 в изменениях солености для всего объема Баренцева моря отрицателен, статистически незначим и составляет примерно 0,02 psu за 100 лет. Циклическая составляющая также присутствует, но ее период меньше, чем для температуры воды – около 60 лет (см. рис. 1).

Изменение объема AW – «атлантификация» – по-разному влияет на гидрологические условия акваторий. Этот эффект уже обсуждался в ряде статей (Aksenov, Ivanov 2018; Divergence in climate..., 2023). Авторы показывают, что одним из результатов «потепления» AW является тот факт, что «ослабление галоклина и ускоренное таяние морского льда могут привести к увеличению первичной продукции за счет повышения доступности питательных веществ». При совместном рассмотрении объема AW и плотности в среднем по Баренцеву морю наблюдается тренд к уменьшению плотности на фоне уменьшения содержания AW в слое от 100 м до дна. Так как мы рассматриваем только летние данные, то не будем принимать во внимание изменение плотности в поверхностном слое, где ее уменьшение связано с прогревом воды, но скорость уменьшения плотности воды в придонном слое несколько выше, чем в слое 100-150 м, т.е. создаются условия для ослабления галоклина в зимний период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Линейный тренд в изменениях содержания атлантических и речных вод не выражен, но отмечаются периоды с положительными и отрицательными аномалиями. От 1943-1947 до 1978-1982 гг. – период положительных аномалий AW и отрицательных RW. От 1978-1982 до 2013-2017 гг. знак аномалий меняется на противоположный. И в настоящее время наблюдаются положительные аномалии AW и отрицательные RW.

Средний объем льда во всем Баренцевом море за период исследований в 100 лет составляет $706,06 \text{ км}^3$ при максимуме $852,12 \text{ км}^3$ и минимуме $516,62 \text{ км}^3$. Эти значения неплохо согласуются со значениями, полученными

другими авторами и составляющими 1190,68 км³. В настоящее время (с 2017 по 2022 г.) фиксировалось существенное уменьшение объема льда: фактически на 30 % от среднего значения.

Скорость роста температуры воды во всем объеме Баренцева моря в 1,9 раза больше, чем в поверхностных водах Мирового океана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1, вып. 1. Баренцево море / под ред. Ф.С. Терзиева [и др.]. – Ленинград: Гидрометиздат, 1990. – 280 с.

120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, М.Ю. Анциферов [и др.]; Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича). – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2022. – 145 с. – URL www.pinro.vniro.ru/images/publications/2022/120_let.pdf.

Aksenov, P.V. “Atlantification” as a Possible Cause for Reducing of the Sea-Ice Cover in the Nansen Basin in winter/ P.V. Aksenov, V.V. Ivanov / Problemy Arktiki i Antarktiki. – DOI 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54 // Arctic and Antarctic Research. – 2018. – Vol. 64, Iss. 3. – P. 42-54 [In Russian].

Boitsov, V.D. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea 2000-2009 / V.D. Boitsov, A.L. Karsakov, A.G. Trofimov. – DOI 10.1093/icesjms/fss075 // ICES Journal of Marine Science. – 2012. – Vol. 69. – P. 833-840.

Modification of Laptev Sea Freshened Shelf Waters Based on Isotope and Salinity Relations / E.O. Dubinina, A.Yu. Miroshnikov, S.A. Kossova, S.A. Shchuka. – DOI 10.31857/S0016-752564113-19 // Geokhimiya. – 2019. – Vol. 64, Iss. 1. – С. 3-19 [In Russian].

Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather / J. Cohen, X. Zhang, J. Francis [et al.]. – DOI 10.1038/s41558-019-0662-y // Nat. Climate Change. – 2020. – Vol. 10. – P. 20-29.

Global Seawater Oxygen-18 Database. – Текст: электронный / National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies. – US. <https://data.giss.nasa.gov/o18data> (дата обращения 25.01.2024).

Divergence in climate model projections of future Arctic Atlantification / M. Muilwijk, A. Nummelin, C. Heuzé [et al.]. – DOI 10.1175/JCLI-D-22-0349.1 // Journal of Climate. – 2023. – Vol. 36, Iss. 6. – P. 1727-1748.

Namyatov, A.A. $\delta^{18}\text{O}$ as a tracer of the main regularities of water mass mixing and transformation in the Barents, Kara, and Laptev seas / A.A. Namyatov. – DOI 10.1016/j.jhydrol.2020.125813 // Journal of Hydrology. – 2021. – Vol. 593. – Art. 125813.

Parameter $\delta^{18}\text{O}$ in the Marine Environment Ecosystem Studies on the Example of the Barents Sea / A. Namyatov, P. Makarevich, E.I. Druzhkova, I. Pastuhov. – DOI 10.3390/w15020328 // Water. – 2023. – Vol. 15, Iss. 328.

Namyatov, A. Results of the Barents Sea waters isotopic studies / A. Namyatov, I. Tokarev, I. Pastukhov // R/V "Dalnie Zelentsy" March-April 2021. – Текст электронный // ММБИ РАН, СПбГУ. – Updated: 20.06.2023. – URL: <https://data.mendeley.com/datasets/nvkf2f8xdd/1> (2023) (дата обращения 25.01.2024).

Schlitzer, R. Ocean Data View. – Текст электронный // AWI. – URL: <https://odv.awi.de>, 2021 (дата обращения 25.01.2024).

Global temperature dataset (HadCRUT). – Текст: электронный // Climatic Research Unit (University of East Anglia) and Met Office. – URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature> (дата обращения 25.01.2024).

Temperature and salinity profiles obtained as part of expeditionary studies. WOD. – Текст: электронный // NOAA Office, World Ocean Database select and search. – Updated: Nov. 2023. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> (дата обращения 25.01.2023).

Temperature and salinity in standard z-levels (reanalyze). – Текст: электронный // HYCOM HYbrid Coordinate Ocean Model. – URL: <https://www.hycom.org> (дата обращения 25.01.2024).

МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА РАЗРЕЗЕ «КОЛЬСКИЙ МЕРИДИАН»

М.А. Новиков, Е.А. Горбачева

*Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
г. Мурманск*

Аннотация. Рассмотрены результаты регулярного многолетнего (2003-2021 гг.) мониторинга уровня загрязнения воды и донных отложений на гидрологическом разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море. Отбор проб выполнялся ежегодно в ходе морских экспедиций ПИНРО в различные сезоны, главным образом в феврале-марте и августе-сентябре. Исследовано содержание тяжелых металлов, мышьяка, хлорорганических пестицидов, полихлорбифенилов, полициклических ароматических углеводородов и алифатических углеводородов. Полученную в ходе мониторинга информацию заносили в электронные базы данных, подвергали статистическому и геоинформационному анализу. В ходе выполненных исследований устойчивых различий в уровне загрязнения воды Прибрежной и Основной ветвей Мурманского, а также Центральной ветви Нордкапского течений не выявлено. На разрезе прослежена ежегодная сезонная изменчивость загрязнения морской воды и донных отложений некоторыми металлами, мышьяком и хлорорганическими соединениями.

Ключевые слова: Баренцево море, тяжелые металлы, мышьяк, хлорорганические пестициды, ПХБ, алифатические углеводороды, ПАУ.

ВВЕДЕНИЕ

Гидрологический разрез «Кольский меридиан» пересекает поток атлантических и прибрежных вод Мурманского течения, непосредственно связанных с системами Нордкапского и Норвежского течений. По мере продвижения атлантических вод на восток они частично трансформируются в более плотные собственно баренцевоморские воды, образующиеся в результате охлаждения, образования льда и опускания поверхностной воды в холодное время года. Плотные баренцевоморские воды накапливаются в придонных слоях и периодически заполняют глубоководные впадины северной и восточной частей Баренцева моря, и особенно Центральную впадину, расположенную восточнее разреза (Воды Баренцева моря..., 2016; Titov, 2020).

Термохалинный режим южной части Баренцева моря, где расположен разрез «Кольский меридиан», формируется под влиянием адвекции тепла и солей системой теплых течений, теплообмена с атмосферой, притока солнечной радиации, речного стока, атмосферных осадков и испарения, процессов образования и таяния льда (Воды Баренцева моря..., 2016). В результате периодического усиления

интенсивности таяния льда с начала 2010-х годов в водах южной части разреза отмечались отрицательные аномалии солености, достигавшие наибольших значений во второй половине 2010-х годов. Кроме того, ежегодно в весенне-летний период происходит опреснение верхнего слоя моря, особенно сильное в прибрежных водах, находящихся под влиянием материкового пресноводного стока (120 лет океанографических..., 2022). Перечисленные выше процессы оказывают самое непосредственное влияние на динамику уровней загрязнения воды и донных отложений станций разреза «Кольский меридиан». В «ПИНРО» им. Н.М. Книповича выполняется ежегодный мониторинг уровня загрязнения среды обитания гидробионтов на станциях упомянутого разреза.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование загрязненности морской воды и донных отложений (ДО) включали в себя отбор проб, их подготовку и проведение анализа уровней содержания основных групп загрязняющих веществ: металлов, неполярных алифатических углеводородов (АУ, *n*-парафинов), полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), хлорорганических пестицидов (ХОП), полихлорбифенилов (ПХБ). В работе использованы экспедиционные материалы, собранные сотрудниками ПИНРО в рейсах НИС «Смоленск», «Фритьоф Нансен», «Вильнюс» и др. в период 2003-2021 гг. Исследование уровней загрязнения вод и ДО проводили в химико-аналитической лаборатории ПИНРО.

Определение концентраций металлов и As в пробах воды выполняли в соответствии с методиками, изложенными в ПНД Ф 14.1:2.214-06 и РД 52.10.243-92. Определение металлов в ДО проводилось в соответствии с методическими указаниями (М 02902-125-2005; М-МВИ-80-2008). Металлы (Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Co, Pb, Fe, Cd) и As определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре фирмы «Shimadzu» (Япония) модель AA-6800 методами пламенной и непламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Общую Hg определяли методом «холодного пара» на гидридной приставке к атомно-абсорбционному спектрофотометру.

Концентрации АУ в пробах воды устанавливали в соответствии с ГОСТ Р 52406-2005, алифатические углеводороды C₈–C₃₁ – методом капиллярной газовой хроматографии на газовом хроматографе «Shimadzu» – GC-2010A (Япония), с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной кварцевой колонкой длиной 30 м.

Для определения концентраций ПАУ в пробах воды использовали методику, изложенную в МУК 4.1.663-97. Сумму индивидуальных ПАУ (аценафтилен, аценафтен, флуорен, дибензтиофен, фенан-трен, антрацен,

флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(е)пирен, бенз(а)пирен, перилен, индено(1,2,3-сd)пирен, ди-бенз(а,h)антрацен, бенз(g,h,i)перилен) определяли методом хроматомасс-спектрометрии на хроматомасс-спектрометре Agilent 6890N/5973 с кварцевой капиллярной колонкой HP-5 MS длиной 30 м.

Определение концентраций ХОП в пробах воды выполняли по ПНД Ф 14.1:2:4.204-04, в пробах ДО – М-МВИ-209-08. ХОП – α -, β -, γ -гексахлорциклогексан, гексахлорбензол, цис-, транс-хлордан, транс-нонахлор), метаболиты дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) (о,р'-ДДЕ, р,р'-ДДЕ, о,р'-ДДД, р,р'-ДДД, о,р'-ДДТ, р,р'-ДДТ) определяли методом капиллярной газовой хроматографии на хроматомасс-спектрометре GCMS-QP2010 Plus «Shimadzu» с капиллярной колонкой длиной 30 м.

Для измерений в пробах воды концентраций ПХБ использована методика из ПНД Ф 14.1:2:4.204-04, ДО – М-МВИ-09-97. ПХБ (конгинеры с номерами по номенклатуре IUPAC 28, 31, 52, 99, 101, 105, 118, 138, 153, 156, 180, 187) определяли тем же методом, что ХОП.

Статистическую обработку результатов исследований проводили в среде MS Excel и программе Statistica 13 (StatSoft, Inc.).

Всего проанализировано 390 проб воды и 131 проба донных осадков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным исследований концентрации тяжелых металлов (ТМ), As, ХОП, ПХБ, ПАУ и АУ в воде на разрезе «Кольский меридиан» в 2003-2021 гг. варьировали в очень широком диапазоне и могли отличаться в десятки раз. Концентрация Cu в воде на разрезе «Кольский меридиан» колебалась от <0,001 до 4,9, Zn – от 0,12 до 54,6, Ni – от <0,001 до 5,5, Cr – от <0,001 до 4,7, Mn – от <0,001 до 4,52, Co – от <0,001 до 0,94, Pb – от <0,001 до 1,0, Fe – от 0,8 до 120, Cd – от <0,001 до 1,3, As – от <0,001 до 1,95, Hg – от <0,001 до 0,1 мкг/л. Концентрации Zn и Fe в воде разреза в единичных случаях превышали установленные нормативы – рыбохозяйственные предельно допустимые концентрации (ПДК_{р/х}), которые составляют 50 мкг/л. Концентрация остальных металлов и As во всех пробах воды было ниже их ПДК_{р/х} (Приказ Минсельхоза России..., 2016).

Распределение данных о концентрации в воде ТМ и As отличалось от нормального согласно критерию Колмогорова-Смирнова. Не прослеживалось статистически значимых различий по загрязнению металлами поверхностного и придонного слоев воды (критерий Манна-Уитни: $p = 0,26-0,85$). Воды Прибрежной и Основной ветвей Мурманского течения, а также Центральной ветви Нордкапского статистически значимо

не отличались между собой по концентрации в воде Ni, Zn, Cr, Mn, Co, Pb, Fe, Cd и As (критерий Краскелла-Уоллиса: $p = 0,073-0,96$). Вместе с тем анализ результатов, полученных в 2021 г., показал, что в отдельные годы на разрезе может наблюдаться более высокое загрязнение Ni вод Прибрежной ветви Мурманского течения и As вод Центральной ветви Нордкапского течения (Горбачева, Лаптева, 2022). Вероятно, значительная межгодовая и сезонная изменчивость содержания ТМ на разрезе затрудняет выявления различий в степени загрязнения ими прибрежных и атлантических вод.

Обобщенные данные, полученные в различные месяцы по сетке станций на разрезе «Кольский меридиан», позволяют говорить о сезонных различиях в загрязнении вод некоторыми ТМ и органическими соединениями. Так, например, максимальные концентрации (медианы) в воде на разрезе Cu и Ni регистрировали в июне, Cd – августе (рис. 1, 2).

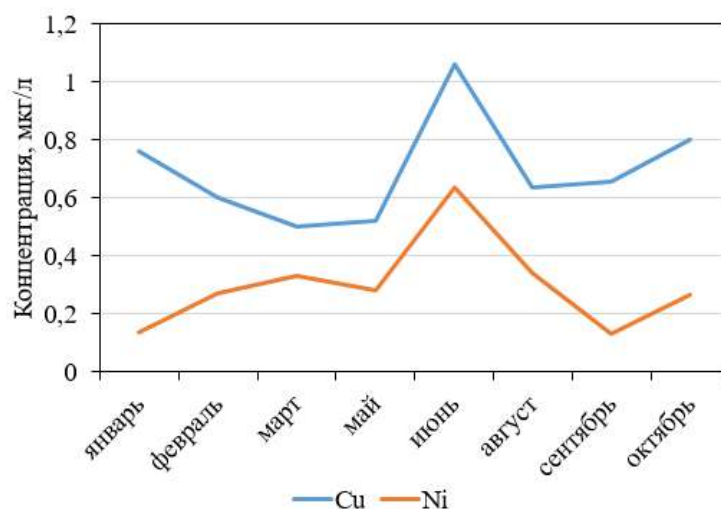


Рис. 1. Динамика медианной концентрации Cu и Ni в воде на разрезе «Кольский меридиан»

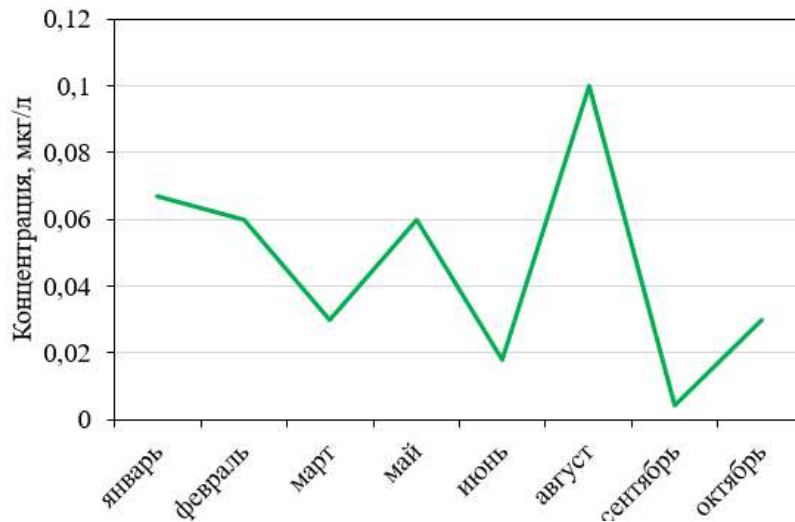


Рис. 2. Динамика медианной концентрации Cd в воде на разрезе «Кольский меридиан»

Сравнение полученных данных с использованием критерия Манна-Уитни показало, что содержание Hg в воде на разрезе в сентябре-октябре статистически значимо выше ($p = 0,000$), чем в январе-августе (рис. 3). Загрязнение воды As на разрезе в мае-октябре статистически значимо ниже ($p = 0,000$), чем в январе-марте (рис. 4).

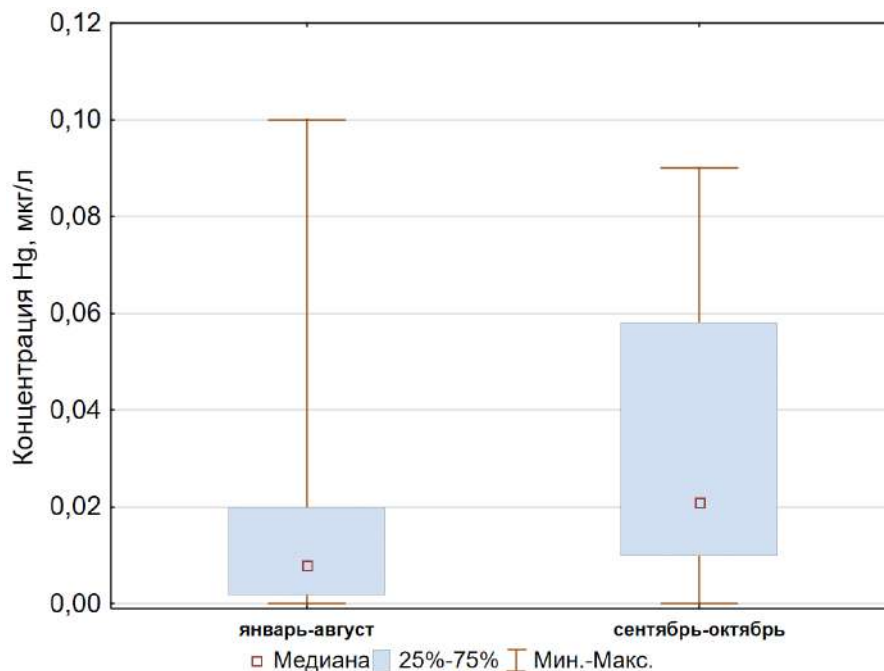


Рис. 3. Концентрация Hg в воде на разрезе «Кольский меридиан»

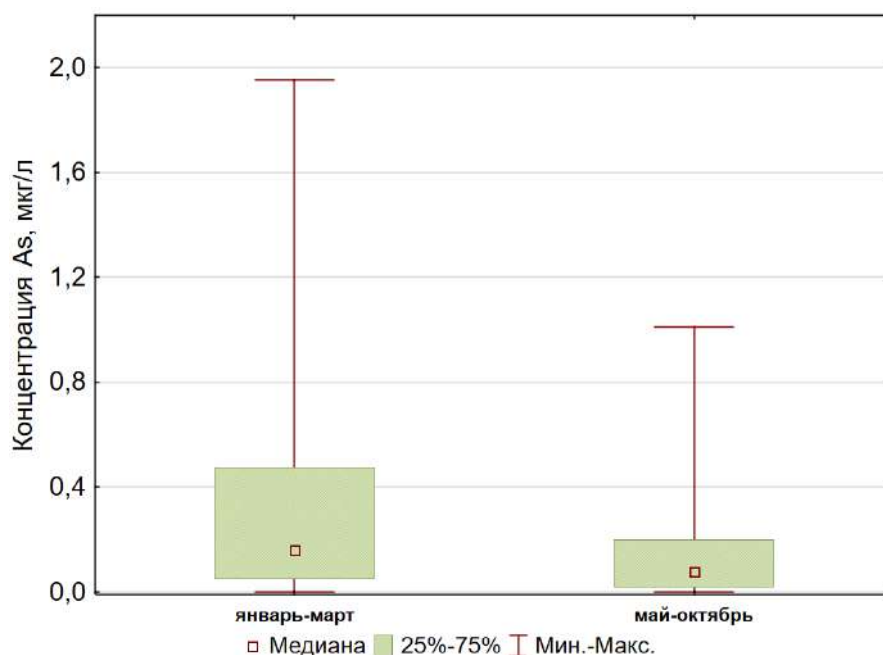


Рис. 4. Концентрация As в воде на разрезе «Кольский меридиан»

Концентрация АУ (*n*-парафинов) в морской воде изменялась в диапазоне от 0,83 до 33,4 мкг/л (данные 2003-2016 гг.). Определение концентраций *n*-парафинов в объектах окружающей среды используется для характеристики загрязненности нефтью и нефтепродуктами (Немировская, 2004). Следует отметить, что ни в одной из исследованных проб воды не наблюдалось превышение ПДК_{р/х} по нефтепродуктам – 50 мкг/л (Приказ Минсельхоза России..., 2016).

Концентрации в сумме ПАУ (Σ ПАУ) в воде варьировали от 0,31 до 120 нг/л (данные 2003-2016 гг.) и зачастую превышали глобальный фоновый уровень 20 нг/л (средняя концентрация ПАУ в морской воде чистых районов Антарктики) (Crips, 1995). Поверхностный и придонный слои воды не отличались по содержанию как Σ ПАУ (Манна-Уитни: $p = 0,07$), так и алифатических углеводородов ($p = 0,24$).

Концентрации в сумме ДДТ и его метаболитов (Σ ДДТ) в воде колебались от 0,08 до 1,64 нг/л, в сумме изомеров ГХЦГ (Σ ГХЦГ) – от <0,05 до 5,65 нг/л, ГХБ – от <0,05 до 0,67 нг/л, в сумме конгенов ПХБ (Σ ПХБ) – от 0,1 до 5,6 нг/л. Хлорданы в подавляющем большинстве проб воды присутствовали в концентрациях ниже предела обнаружения применяемого метода анализа (<0,05 нг/л). Концентрация хлорорганических пестицидов и ПХБ в воде не превышала ПДК_{р/х} (Приказ Минсельхоза России..., 2016).

В Σ ДДТ в воде доминировал метаболит *pp'*-ДДЕ, в Σ ГХЦГ – α -ГХЦГ. Во всех пробах воды соотношение *pp'*-ДДТ/*pp'*-ДДЕ <1, что

указывало давнее загрязнение этим пестицидом. В воде на разрезе в Σ ПХБ преобладали конгенеры с номерами по номенклатуре IUPAC 101, 118, 138 и 153. Следует отметить, что концентрация отдельных конгенов ПХБ в воде на разрезе заметно варьировала в зависимости от сезона года. Например, наиболее высокие концентрации (медианы) ПХБ-138 и ПХБ-153 наблюдались в марте, июне и августе, ПХБ-28 и ПХБ-31 – в августе. Кроме того, зимой и весной морская вода оказалась больше загрязнена α -ГХЦГ, чем летом и осенью (критерий Манна-Уитни: $p = 0,000$).

Содержание ТМ, таких как Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, Co, Cd и Hg, а также мышьяка в ДО станций разреза отличается значительной вариабельностью, которая зависит как от расположения станций, так и от сезона отбора проб. Вместе с тем средний уровень содержания ТМ и As был на уровне средних значений, характерных для Баренцева моря (Новиков, 2017; Новиков, Жилин, 2016). Аналогичная ситуация наблюдалась и с присутствием ХОС в ДО разреза за одним исключением: среднее содержание ГХЦГ в ДО разреза оказалось заметно выше (на 25 %), чем в среднем по морю: 2,19 против 1,65 нг/г сухой массы осадка. Распределение ГХЦГ в ДО Баренцева моря имеет особенности, отмеченные нами ранее (Новиков, 2021). Ниже мы остановимся на некоторых из них применительно к Кольскому разрезу.

Преобладающий тип грунта на станциях разреза песчаный ил (алевритовый пелит). На ст. 2 к нему добавляется илистый песок (пелитовый алеврит), на ст. 4 – глина, на ст. 9 – ил (пелит). Большинство станций разреза «Кольский меридиан» достаточно глубоководные и имеют следующую глубину: ст. 2 – 150, 3 – 250, 4 – 225, 5 – 275, 6 – 260, 7 – 280, 8 – 220, 9 – 290 и 10 – 310 м (Карсаков, 2009).

Самый высокий средний уровень загрязнения ДО металлами отмечен весной (май-июнь), самый низкий – в конце лета-осенью (август-октябрь). Весной же наблюдается наименьшая вариабельность в содержании ТМ в ДО по станциям разреза (минимальные величины стандартного отклонения). Наибольших значений по сравнению с предшествующим сезоном достигает увеличение среднего содержания Hg, Zn, Ni и Co. Вышеизложенное указывает на то, что в весенний период имеет место активный приток свежего загрязнения ТМ с западного направления, приносимый Норвежским и Нордкапским течениями, связанного главным образом со взвешенным веществом. Наибольшее содержание мышьяка в ДО, напротив, наблюдается зимой (январь-март), наименьшее – осенью. Характерно, что Co в повышенных количествах периодически наблюдается почти на всех станциях разреза «Кольский меридиан» (кроме ст. 5), что было отмечено нами ранее (Новиков, Драганов, 2021). При этом средние значения содержания Co на станциях разреза относительно

низкие, что говорит о высокой подвижности загрязнения кобальтом. Аналогичное явление отмечено и для Pb, но только для ст. 8 и 10, где среднее содержание этого металла почти не отличается от среднего, характерного для ДО Баренцева моря, но периодически регистрируются высокие значения, выше уровня фона – 31 мкг/г сухой массы (Новиков, 2017). По нашему мнению, наблюдаемые явления связаны с периодическим перемещением (обновлением) верхнего слоя ДО на разрезе.

Наибольший уровень содержания ХОС в ДО Баренцева моря отмечен в зимний период. Вполне вероятно, это является результатом осенней конвекции, опускания обогащенных ХОС поверхностных вод (вместе со взвесью) в придонный слой по мере охлаждения. Затем среднее содержание ХОС заметно снижается, причем наиболее значительно в отношении ГХБ (с 0,23 до 0,14 нг/г) и ПХБ (с 0,93 до 0,57 нг/г сухой массы). Заметное снижение величин стандартного отклонения среднего содержания ХОС в ДО весной косвенно указывает на активный процесс удаления наиболее подвижной части ХОС из ДО. Содержание ГХБ, ДДТ и ПХБ осенью снова возрастает. Напротив, содержание ГХЦГ постоянно и существенно снижается в течение года от 2,76 зимой до 1,55 нг/г сухой массы осенью. Таким образом, можно предположить, что регулярно, преимущественно в период поздней осени – начала зимы, происходит новое поступление ГХЦГ в ДО западной части Баренцева моря.

Наименьшее среднее содержание как ТМ и мышьяка, так и хлорорганических соединений отмечено на ст. 2. Наибольшее среднее содержание ТМ отмечено на ст. 7 и 9. Наибольшее содержание ХОС в ДО также отмечено на северных станциях разреза – ст. 8-10 (рис. 5). Здесь кажется очевидным влияние приноса ТМ и ГХЦГ Центральной ветвью Нордкапского течения в составе оседающей на ДО взвеси.

Наиболее значительно на разрезе изменяется содержание суммы ГХЦГ, наименее – суммы ПХБ (см. рис. 5). Содержание ГХБ также изменяется в широких пределах – от 0,12 до 0,31 нг/г сухой массы на ст. 2 и 6 соответственно. Резкое увеличение содержания ГХЦГ в направлении на север, начиная со ст. 6 (район Демидовского и Медвежинского желобов), – характерная ситуация для центральной части Баренцева моря (Новиков, 2021). Тем не менее источники появления повышенных количеств ГХЦГ в этом районе четко не прослеживаются.

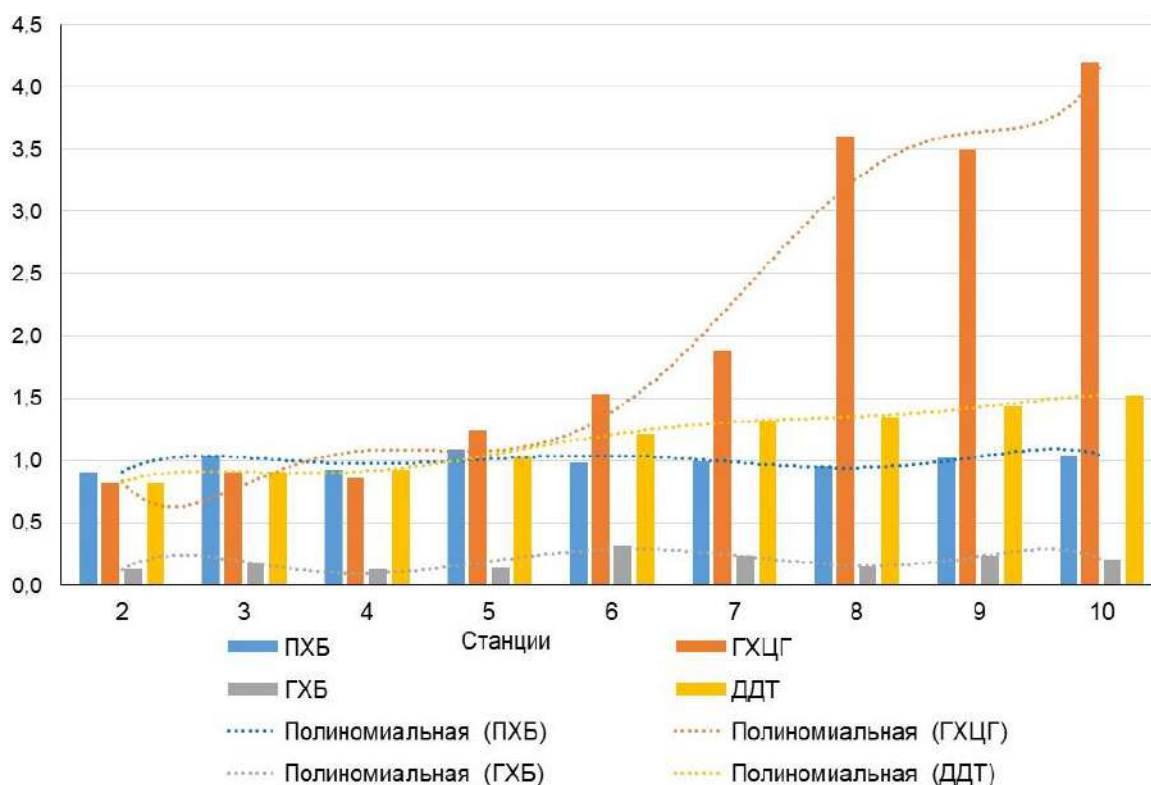


Рис. 5. Среднее содержание ХОС в донных отложениях станций разреза «Кольский меридиан» с указанием линий трендов (полином 6-й степени)

Известно, что область распространения придонных собственно баренцевоморских вод захватывает северную часть разреза «Кольский меридиан» (Titov, 2020). Ранее было высказано предположение, которое мы разделяем, что загрязнение может перемещаться из Центральной впадины в Демидовский желоб придонными течениями, увлекающими верхний слой ДО, наилок (Латеральные потоки взвешенного..., 2018). Наиболее способны к перемещению в придонном слое воды (и переотложению) тонкозернистые осадки, ил, песчаный ил и илистый песок. Подобным образом в ДО северных станций разреза могут попадать ТМ и мышьяк из Центральной впадины, однако откуда берется ГХЦГ в Центральной впадине по-прежнему остается невыясненным (Новиков, 2021, 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концентрации Ni, Cr, Mn, Co, Pb, Cd, As, ХОС и АУ в воде на разрезе «Кольский меридиан» не превышали рыбохозяйственные ПДК, установленные для этих химических элементов и соединений. Превышение ПДК_{р/х} Fe и Zn в воде наблюдалось единично и в целом было

не характерно для этого района Баренцева моря. Заметно чаще на разрезе регистрировалось превышение фонового уровня концентрации в воде Σ ПАУ.

На разрезе прослеживается сезонная изменчивость загрязнения вод некоторыми ТМ, мышьяком и ХОС, которая, вероятно определяется особенностями гидрологического режима района исследований. Увеличение растворимости ХОС при снижении температуры и уменьшение при ее увеличении также может быть одной из причин сезонных колебаний концентрации этих соединений в морских водах высоких широт.

Содержание загрязняющих веществ в ДО на разрезе отличается значительной вариабельностью, которая зависит как от расположения станций, так и от сезона отбора проб.

Наибольший уровень содержания ТМ в ДО Баренцева моря наблюдается, как правило, весной в мае-июне, а мышьяка и ХОС – в январе-марте. Наиболее загрязнены северные станции разреза «Кольский меридиан» (ст. 7-10), что может быть связано с переносом загрязнения в виде взвешенного вещества как с западного (Нордкапское течение), так и с восточного (из Центрального желоба) направлений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В.К. Ожигин, В.А. Ившин, А.Г. Трофимов [и др.]; ПИНРО. – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2016. – 260 с.

Горбачева, Е.А. Содержание металлов и мышьяка в воде на разрезе «Кольский меридиан» (Баренцево море) / Е.А. Горбачева, А.М. Лаптева // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: материалы XIII Национальной (всероссийской) научн.-практ. конф. (29-30 марта 2022 г.) / отв. за вып. Н.Г. Ключкова. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2022. – С. 164-168.

Карсаков, А.Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900-2008 гг. / А.Л. Карсаков. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. – 139 с.

Латеральные потоки взвешенного вещества на разрезе «Кольский меридиан» / М.В. Митяев, М.В. Герасимова, Л.Г. Павлова [и др.] // Тр. КНЦ РАН. – 2018. – № 4 (9). Серия Океанология, вып. 5. – С. 109-117.

Немировская, И.А. Углеводороды в океане (снег-лед-вода-взвесь-донные осадки) / И.А. Немировская. – М.: Мир, 2004. – 328 с.

Новиков, М.А. Атлас загрязнения донных отложений Баренцева моря / М.А. Новиков, Д.М. Драганов; Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича). – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2021. – 183 с.

Новиков, М.А. Зоны аккумуляции загрязнения в донных отложениях Баренцева моря / М.А. Новиков // Океанология. – 2022. – Т. 62, № 4. – С. 578-589.

Новиков, М.А. К вопросу о фоновых значениях уровней содержания тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря / М.А. Новиков // Вестник МГТУ. – 2017. – Т. 20, № 1-2. – С. 280-288.

Новиков, М.А. Стойкие органические загрязнители в донных отложениях Баренцева моря / М.А. Новиков // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48, № 3. – С. 334-343.

Новиков, М.А. Характер распределения тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря (по результатам статистического анализа) / М.А. Новиков, А.Ю. Жилин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2016. – Вып. 29, № 1. – С. 78-88.

Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, М.Ю. Анциферов [и др.]; Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича). – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2022. – 145 с.

Crips, G.C. Baseline level of hydrocarbons in seawater of the Southern Ocean. Natural Variability and regional patterns / G.C. Crips // Marine Pollution Bulletin. – 1995. – Vol. 30, № 2. – P. 133-145.

Titov, O.V. Deep-water aeration and the Barents Sea ecosystem renewal: Natural regulation of the Northeast Arctic cod recruitment / O.V. Titov // Progress in Oceanography. – 2020. – Vol. 189. – Iss. 102467. – 12 p.

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ НА СОСТАВ МИКРОПЛАНКТОНА БАРЕНЦЕВА МОРЯ

А.А. Олейник, Е.И. Дружкова, В.В. Ларионов, П.Р. Макаревич
*Мурманский морской биологический институт РАН
(ММБИ РАН), Мурманск*

Аннотация. Представлены данные об изменении видового состава микропланктона в Баренцевом море за 2007-2019 гг. Выделены три категории видов по признакам регулярности присутствия и характеру распределения на акватории, сделаны выводы о натурализации видов каждой категории.

Ключевые слова: микропланктон, Баренцево море, климат.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что последние десятилетия в Арктике характеризуются как период потепления, который выражен в гораздо большей степени, чем в целом в Северном полушарии или потепление глобальное; этот феномен принято называть арктическим, или полярным усилением (Изменения климата Арктики..., 2015; Семенов, 2015). Отмечено согласованное изменение ряда океанологических параметров: рост температуры, снижение общей ледовитости, уменьшение доли многолетних льдов в структуре ледового покрова (Matishov G.G., Matishov D.G., Moiseev, 2009; Working Group on..., 2021). В целом климатические изменения в атлантическом секторе Северного Ледовитого океана (СЛО) и Баренцевом море характеризуются как «атлантификация» (Аксенов, Иванов, 2018; Quantifying the influence..., 2012) и проявляются особенно сильно в последнее десятилетие – после 2007 г. на фоне устойчивого роста адвекции атлантических вод в высокие широты (Трофимов, Карсаков, Ившин, 2018).

Соответствующие изменения, отмеченные среди бентосных ракообразных (Первая находка и..., 2015; Десятиногие ракообразные Баренцева..., 2015; Spiridonov, Zalota, 2017; Zalota, Spiridonov, Vedenin, 2018), планктонных простейших (Макаревич, Олейник, 2020; Chovgan, 2019), рыб (Structure of the..., 2013; The state and..., 2018) и птиц (Горяев, Ежов, Клепиковский, 2021), в общем можно определить как «бореализацию» баренцевоморской биоты (Recent warming leads..., 2015).

Цель настоящей работы – выявить основные закономерности пространственного распределения и сезонной динамики новых видов микропланктона, отмеченных в Баренцевом море (Findings of new..., 2023).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для настоящей работы послужили планктонные сборы, выполненные в ходе экспедиционных исследований в 2007-2019 гг. на акватории Баренцева моря (Findings of new..., 2023).

Планктонные пробы отбирали батометром и/или сетью с фильтрующим конусом из газа с ячейей размером 29 мкм, фиксировали нейтральным формалином до конечной концентрации около 1 %.

Батометрические пробы объемом около 1 л концентрировали способом обратной фильтрации (Первичная продукция и..., 1975) через трековые мембранные фильтры с порами размером 0,95 или 2 мкм. Остаток с отфильтрованной взвесью сливали в пробирку и отстаивали, после чего делали повторное концентрирование путем медленного сливания надосадочной жидкости через эластичную трубку с U-образно изогнутым капилляром на конце; аналогичным способом повторно декантировали сетные пробы.

Микроскопирование производилось в проходящем свете при увеличениях $\times 100-400$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С 2007 по 2019 г. в Баренцевом море встречено 29 видов микропланктона, до этого времени на акватории не отмечавшихся.

Анализ встречаемости показал, что редкие виды, отмеченные нами только 1-2 раза за весь период наблюдений, четко приурочены к южной части Баренцева моря, почти всегда – на восток не далее 33-35° Е.

Список новых видов микропланктона, эпизодически встречающихся в юго-западной части Баренцева моря (по данным 2007-2019 гг.):

- 1) Диатомовые Bacillariophyta:
 - *Proboscia indica* Hernández-Becerril.
- 2) Динофлагелляты Dinophyta:
 - *Amphidoma caudata* Halldal;
 - *Corythodinium diploconus* Taylor;
 - *Dinophysis hastata* Stein;
 - *Dinophysis nasuta* Parke et Dixon;
 - *Gotoius mutsuensis* Matsuoka;
 - *Heterodinium milneri* Kofoid;
 - *Mesoporos perforatus* Lillick;
 - *Pronociluca rostrata* Taylor;
 - *Protoperidinium brochii* Balech;
 - *Protoperidinium thulesense* Balech;
 - *Pyrophacus horologium* Stein;

– *Spatulodinium pseudonoctiluca* Cachon et Cachon.

3) Инфузории Ciliophora:

– *Ormosella haeckeli* Kofoid et Campbell;

– *Tontonia gracillima* Fauré-Fremiet.

4) Радиолярии Radiolaria (sensu Müller, 1858):

– *Actinomma leptoderma* (Jørgensen);

– *Lithomitra lineata* (Ehrenberg);

– *Rhizoplegma boreale* (Cleve).

Также в южной части моря встречаются виды, регулярно (при каждом обследовании) отмечаемые или в осенне-зимний (*Amphorellopsis tetragona*, *Leptocylindrus mediterraneus* + *Solenicola setigera*, *Parundella caudata*, *Podolampas palmipes*), или в летний периоды (*Protoperidinium laticeps*, *Synchaeta triophthalma*).

Список видов микропланктона, регулярно встречающихся в южной части Баренцева моря (по данным 2007-2019 гг.):

1) Динофлагелляты Dinophyta:

– *Podolampas palmipes* Stein;

– *Protoperidinium laticeps* Balech.

2) Инфузории Ciliophora:

– *Amphorellopsis tetragona* (Jørgensen);

– *Parundella caudata* (Ostenfeld).

3) Коловратки Rotifera:

– *Synchaeta triophthalma* Lauterborn.

4) Incertae sedis:

– *Leptocylindrus mediterraneus* Hasle + *Solenicola setigera* Pavillard.

Несколько видов распространено как на юге, так и на севере Баренцева моря, встречаясь и в осенне-зимний, и в летний сезоны.

Список новых видов микропланктона, встречающихся на севере и юге Баренцева моря (по данным за 2007-2019 гг.):

1) Динофлагелляты Dinophyta:

– *Ceratium strictum* Kofoid;

– *Dicroerisma psilonereiella* Taylor et Cattell;

– *Dinophysis ovata* Claparède et Lachmann;

– *Oxytoxum caudatum* Schiller;

– *Pentaparsodinium dalei* Indelicato et Loeblich III.

Очевидно, что наибольшим потенциалом на закрепление в экосистеме обладают виды из последних двух категорий – сезонно или постоянно присутствующие в пелагиали. При этом виды первой группы, приуроченные в развитии к районам непосредственного влияния атлантических вод, вероятно, представляют собой климатических мигрантов и в этом смысле зависят от динамики течений Нордкапского и

Норвежского прибрежного. Виды из последней выделенной категории в настоящее время должны рассматриваться как вполне натурализовавшиеся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная климатическая обстановка способствовала инвазии ряда видов микропланктона из атлантических вод в баренцевоморский бассейн (Макаревич, Олейник, 2020; Findings of new..., 2023). В настоящее время популяции шести видов сезонно присутствуют в южном или юго-западном секторах Баренцева моря и при текущем климатическом тренде будут сохраняться и распространяться по акватории моря. Вероятно, при таких условиях в эту группу климатических мигрантов включатся и другие, редкие пока микропланктеры из сравнительно обширного списка видов, до сих пор отмечаемых в Баренцевом море эпизодически.

Пять видов, отмеченных по результатам исследований в 2007-2019 гг. как новые, к настоящему времени являются вполне обычными и их присутствие в экосистеме Баренцева моря не связано с текущим климатическим трендом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аксенов, П.В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон / П. В. Аксенов, В. В. Иванов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2018. – Т. 64, № 1(115). – С. 42-54.

Горяев, Ю.И. О смещении границы общего ареала серого буревестника (*Puffinus griseus*) в Северной Атлантике в моря западного сектора Российской Арктики / Ю.И. Горяев, А.В. Ежов, Р.Н. Клепиковский // Беркут. – 2021. – Т. 30, № 1. – С. 25-26.

Десятиногие ракообразные Баренцева моря и прилежащей акватории: видовой состав и особенности распределения / О.Л. Зиминая, П.А. Любин, Л.Л. Йоргенсен [и др.] // Arthropoda Selecta. Русский артроподологический журнал. – 2015. – Т. 24, № 4. – С. 417-428.

Изменения климата Арктики при глобальном потеплении / Г.В. Алексеев, В.Ф. Радионов, Е.И. Александров [и др.] – Проблемы Арктики и Антарктики. – 2015. – № 1(103). – С. 32-41.

Макаревич, П.Р. Флористические находки в Баренцевом море климатический тренд как фактор флорогенеза / П.Р. Макаревич, А.А. Олейник // Российский журнал биологических инвазий. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 40-50.

Первая находка и возможности формирования популяции камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* (Crustacea Decapoda Lithodidae) в Белом море / Ю.В. Стариков, В.А. Спиридонов, А.Д. Наумов [и др.] // Российский журнал биологических инвазий. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 79-95.

Первичная продукция и фитопланктон района экваториальной дивергенции в восточной части Тихого океана / Ю.И. Сорокин, И.Н. Суханова, Г.В. Коновалова [и др.] // Экосистемы пелагиали Тихого океана. Тр. Ин-та океанологии АН СССР. – 1975. – Т. 102. – С. 108-122.

Семенов, В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера-арктические льды-океан / В.А. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – Т. 1. – С. 232-248.

Трофимов, А.Г. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека / А.Г. Трофимов, А.Л. Карсаков, В.А. Ившин // Труды ВНИРО. – 2018. – Т. 173. – С. 79-91.

Chovgan, O. Review of tintinnid species (Ciliophora Tintinnina) from the Barents Sea / O. Chovgan. – DOI 10.21685/1680-0826-2019-13-3-5 // Protistology. – 2019. – Vol. 13, № 3. – P. 159-165.

Findings of new phytoplankton species in the Barents Sea as a consequence of global climate changes / P. Makarevich, V. Larionov, A. Oleinik [et al.]. – DOI 10.7717/peerj.15472. – PeerJ. – 2023, Jun 13. – Art. 11e15472.

Matishov, G.G. Inflow of Atlantic-origin waters to the Barents Sea along glacial troughs / G.G. Matishov, D.G. Matishov, D.V. Moiseev // Oceanologia. – 2009. – 51(3). – P. 321-340.

Quantifying the influence of Atlantic heat on the Barents Sea ice variability and retreat / M.A. Årthun, T. Eldevik, L.H. Smedsdrud [et al.] // Journ. Clim. – 2012. – № 25. – P. 4736-4743.

Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic / M. Fossheim, R. Primicerio, E. Johannesen [et al.] // Nature Climate Change. – 2015. – Vol. 5. – P. 673-677.

Spiridonov, V.A. Understanding and forecasting dispersal of non-indigenous marine decapods (Crustacea Decapoda) in East European and North Asian waters / V.A. Spiridonov, A.K. Zalota // J. Mar. Biol. Assoc. UK. – 2017. – Vol. 97, № 3. – P. 591-611.

Structure of the macroplankton-pelagic fish-cod trophic complex in a warmer Barents Sea / E.L. Orlova, A.V. Dolgov, V.D. Boitsov [et al.]. – DOI 10.1080/17451000.2013.775453 // Marine Biology Research. – 2013. – Vol. 9, № 9. – P. 851-866.

The state and trends of the Barents Sea ecosystem in 2017 / E. Bagøien, A.N. Benzik, B. Bogstad [et al.] // Interim Report of the Working Group on the

Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR) / ICES. – Copenhagen ICES, 2018. – P. 69-207.

Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR) ICES Scientific Reports / P. Arneberg, E. Bagøien, A.N. Benzik [et al.]. – DOI 10.17895/ices.pub.8241. – Copenhagen ICES, 2021. – Vol. 3, Iss. 77. – 236 p.

Zalota, A.K. Development of snow crab *Chionoecetes opilio* (Crustacea Decapoda Oregonidae) invasion in the Kara Sea / A.K. Zalota, V.A. Spiridonov, A.A. Vedenin // *Polar Biology*. – 2018. – Vol. 41. – P. 1983-1994.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРА $\delta^{18}\text{O}$ В ИССЛЕДОВАНИЯХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

И.А. Пастухов, А.А. Намятов

*Мурманский морской биологический институт РАН (ММБИ РАН),
г. Мурманск*

Аннотация. Изотопный параметр $\delta^{18}\text{O}$ используется в океанографии для расчета пропорций смешивания атлантических, речных и талых вод, а также относительного содержания трансформированных в ходе ледообразования и ледотаяния вод. Значения этих соотношений и концентрации биогенных веществ в ядрах данных типов вод позволяют рассчитать «консервативную» концентрацию, которая определяется только смешением вод. Значения выступают точками отсчета для расчета изменения запасов биогенных веществ в морской воде за счет «неконсервативных» факторов, таких как фотосинтез и геохимическая седиментация, что позволяет перейти от постоянных стехиометрических соотношений к «плавающим», которые и наблюдаются в реальных экосистемах. С помощью этого метода исследованы особенности потребления биогенных веществ и изменения продукции в Баренцевом море. В результате выделено несколько районов: один – с максимальными значениями валовой первичной продукции ($GPP > 150 \text{ г С м}^{-2}$), три – с повышенными значениями ($GPP > 100 \text{ г С м}^{-2}$) и два – с относительно низкими значениями ($GPP < 100 \text{ г С м}^{-2}$). Применение этого метода к существующим рядам солености и содержания биогенных веществ позволит в будущем перейти к изучению климатической изменчивости этих параметров, начиная от изменчивости потребления биогенных веществ и заканчивая изменчивостью продуктивности исследуемых районов.

Ключевые слова: Баренцево море, изотопы, биологическая продуктивность, стехиометрические соотношения.

ВВЕДЕНИЕ

Воды Баренцева моря являются высокопродуктивными акваториями, на долю которых приходится значительный объем первичной продукции на панарктическом шельфе (Sakshaug, Stein, Macdonald, 2004), поэтому одна из задач экосистемных исследований – выявление и изучение районов, потенциально наиболее благоприятных с точки зрения состояния кормовой базы для рыб и других промысловых объектов, т.е. районы с наибольшей обеспеченностью фитопланктона биогенными элементами. Именно фитопланктон играет решающую роль в формировании кормовой базы различных водных организмов, в том числе промысловых рыб. Существует несколько подходов к оценке продукции фитопланктона: прямые измерения, по хлорофиллу (напрямую и дистанционно), с помощью моделей и седиментационных ловушек. Современные методы определения биологической продуктивности, основанные на изменении

концентрации биогенных элементов, предполагают нахождение разницы между измеренным количеством биогенного элемента и его количеством, которое находилось в данном объеме воды в момент формирования физико-химических свойств в поверхностном слое океана (Кивва, 2014). В некоторых работах эти величины называются преформ-концентрациями: преформ-фосфаты (P_{pf}), преформ-нитраты (N_{pf}), преформ-кремний (Si_{pf}). Для перехода от величины потребления биогенных элементов к первичной продукции, т.е. к потреблению углерода, применяются средние стехиометрические соотношения Редфилда-Ричардса, однако использование этих соотношений для фитопланктона с различным видовым составом может привести к большим ошибкам, поскольку соотношения представленных элементов существенно отличаются в разных систематических группах. Чтобы избежать указанных недостатков, предлагается обратиться к изотопному параметру $\delta^{18}O$, который обладает уникальными консервативными свойствами. Он не зависит от химико-биологических процессов и является идеальным трассером для балансовых оценок. Применение этого параметра позволяет точно определить точку отсчета, т.е. максимальную концентрацию биогенного элемента перед началом процесса фотосинтеза. Определение разности между точкой отсчета и измеренной концентрацией биогенных элементов, т.е. величины потребления, дает возможность перейти от средних стехиометрических соотношений к «реальным», соответствующим истинному составу систематических групп фитопланктона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предполагается, что измеренная концентрация питательного вещества в точке состоит из «консервативной» и «неконсервативной» концентраций (1):

$$C_{meas} = C_{con} \pm \Delta C_{non-con}, \quad (1)$$

где C_{meas} – результирующая (измеренная) концентрация;

C_{con} – «консервативная» концентрация, зависящая только от смешения различных вод без учета фотосинтетической или геохимической активности (вынос осадков);

$\Delta C_{non-con}$ – «неконсервативная» часть, состоящая из «продуктивной» C_{phyto} (изменение концентрации в результате процесса фотосинтеза или минерализации органического вещества) и «непродуктивной» C_{sed} (изменение концентрации в результате обмена с нижележащими слоями в результате вертикального перемешивания «непродуктивной» составляющей, а также притока в результате адвекции) компонент.

«Консервативная» концентрация может быть определена по следующему уравнению (Parameter $\delta^{18}\text{O}$ in..., 2023):

$$C_{con} = f_a \times C_a + f_r \times C_r + f_i \times C_i, \quad (2)$$

$$f_a + f_r + f_i = 1, \quad (3)$$

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, %; для простоты будем называть эту величину «ледовыми» водами.

Разница между измеренным и «консервативным» значениями будет определять «неконсервативное» значение:

$$\Delta C_{non-conj} = C_{measj} - C_{conj}, \quad (4)$$

где j – рассматриваемый параметр (минеральный фосфор, кремний, азот или любой другой).

Тогда при $\Delta C_j < 0$ происходит снижение концентрации того или иного биогенного элемента за счет «неконсервативных» факторов.

«Неконсервативная» составляющая, которая зависит только от фотосинтетической активности и минерализации образовавшегося органического вещества, уменьшается за счет возврата этого элемента в морскую среду в результате его регенерации и рассчитывается для каждого месяца по уравнению:

$$Q_{phyto}^n = Q_c^n - Q_m^n - \Delta Q_{sed} + (Q_{phyto}^{n-1}) \times K_j, \quad (5)$$

где Q_c^n и Q_m^n – среднемесячные значения интегралов C_{con} и C_{meas} от поверхности до выбранного переходного горизонта для значения насыщенности воды растворенным кислородом выше 100 %;

ΔQ_{sed} – величина непродуктивной составляющей, которая определяется минимальной разницей за год между интегралами Q_c^n и Q_m^n ;

(Q_{phyto}^{n-1}) – величина, по которой определяется объем регенерации питательных веществ за месяц n ;

K_j – коэффициент для рассматриваемой территории, который определяется по наибольшей крутизне уменьшения Q_{phyto}^n от месяца $n-1$ к месяцу n за год.

Коэффициент регенерации постоянен на данной территории в течение всего года, но абсолютное значение величины регенерации будет меняться от месяца к месяцу, так как она отсчитывается от количества уже потребленных к этому времени питательных веществ.

Для перехода от величины потребления биогенных веществ к первичной продукции, т.е. к потреблению углерода, в настоящее время в большинстве случаев используются усредненные стехиометрические соотношения Редфилда-Ричардса, которые в молярном виде составляют C:Si:N:P = 106:23:16:1 (Sakshaug, Stein, Macdonald, 2004). Применение этих соотношений для фитопланктона с различным видовым составом может привести к большим ошибкам. Например, изменение соотношения C:P в фитопланктоне от диатомовых до перидиниевых отличается на 37 %, изменение C:N – на 24 %, а C:Si – в 14 раз. Учет изменения соотношения C:Si особенно важен, поскольку расчет продукции по кремнию отражает общую продукцию (NCP).

В этой работе предполагается, что весь фитопланктон состоит только из двух систематических групп фитопланктона – диатомовых и динофлагеллятов, так как если оценивать все Баренцево море, то средняя сумма биомасс этих двух систематических групп фитопланктона составляет в среднем 94 % (Mailling, Moor, 1995). В таком случае можно рассчитать измеренное (реальное) стехиометрическое отношение углерода к одному из биогенных элементов (j), используя значения относительного химического состава фитопланктона:

$$dw_d + pw_p = w_j, \quad (6)$$

где d – относительный вклад углерода в биомассе диатомового планктона в общую первичную продукцию;

p – относительный вклад углерода в биомассе перидиниевого планктона в общую первичную продукцию;

w_d и w_p – стехиометрические отношения углерода к j -му биогенному элементу для этих систематических групп соответственно;

w_j – стехиометрические соотношения, которые рассчитываются по величине потребления питательных веществ в процессе фотосинтеза.

Индекс j – Si, N или Ph. В данной работе для дальнейших расчетов мы использовали соотношения биогенных элементов Si/Ph и Si/N.

$$w_{Si/Ph} = \frac{(Q_{phyto}^n)_{Si}}{(Q_{phyto}^n)_{Ph}}. \quad (7)$$

Используя эти уравнения, легко рассчитать значения d и p :

$$d = \frac{w_{Si/Ph} - w_p}{(w_d - w_p)}. \quad (8)$$

В данном случае w_d и w_p – это соотношение Si/Ph для диатомового и перидиниевого планктона. В результате можно рассчитать первичную продукцию:

$$(Q_{phyto}^n)_c = (Q_{phyto}^n)_j \times (dw_d + pw_p). \quad (9)$$

Индекс С – потребление углерода (первичная продукция). В данном случае это значение (NCP_{Si}), если использовался расчет для кремния ($j = Si$, w_d и w_p – стехиометрические соотношения углерода к кремнию), или значение (NCP_N), если использовался расчет для азота ($j = N$, w_d и w_p – стехиометрические соотношения углерода к азоту).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам расчетов построены карты распределения среднемесячных концентраций первичной продукции в Баренцевом море по кремнию и азоту (рис. 1). По этим картам в море формально можно выделить шесть центров, в четырех из которых наблюдаются повышенные значения этой величины (I-IV), в двух – пониженные (V-VI).

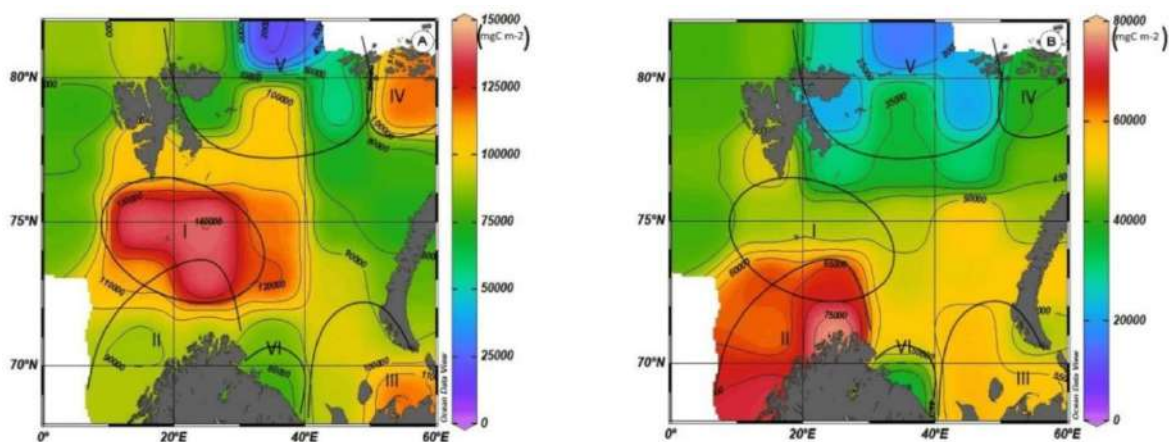


Рис. 1. Расчетные значения первичной продукции (мг С м^{-2}) для кремния (А) и азота (В). Средние значения с июля по сентябрь. Римскими цифрами обозначены выделенные регионы

Регион I. В этом районе, расположенном в зоне притока атлантических вод, наблюдаются максимальные значения первичной продукции. Средние значения общей первичной продукции по кремнию (NCP_{Si}) в период максимального развития фотосинтеза (август-сентябрь) находятся на уровне $\sim 160 \text{ г С м}^{-2}$ ($152 \pm 36 \text{ г С м}^{-2}$) с максимумами до $\sim 190 \text{ г С м}^{-2}$. Увеличение первичной продукции в среднем по этому району

наблюдается до ноября ($\sim 100-120 \text{ г С м}^{-2}$), а затем происходит резкий спад к декабрю до $56 \pm 14 \text{ г С м}^{-2}$. Средние значения суммарной первичной продукции для азота NCP_N в период максимального развития фотосинтеза на 100 г С м^{-2} меньше, чем NCP_{Si} и составляют $58 \pm 9 \text{ г С м}^{-2}$.

Регион II. Через этот регион происходит сток атлантических вод в Баренцево море. Кроме того, он расположен в зоне континентального склона на западной границе шельфа Баренцева моря. Перепад глубин здесь составляет от 200-500 м в восточной части района до 2000-3000 м в его западной части. Глубина нижней границы эвфотического слоя составляет 50-80 м. В отличие от района I, в районе II наибольшие значения NCP_{Si} меньше на 50 г С м^{-2} ($103 \pm 11 \text{ г С м}^{-2}$). Кроме того, в этом регионе разница между наибольшими значениями NCP_{Si} и NCP_N ($73 \pm 7 \text{ г С м}^{-2}$) составляет всего около 30 г С м^{-2} .

Регион III. Регион испытывает значительное влияние стока р. Печора (см. рис. 1). Наибольшее значение NCP_{Si} составляет $106 \pm 7 \text{ г С м}^{-2}$, а для новой продукции – $65 \pm 4 \text{ г С м}^{-2}$. В отличие от участков, расположенных в зоне атлантических вод, где остаточный запас ни одного из исследованных биогенных элементов не достигает критического значения, ограничивающего ход фотосинтеза, в данном районе таким лимитирующим фактором может быть азот. В период максимального развития процесса фотосинтеза (август-сентябрь) остаточный запас азота находится на уровне 10 %, наибольшее его потребление наблюдается в августе и составляет $90 \pm 6 \%$. Уровень потребления кремния в этом месяце – $80 \pm 2 \%$, фосфора – $70 \pm 6 \%$.

Регион IV. По средним многолетним данным, в течение всего года в этом регионе происходят сезонные ледовые процессы. С апреля по июнь вся акватория находится подо льдом. К июлю кромка льда поднимается к северу и половина региона освобождается ото льда. В августе, по средним многолетним данным, большая его часть свободна ото льда, но на севере, в районе $79-80^\circ \text{ с.ш.}$, акватория может быть покрыта льдом. С сентября начинается обратное движение кромки льда на юг. Уровень потребления азота в этой области является максимальным и с апреля по август находится в диапазоне 93-99 % от общего потребления этого элемента. Уровень потребления кремния составляет 75-95 %, хотя вариабельность этой величины достаточно велика. Потребление фосфора в активную фазу процесса фотосинтеза с апреля по сентябрь также имеет значительную изменчивость, но наибольшее потребление минеральных форм фосфора – 60-70 %. Наибольшие значения NCP_{Si} наблюдаются с мая по октябрь и находятся в диапазоне $110-125 \text{ г С м}^{-2}$. Значения NCP_N в три раза меньше и в этот период находятся в диапазоне $35-40 \text{ г С м}^{-2}$.

Район V. Характерной особенностью этого района является приток атлантических вод, прошедших через пролив Фрама в его западную часть, а также приток этих же вод с севера в северную и восточную части района. Глубины здесь изменяются от 100 м в южной части до 500 м в северной и северо-западной, а вблизи островов арх. Шпицберген они могут уменьшаться до 30-40 м. Нижняя граница эвфотического слоя проходит на глубине 40-45 м. Ледовые условия примерно такие же, как и в IV районе, но, по средним многолетним данным, лед полностью покрывает акваторию. В этом регионе, в отличие от предыдущих, лимитирующим фактором в развитии процесса фотосинтеза является не азот, а кремний. Максимальное потребление кремния достигает 94 %, максимальное потребление азота находится на уровне 86 %, а среднее по региону не превышает 80 %. Максимальное значение среднемесячных показателей NCP_{Si} составляет 80 ± 45 г С м⁻², а NCP_N – 27 ± 9 г С м⁻². Еще одной особенностью являются большие значения стандартного отклонения расчетных величин первичной продукции. Это объясняется наличием нескольких водных масс, а также сезонным влиянием ледовых явлений.

Регион VI. Воды западной части этого района принадлежат Мурманскому прибрежному течению, которое является частью Атлантического водного потока. Нижняя граница эвфотического слоя достигает глубин 75-80 м. Годовой цикл потребления биогенных элементов и первичной продукции соответствует циклам в регионе II. Основное отличие – средние значения первичной продукции, которая в раннелетний период, являющийся периодом максимальной интенсивности процесса фотосинтеза, примерно на 20 г С м⁻² ниже, чем в районе II. Аналогичное снижение расчетных значений первичной продукции до ~50-70 г С м⁻² наблюдается в водах, прилегающих к Кольскому п-ову (Intra-regional comparison..., 2011).

Исходя из полученных результатов измерений, стехиометрическое массовое соотношение для Баренцева моря можно записать следующим образом: C:Si:N:P = 56,6:13,2:10,1:1, или в атомном виде 146:15:22:1. Поскольку, как было показано выше, 94 % фитопланктона Баренцева моря составляют диатомовые и динофлагелляты, стехиометрические соотношения должны изменяться в диапазоне между соотношениями для этих двух систематических групп. Это и наблюдается в представленных результатах со смещением значений от коэффициентов Редфилда-Ричардса в сторону динофлагеллят. Соотношения C:P и C:N в Баренцевом море смещены на 29 и 23 % соответственно.

Представленная методика с использованием изотопного параметра в настоящее время имеет ряд ограничений: небольшое количество измеренных совместно значений изотопного параметра $\delta^{18}O$ и биогенных

элементов, особенно в речных и ледовых водах; устаревшие значения содержания биогенных элементов в планктоне. Преимуществами является то, что методы химического анализа для определения биогенных элементов достаточно просты, унифицированы в разных странах и хорошо отработаны для использования в полевых условиях. Кроме того, накоплены достаточно большие базы данных, содержащие эти величины в различных районах Мирового океана, поэтому, несмотря на все ограничения, использование данной методики при наличии длинного ряда солености и биогенных элементов позволяет перейти к изучению климатической изменчивости этих параметров, начиная с изменчивости потребления биогенных элементов и заканчивая изменчивостью продуктивности исследуемой акватории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены следующие пространственно-временные закономерности в динамике потребления биогенных элементов и первичной продукции:

– суммарное потребление нитратного азота на всей акватории восточной части моря в летний период находится на уровне суммарного потребления этого элемента в процессе фотосинтеза (90-95 %), т.е. является лимитирующим фактором в развитии процесса фотосинтеза. В западной части моря, где преобладают атлантические воды, значения потребления азота намного ниже (от 40 до 70 %) при максимальных значениях первичной продукции;

– распределение потребления кремния в южной и центральной частях моря имеет тенденцию к увеличению с запада на восток (от 30 до 60 %). В северной части моря, между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, кремний может быть лимитирующим фактором в развитии процесса фотосинтеза;

– на всей акватории Баренцева моря фосфатный фосфор не представляет собой лимитирующий фактор в развитии процесса фотосинтеза. Потребление этого элемента увеличивается с запада на восток (от 40 до 70 %);

– район с наибольшими средними значениями первичной продукции в летне-раннеосенний период в Баренцевом море ($NCP_{Si} > 150 \text{ г С м}^{-2}$), приуроченный к акватории Медвежинского мелководья и Шпицбергена; продукция составляет $152 \pm 36 \text{ г С м}^{-2}$, с максимальными значениями до 190 г С м^{-2} , хотя значения NCP_N в этом районе не самые высокие ($58 \pm 9 \text{ г С м}^{-2}$);

– к районам с относительно высокими значениями первичной продукции ($NCP_{Si} > 100 \text{ г С м}^{-2}$) относятся области в юго-западной и юго-

восточной частях моря, а также акватория, примыкающая с юга к архипелагу Земля Франца-Иосифа. Наибольшие значения NCP_N наблюдаются в юго-западной части моря и составляют $73 \pm 7 \text{ г С м}^{-2}$ при среднем значении NCP_{Si} $103 \pm 11 \text{ г С м}^{-2}$;

– к районам с относительно низкими значениями первичной продукции ($NCP_{Si} < 100 \text{ г С м}^{-2}$) относятся области на северной границе моря между арх. Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, а также область, примыкающая к побережью Кольского п-ова и простирающаяся от Варангер-фьорда до Горла Белого моря.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Кивва, К.К. Оценка первичной продукции Берингова моря с использованием нового подхода / К.К. Кивва // Труды ВНИРО. – М. – 2014. –

Т. 152. – С. 73-84.

Intra-regional comparison of productivity, carbon flux and ecosystem composition within the northern Barents Sea / M. Reigstad, J. Carroll, D. Slagstad [et al.] // Prog. Oceanogr. – 2011. – Vol. 90. – P. 33-46.

Mailling, H. Modification of halocline source waters during freezing on the Beaufort Sea shelf: Evidence from oxygen isotopes and dissolved nutrients / H. Mailling, R.M. Moor // Cont. Shelf Res. – 1995. – Vol. 15 – P. 89-113.

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. – DOI 10.3390/w15020328 // Water. – 2023. – Vol. 15. – 328 p.

Sakshaug, E. Primary and secondary production in the Arctic Seas. In The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean / E. Sakshaug, R. Stein, R.W. Macdonald, Eds.; Springer: Berlin // Heidelberg, Germany. – 2004. – P. 57-81.

ЗИМНИЙ ЗООПЛАНКТОН НА РАЗРЕЗЕ «КОЛЬСКИЙ МЕРИДИАН»

И.П. Прокопчук, А.Г. Трофимов

*Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
г. Мурманск*

Аннотация. Представлены результаты анализа видового состава, распределения численности и биомассы зоопланктона на разрезе «Кольский меридиан» в зимний период 2018-2023 гг. Дана характеристика океанографических условий в этом районе и оценено их возможное влияние на сообщества зимнего зоопланктона.

Ключевые слова: зоопланктон, температура воды, разрез «Кольский меридиан», Баренцево море.

ВВЕДЕНИЕ

Разрез «Кольский меридиан» находится на пути атлантических вод, следующих из Норвежского моря в Баренцево и далее в Арктический бассейн. Океанографические и гидробиологические исследования на этом разрезе позволяют оценивать термохалинные условия вод и состояние сообществ зоопланктона в южной части Баренцева моря. Особенности динамики и прогрева водных масс оказывают влияние на планктонные сообщества этого водоема, инициируя начало развития фитопланктона и размножения организмов зоопланктона, ускоряя или замедляя темпы их развития.

Первые исследования зоопланктона на разрезе «Кольский меридиан» выполнены Мурманской научно-промысловой экспедицией в 1903 г., а регулярные осуществлялись Полярным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО) в 1959-1993 гг. и продолжаются с 2008 г. по настоящее время. Мурманский морской биологический институт также периодически изучает зоопланктон на разрезе «Кольский меридиан».

Исследования основаны преимущественно на сборах зоопланктона в весенне-летний период, когда происходит его массовое размножение и развитие (Линко, 1907; Виркетис, 1928; Мантейфель, 1938; Дегтярева, 1979; Биомасса планктона на..., 1990; В.Г. Дворецкий, А.Г. Дворецкий, 2014; Prokorchuk, Trofimov, 2019), тогда как материалы в другие сезоны (сентябрь и ноябрь) крайне немногочисленны (V.G. Dvoretzky, A.G. Dvoretzky, 2018). Кроме того, применение разных орудий лова и различия в методике обработки проб зоопланктона в начале XX в. также затрудняют сравнительный анализ полученных результатов.

Учитывая слабую изученность зоопланктона в зимний период и принимая во внимание наблюдающееся с начала 1980-х годов потепление вод Баренцева моря, достигшее наибольшего развития в последние два десятилетия (Трофимов, 2021), можно говорить о том, что исследования зимующего фонда зоопланктона и абиотических условий его существования в этот период являются актуальными.

Цель настоящего исследования – рассмотреть видовой состав зоопланктона и возрастную структуру основных его видов на разрезе «Кольский меридиан» в зимний период 2018-2023 гг., изучить межгодовые вариации численности и биомассы зоопланктона и определить влияние факторов окружающей среды на количественные параметры зоопланктона.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Океанография. Для анализа абиотических условий обитания зоопланктона использовались данные о температуре воды, полученные на разрезе «Кольский меридиан» с помощью STD-зонда SBE 19plus (фирма Sea-Bird Electronics, США) в ходе зимней (январь-март) съемки Баренцева моря в 2018-2023 гг. Для расчета аномалий температуры применялась норма за 1951-2020 гг.

Зоопланктон. Работа основана на анализе 59 проб зоопланктона, собранных в январе-марте 2018-2023 гг. на разрезе «Кольский меридиан» (табл. 1). Планктон облавливался сетью Джели (площадь входного отверстия 0,11 м², размер ячеек сита 180 мкм) вертикальным ловом от дна до поверхности. Пробы фиксировали 4 %-ным формальдегидом и доставляли в лабораторию Полярного филиала. При камеральной обработке выполняли таксономическую идентификацию организмов зоопланктона по возможности до наименьшей таксономической категории. Виды рода *Calanus* и прочие виды Copepoda разделяли по стадиям развития или возрастным группам. Крупные неповрежденные организмы (Euphausiacea, Chaetognatha, Hydroidea) измеряли и взвешивали, всех их просчитывали, а биомассу определяли с помощью индивидуальных масс планктонных организмов (Канаева, 1962; Перцова, 1967, собственные данные). Сбор и обработку материала осуществляли по принятой методике (Изучение экосистем рыбохозяйственных..., 2004).

При анализе состава зоопланктона оценивали частоту встречаемости организмов (%), их численность (экз./м³) и биомассу (мг/м³). Для оценки видового разнообразия использовали индекс Шеннона (H'), рассчитанный по численности таксонов:

$$H' = \sum \left(\frac{n_1}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_2}{N} \right),$$

где n – численность таксона; N – общая численность всех таксонов.

**Количество проанализированных проб зоопланктона,
собранных на разрезе «Кольский меридиан» в январе-марте 2018-2023 гг.**

Год	Период отбора проб	Количество проб зоопланктона
2018	06-08.02	9
2018	09-10.03	8
2020	15-19.02	9
2021	21-23.03	7
2022	19-21.01	9
2023	25-27.01	8
2023	25-26.02	9
Всего		59

Расчеты и построение графиков выполнялись в программах Microsoft Excel 2016 и Golden Software Surfer 11.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Термические условия. Поскольку в настоящей работе анализировались данные за зимний период, когда происходило наиболее активное конвективное перемешивание вод в результате их выхолаживания, изменчивость температуры на разрезе «Кольский меридиан» в январе-марте 2018-2023 гг. была невелика как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях: на всем разрезе она была в основном от 2 до 5 °С (рис. 1). В результате зимней конвекции практически вся толща воды достаточно хорошо перемешана и почти повсеместно наблюдалась гомотермия – температура с глубиной изменялась незначительно, и лишь в придонных водах северной половины разреза в отдельные годы имели место незначительные (0,04-0,06 °С/м) вертикальные градиенты. Наибольшая температура воды отмечалась как обычно в Основной ветви Мурманского течения (ст. 3-7), а наименьшая – на севере разреза в придонных водах, которые находятся под влиянием холодных баренцевоморских вод (Воды Баренцева моря..., 2016).

На фоне высокой температуры вод Баренцева моря, наблюдающейся с начала 2000-х годов (Трофимов, 2021), в 2018-2023 гг. тем не менее были отмечены некоторые межгодовые особенности. Размах средневзвешенной температуры на разрезе (слой 0-дно) в разные годы составлял всего 1,5-2,0 °С и лишь в январе 2022 г. достиг 2,4 °С (табл. 2). Наиболее теплые условия отмечались в 2018 и 2023 гг., когда аномалии средней температуры изменялись вдоль разреза от 0,8 до 1,9 °С, в среднем – 1,2 °С в 2018 г. и 1,3 °С в 2023 г. (см. табл. 2). Для сравнения в остальные годы аномалии не превышали 1,0 °С, составляя 0,1-0,8 °С (в среднем по разрезу 0,5 °С) в 2020 г., 0,2-0,8 °С (в среднем 0,6 °С) в 2021 г. и 0,2-1,0 °С (в среднем 0,4 °С)

в 2022 г., за исключением самой северной станции в 2022 г., на которой отмечена отрицательная аномалия ($-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это было обусловлено более низкой, чем в остальные годы, температурой в верхнем и промежуточном слоях на этой станции – в верхнем 100-метровом слое она составляла $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как в другие годы в этом же слое – $3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в 2020 г.) и $4,0\text{--}4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в 2018 и 2023 гг.) (см. рис. 1).

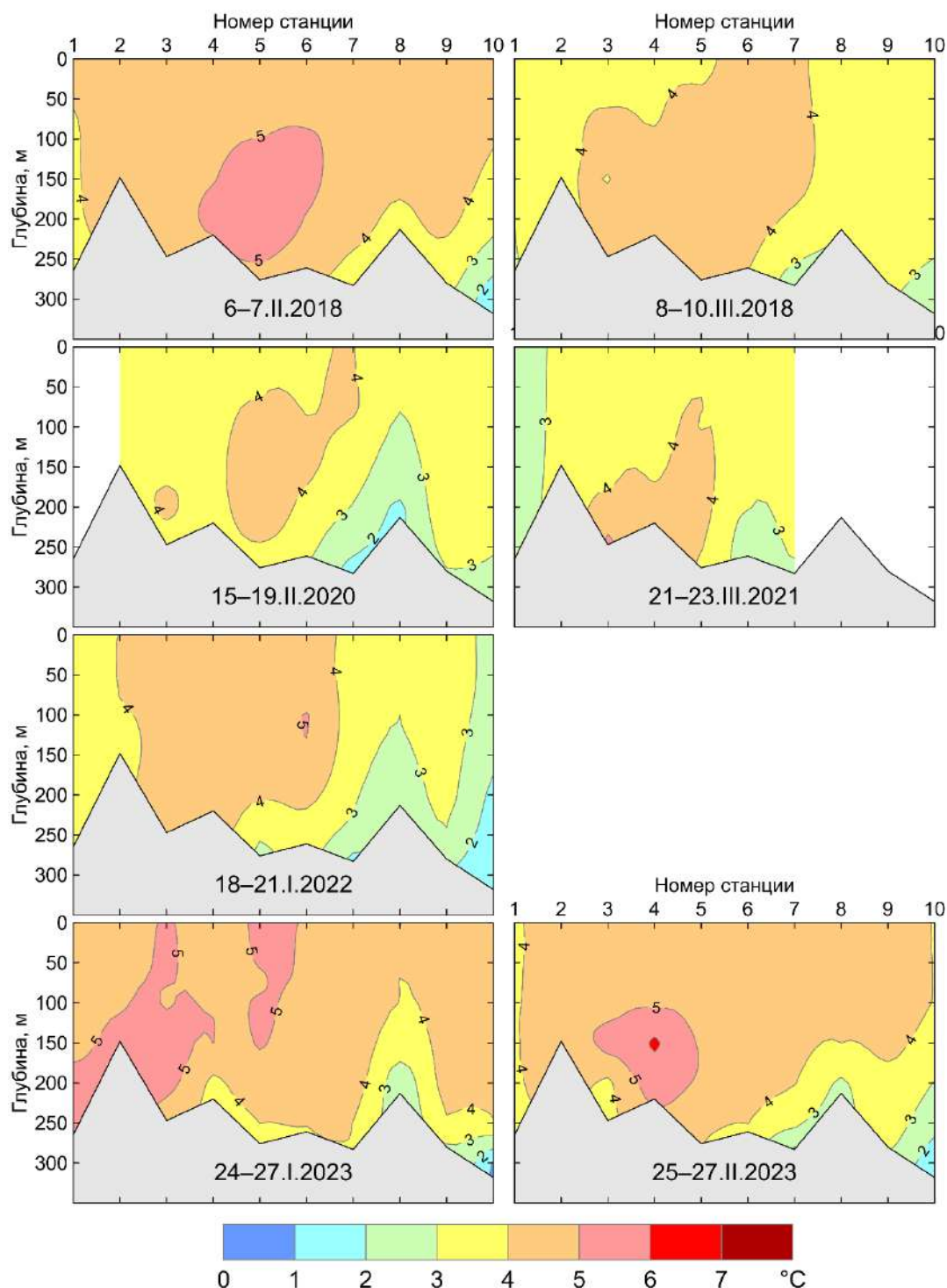


Рис. 1. Температура воды на разрезе «Кольский меридиан» в январе-марте 2018-2023 гг.

Таблица 2

Температура воды и ее аномалии в слое 0-дно на станциях разреза «Кольский меридиан» в январе-марте 2018-2023 гг. (аномалии рассчитаны на дату выполнения)

№ ст.	С. ш.	Месяц и год выполнения разреза «Кольский меридиан»						
		февр. 2018	март 2018	февр. 2020	март 2021	январь 2022	январь 2023	февр. 2023
<i>Температура, °С</i>								
1	69°30'	3,90	2,99	–	2,58	3,63	4,91	3,88
2	70°00'	4,56	3,72	3,48	3,22	3,99	4,85	4,64
3	70°30'	4,49	4,09	3,81	3,76	4,13	5,21	4,41
4	71°00'	4,80	4,20	3,67	3,78	4,38	4,65	5,13
5	71°30'	5,14	4,54	4,31	4,16	4,05	4,74	4,60
6	72°00'	4,92	4,44	3,85	3,24	4,43	4,70	4,49
7	72°30'	4,44	3,99	3,36	3,46	3,28	4,62	4,04
8	73°00'	4,18	3,41	2,77	–	2,96	3,58	3,93
9	73°30'	4,25	3,65	3,63	–	3,29	4,25	4,09
10	74°00'	3,32	3,52	3,14	–	1,99	3,94	3,14
<i>Аномалия температуры, °С</i>								
1	69°30'	1,12	0,88	–	0,63	0,48	1,88	1,52
2	70°00'	1,23	0,86	0,28	0,47	0,42	1,37	1,59
3	70°30'	0,98	1,00	0,41	0,80	0,44	1,59	1,14
4	71°00'	1,15	0,85	0,10	0,54	0,61	0,92	1,65
5	71°30'	1,42	1,06	0,65	0,78	0,24	0,96	1,02
6	72°00'	1,52	1,27	0,48	0,16	0,98	1,27	1,20
7	72°30'	1,42	1,22	0,40	0,76	0,18	1,55	1,15
8	73°00'	1,76	1,13	0,40	–	0,46	1,11	1,59
9	73°30'	1,33	0,96	0,76	–	0,34	1,31	1,28
10	74°00'	0,90	1,23	0,79	–	–0,56	1,44	0,81

Видовой состав и биологическое разнообразие зоопланктона. В январе-марте 2018-2023 гг. идентифицировали 49 таксонов зоопланктона, относящихся к 9 типам. Наиболее широко представлены веслоногие ракообразные класса Copepoda – 19 таксонов. Часто в пробах зоопланктона встречались копеподы *Calanus finmarchicus* (100 %), *Microcalanus* sp. (100 %), *Oithona similis* (100 %), *Pseudocalanus* sp. (98,3 %), *Oithona atlantica* (98,3 %), *Metridia lucens* (96,6 %) и *Metridia longa* (83,1 %). Из прочих организмов в пробах главным образом отмечались эвфаузииды *Thysanoessa longicaudata* (61,0 %) и *Thysanoessa inermis* (59,3 %), щетинкочелюстные *Eukrohnia hamata* (62,7 %) и *Parasagitta elegans* (57,6 %).

Индекс видового разнообразия зоопланктона был достаточно стабильным и в различные годы составлял от 1,9 (февраль 2020 г.) до 2,4 (январь 2022 г.) (табл. 3). В феврале 2020 г. встречались существенные колебания этого параметра на различных станциях разреза – от 1,4 до 2,7 (см. табл. 3).

Таблица 3

**Индекс видового разнообразия зоопланктона на разрезе «Кольский меридиан»
в январе-марте 2018-2023 гг.**

С. ш.	Период исследований						
	2018 г.		2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	
	06-07.02	08-10.03	15-19.02	21-23.03	19-21.01	25-27.01	25-26.02
69°30'	1,9	2,1	-	1,5	2,3	-	-
70°00'	2,0	2,1	1,6	2,3	2,0	2,3	2,1
70°30'	1,9	2,3	1,9	1,9	2,4	2,0	2,1
71°00'	2,3	2,0	2,3	1,9	2,6	2,2	1,6
71°30'	2,1	2,2	1,6	1,8	2,6	2,1	2,3
72°00'	2,6	1,8	2,3	2,4	2,2	-	2,1
72°30'	1,9	2,3	1,8	2,3	2,4	1,6	2,3
73°00'	1,7	-	2,7	-	2,4	2,5	2,1
73°30'	-	2,1	1,4	-	-	2,3	1,5
74°00'	2,0	-	1,6	-	2,7	2,1	2,5
Среднее	2,05±0,06	2,10±0,04	1,90±0,11	2,01±0,10	2,40±0,05	2,14±0,07	2,08±0,08

Численность и биомасса зоопланктона существенно варьировали в разные годы и месяцы (рис. 2). Наиболее высокие значения этих параметров наблюдались в январе 2022 г. – $225,5 \pm 21,3$ экз./м³ и $90,5 \pm 8,6$ мг/м³ соответственно, а самые низкие в марте 2021 г. – $69,1 \pm 11,7$ экз./м³ и $19,1 \pm 4,1$ мг/м³ соответственно (см. рис. 2). Амплитуда колебаний общей численности зоопланктона на различных станциях разреза была наибольшей в феврале 2018 г., а его общая биомасса значительно изменялась в феврале 2020 г. (см. рис. 2).

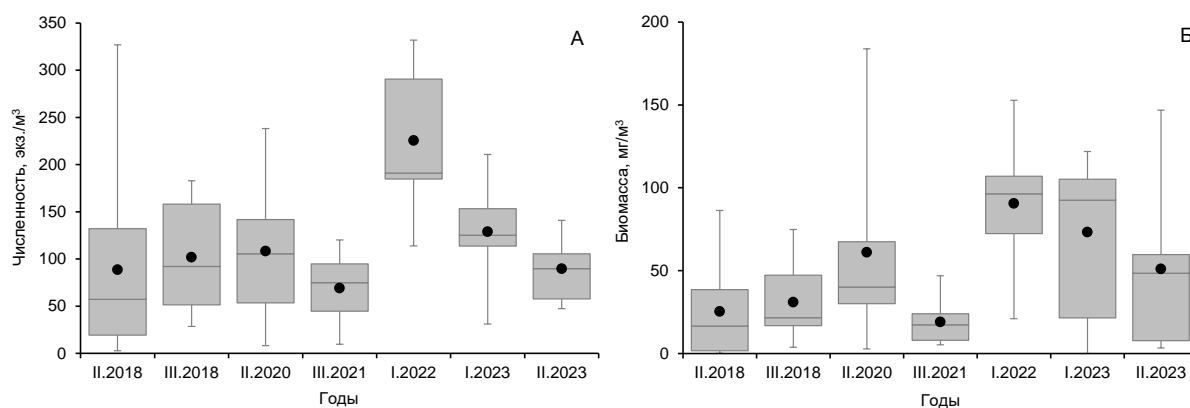


Рис. 2. Общая численность (А) и биомасса (Б) зоопланктона в слое дно-поверхность на разрезе «Кольский меридиан» в январе-марте 2018-2023 гг.

В целом общая численность и биомасса зоопланктона демонстрируют тенденцию к снижению от января к марту, что соответствует продолжающемуся в этот период выхолаживанию вод – температура постепенно понижается от января к марту, достигая в апреле сезонного

минимума. Кроме того, при анализе общей биомассы зоопланктона на отдельных станциях разреза «Кольский меридиан» (не проиллюстрировано) отмечено увеличение температуры атлантических вод (ст. 4-10) с наибольшими значениями в Основной ветви Мурманского течения, где наблюдались наиболее теплые воды.

Основу численности и биомассы зоопланктона формировали копеподы, составляя 92,2-98,8 % от общей численности и 46,4-86,9 % от общей биомассы (рис. 3). Доля эуфаузиид варьировала от 4,4 до 18,1 % от общей биомассы зоопланктона и была наибольшей в марте 2021 г. Доля щетинкочелюстных в общей биомассе зоопланктона в 2018-2021 гг. невысокая (1,3-2,1 %), однако в январе 2022 г. произошло ее резкое увеличение до 30,1 %, а в январе-феврале 2023 г. этот показатель снизился до 11,4-13,9 % (см. рис. 3).

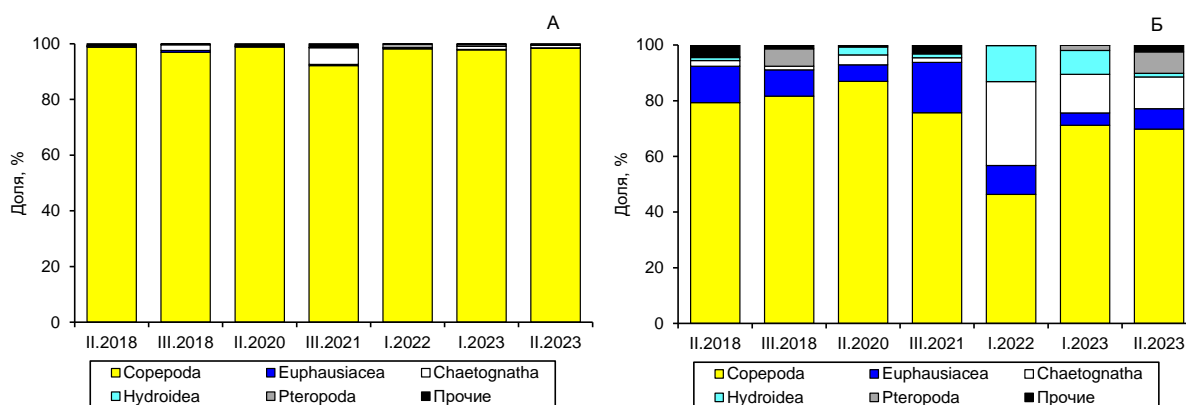


Рис. 3. Доля зоопланктона различных таксономических групп в общей численности (А) и общей биомассе (Б) зоопланктона в слое дно-поверхность на разрезе «Кольский меридиан» в январе-марте 2018-2023 гг.

В сообществах копепод наиболее многочисленными видами являлись *O. similis*, *C. finmarchicus*, *Microcalanus* sp., *Metridia* spp. и *Pseudocalanus* sp. – суммарно 96,1 % от общей численности (рис. 4). В то же время *C. finmarchicus* и *Metridia* spp. доминировали в общей биомассе копепод, составляя в разные годы 55,5-83,6 и 8,7-33,1 % от общей биомассы соответственно (см. рис. 4).

C. finmarchicus имел существенное значение в общей численности и биомассе зоопланктона – 31,1 и 49,8 % соответственно. В его популяции отмечались особи IV-V копеподитных стадий, самки и самцы, а по численности и биомассе доминировали V копеподиты. Особи в III копеподитной стадии встречались единично только в феврале 2020 г. и январе 2022-2023 гг. Доля IV копеподитов постепенно снижалась от января к марту – с 20,0 до 14,5 %, доля V копеподитов в общей численности *C. finmarchicus* в феврале немного снизилась по сравнению с январем – с

79,4 до 73,8 %, а в марте уменьшилась до 43,3 %. В то же время доля самцов существенно увеличилась в феврале по сравнению с январем – с 0,1 до 6,2 %, и в марте снова снизилась до 3,7 %. Доля самок в популяции *C. finmarchicus* в январе была очень низкой – 0,5 %, в феврале увеличилась до 1,4 %, а в марте произошло ее резкое увеличение до 38,5 %.

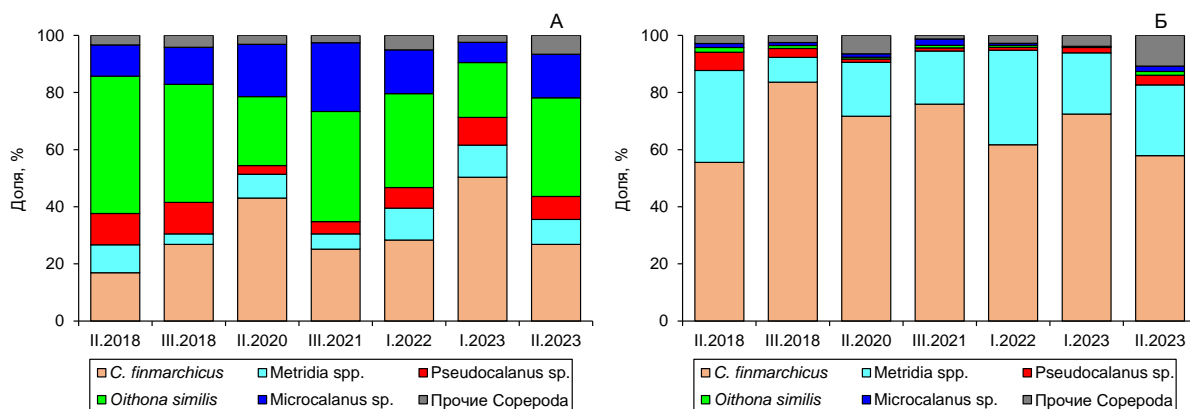


Рис. 4. Доля различных копепод в их общей численности (А) и общей биомассе (Б) в слое дно-поверхность на разрезе «Кольский меридиан» в январе-марте 2018-2023 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температура воды на разрезе «Кольский меридиан» в зимний период 2018-2023 гг. мало изменялась как на глубине, так и вдоль разреза, только в придонных водах северной половины разреза имели место небольшие вертикальные градиенты. Наибольшая температура воды регистрировалась в Основной ветви Мурманского течения, наименьшая – в придонных водах на севере разреза. 2018 и 2023 гг. были более теплыми (средняя аномалия температуры в слое 0-дно составила 1,2-1,3 °С) по сравнению с 2020-2022 гг. (средняя аномалия – 0,4-0,6 °С).

Таксономический состав зоопланктона в январе-марте был достаточно разнообразным (49 таксонов) и сравнимым с таковым в сентябре и ноябре – 48-50 таксонов (V.G. Dvoretzky, A.G. Dvoretzky, 2018), но существенно беднее, чем в мае-июне – 74 таксона (Prokorchuk, Trofimov, 2019). В весенне-летние месяцы видовое разнообразие повышается преимущественно за счет меропланктона, а также за счет адвекции тепловодных видов, которые проникают в Баренцево море с теплыми водами из Норвежского моря.

Общая численность и биомасса зоопланктона снижались от января к марту на фоне продолжающегося выхолаживания водных масс. В январе-марте в сообществах зоопланктона доминировали копеподы, а одна треть общей численности и половина от общей биомассы зоопланктона

приходились на *C. finmarchicus*. В зимний период *C. finmarchicus* находится в состоянии диапаузы – адаптации, необходимой для выживания в условиях ограниченных кормовых ресурсов. В январе-марте его популяция состояла из особей IV-V копепоидитных стадий, самок и самцов. Перезимовавшие особи IV и V копепоидитных стадий, претерпевая линьку, превращаются соответственно в V копепоидитов и взрослых особей (самок и самцов), поэтому соотношение возрастных стадий в период исследований изменялось в пользу старших возрастных групп. Увеличение доли самцов и самок свидетельствует о подготовке *C. finmarchicus* к размножению. Подтверждением этого также является факт обнаружения единичных самок со сперматофорами в марте 2021 г. и январе-феврале 2023 г.

Возрастная структура популяции *C. finmarchicus* в зимний период представляет собой «нерестовый запас» и может быть использована для модельной оценки численности и биомассы его весенней генерации с учетом факторов окружающей среды, влияющих на развитие молоди. Ряд наших наблюдений слишком короткий для выполнения такой оценки, поэтому исследования зоопланктона на разрезе «Кольский меридиан» в зимний период необходимо продолжать.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Биомасса планктона на путях дрейфа личинок трески: справочный материал / ПИНРО; сост. В.Н. Нестерова. – Мурманск: ПИНРО, 1990. – 64 с.

Виркетис, М.А. Некоторые данные о зоопланктоне Баренцева моря по Кольскому меридиану / М.А. Виркетис // Труды Института по Изучению Севера. – 1928. – Вып. 37: Материалы по биологии Баренцева моря в области Кольского меридиана (33°30' в.д.) / К.М. Дерюгин. – С. 7-27.

Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В.К. Ожигин, В.А. Ившин, А.Г. Трофимов [и др.]; отв. ред. Е.В. Сентябов; ПИНРО. – Мурманск: ПИНРО, 2016. – 260 с.

Дворецкий, В.Г. Межгодовая флуктуация зоопланктона на Кольском разрезе (Баренцево море) в связи с факторами среды / В.Г. Дворецкий, А.Г. Дворецкий // Экология. – 2014. – № 4. – С. 398-407.

Дегтярева, А.А. Закономерности количественного развития зоопланктона в Баренцевом море / А.А. Дегтярева // Труды ПИНРО. – 1979. – Вып. 43. – С. 22-53.

Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки / Госкомрыболовство России. – М.: Изд-во ВНИРО, 2004. – Вып. 1: Инструкции и методические рекомендации по сбору и обработке биологической информации в морях Европейского Севера и Северной

Атлантики / ПИНРО. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во ВНИРО, 2004. – 299 с.

Канаева, Н.П. Средний вес Copepoda Центральной и Северной Атлантики, Норвежского и Гренландского морей / Н.П. Канаева // Труды ВНИРО. – 1962. – Т. 46. – С. 253-266.

Линко, А.К. Исследования над составом и жизнью планктона Баренцова моря / А.К. Линко // Экспедиция для научно-промысловых исследований у берегов Мурмана. – СПб.: Изд-во Комитета для помощи поморам Русского Севера, 1907. – 237 с.

Мантейфель, Б.П. Краткая характеристика основных закономерностей в изменениях планктона Баренцева моря / Б.П. Мантейфель // Труды ПИНРО. – 1938. – Вып. 1. – С. 134-148.

Перцова, Н.М. Средние веса и размеры массовых видов зоопланктона Белого моря / Н.М. Перцова // Океанология. – 1967. – Вып. 2. – С. 309-313.

Трофимов, А.Г. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря / А.Г. Трофимов. – DOI 10.36038/2307-3497-2021-186-101-118 // Труды ВНИРО. – 2021. – Т. 186, № 4. – С. 101-118.

Dvoretzky, V.G. Mesozooplankton in the Kola Transect (Barents Sea): autumn and winter structure / V.G. Dvoretzky, A.G. Dvoretzky // Journal of Sea Research. – 2018. – Vol. 142. – P. 125-131.

Prokopchuk, I.P. Interannual dynamics of zooplankton in the Kola Section of the Barents Sea during the recent warming period / I.P. Prokopchuk, A.G. Trofimov. – DOI 10.1093/icesjms/fsz206 // ICES Journal of Marine Science. – 2019. – Vol. 76, Iss. S1. – P. i10-i23.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ДИНАМИКА ПЛЮМА РЕКИ ПЕЧОРА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

В.С. Рогожин ^{1,2}, **А.А. Осадчиев** ^{2,3}, **О.П. Коновалова** ¹, **Н.В. Шабалин** ¹

¹Центр морских исследований МГУ

им. М.В. Ломоносова (ЦМИ МГУ), г. Москва

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), г. Москва

³Московский физико-технический институт (МФТИ), г. Москва

Аннотация. На основе анализа многолетних натуральных измерений и спутниковых данных о солености и температуре поверхности моря выявлена зависимость области распространения и пространственных характеристик плюма реки Печора от внешних условий, а именно: ветра, изменчивости объема стока и ледовых условий в момент начала половодья.

Ключевые слова: плюм, р. Печора, Арктика, соленость, спутниковые данные.

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море является одним из самых изученных морей России (Матишов, Денисенко, 1996; Loeng, Ozhigin, Ådlandsvik, 1997; Dense water formation..., 2011; Reduced efficiency of..., 2020; Lind, Ingvaldsen, Furevik, 2018 и др.). Исследования, посвященные гидрологическим процессам в его юго-восточной части – Печорском море, основывались только на отдельных съемках в определенных акваториях (например, в Печорской губе (Мохова, Мельник, 2019)) или плюме р. Печора не рассматривался как отдельная водная масса (Матишов, Денисенко, 1992; Адров, Денисенко, 1996; Кос, 2005), поэтому крайне мало научных работ о гидрофизических процессах, связанных с распространением и трансформацией плюма р. Печора. Важность изучения плюма в отношении влияния на экосистему Печорского моря неоспорима: в ряде гидробиологических статей обсуждается существенное влияние его распространения и, как следствие, пространственно-временной изменчивости области пониженной солености в поверхностном слое на гидробиологические сообщества обширной акватории моря (Lee, Soh, 2003; Structure of mesozooplankton..., 2009; Spatial and temporal..., 2019). Таким образом, о плюме р. Печора, формируемом седьмой по величине пресноводного стока рекой России в важной с точки зрения хозяйственной деятельности прибрежной морской акватории, имеются только общие представления: он существует и занимает большую площадь в безледный период.

Печорское море – мелководная юго-восточная часть Баренцева моря. С востока его естественной границей являются о-в Вайгач, прол. Югорский шар и Карские ворота (рис. 1), на западе – между материком, о-вом Колгуев и арх. Новая Земля. Площадь моря составляет примерно 90 тыс. км², максимальная глубина – 210 м. Одной из наиболее важных акваторий служит его юго-западная часть, губа Печорская. Это мелководный эстуарий р. Печора, чей сток во многом определяет гидрологические и биологические процессы, происходящие в Печорском море. Площадь губы Печорская составляет 6400 км², объем вод – около 35 км³ (Полонский, 2012). С севера и северо-востока она ограничена п-овом Русский Заворот и арх. Гуляевские Кошки. Узкие и мелководные проливы между островами архипелага затрудняют водообмен с Печорским морем, что осложняет поступление более соленых морских вод в эстуарий. Приливные волны в море выражены слабо, максимальная величина не превышает 1 м (Кос, 2005), они поступают в губу Печорская с севера через проливы арх. Гуляевские Кошки, которые снижают интенсивность прилива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения структуры и изменчивости плюма р. Печора использовались натурные измерения температуры и солености, полученные в 14 экспедициях в акватории Печорского моря (см. рис. 1). Измерения, проводившиеся с июня по сентябрь (как в период весенне-летнего половодья, так и в летне-осеннюю межень), выполняли с помощью различных CTD-зондов (Neil Brown MK3B; YSI Castaway-CTD; RBR Concerto). В работе проанализированы данные, взятые из океанологического массива World Ocean Database (Noaa atlas nesdis..., 2018), а также оптические и термические снимки Печорского моря, сделанные спутниками Sentinel-2, Landsat-8, MODIS Terra/Aqua, NOAA-20/VIIRS и Suom NPP/VIIRS, материалы о солености поверхности моря, полученные со спутника SMAP (Soil Moisture Active Passive) с 2015 по 2023 г. Спутниковые данные были верифицированы по согласованным по времени натурным измерениям.

Для исследования влияния внешних условий на плюм р. Печора были проанализированы данные атмосферного реанализа CFSR/GFS: скорость и направление ветра на уровне моря. Анализ ледовых условий проводился по спутниковым данным о распространении и сплоченности льда, предоставляемым ААНИИ (http://old.aari.ru/odata/_d0015.php?mod=1). Для изучения влияния изменчивости речного стока на структуру и динамику плюма р. Печора были рассмотрены материалы расходов р. Печора, измеренные на гидропосте Усть-Цильма. По данным многолетних

измерений, средняя годовая величина пресноводного стока в вершине дельты р. Печора составляет 130-135 км³. Основной пик половодья приходится на конец мая-июнь, расходы составляют от 15 до 40 тыс. м³/с, при этом наблюдается значительная межгодовая изменчивость величины речного стока – до 30 км³.

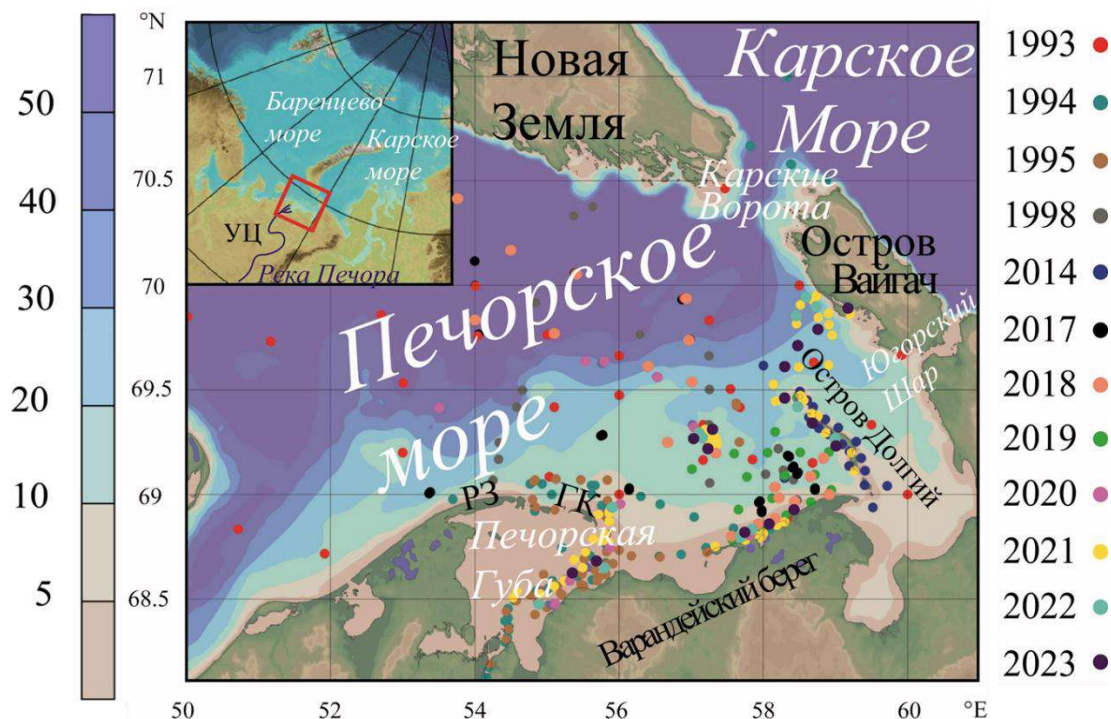


Рис. 1. Батиметрия Печорского моря и расположение гидрологических станций: РЗ – полуостров Русский Заворот; ГК – архипелаг Гуляевские Кошки; УЦ – гидропост Усть-Цильма

Ледовые условия Печорского моря более суровые, чем в центральных и западных районах Баренцева моря, однако гораздо слабее, чем в арктических морях к востоку от арх. Новая Земля. Анализ спутниковых ледовых карт Печорского моря за 24 года (с 1999 по 2023 г.) показал, что в семи случаях (1999, 2001, 2002, 2003, 2013, 2014 и 2018 гг.) к моменту начала весеннего половодья на р. Печора в акватории находились значительные объемы морского льда, которые, возможно, внесли существенный вклад (10-12 км³) в формирование опресненного поверхностного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате воздействия различных внешних факторов, в первую очередь колебаний объема речного стока, ветрового воздействия и ледовых условий, площадь плюма р. Печора обладает значительной межгодовой

изменчивостью. Так, на рис. 2 представлена граница распространения плюма р. Печора, восстановленная как по натурным, так и по спутниковым данным. На основе анализа этих материалов заметно, что он распространяется узкой полосой вдоль южного побережья Печорского моря, однако в отдельные годы занимает всю акваторию между губой Печорская и о-вом Колгуев (например, в 2017, 2018, 2020 гг.).

Стоит отметить, что в июле-августе в 1993, 1994, 1995, 1998 гг. значения солености были наиболее высоки, составляя в среднем 23-25 ЕПС на выходе из губы Печорская. Акватория южного побережья Печорского моря также была подвергнута значительному осолонению, несмотря на распространение плюма р. Печора в восточную часть моря.

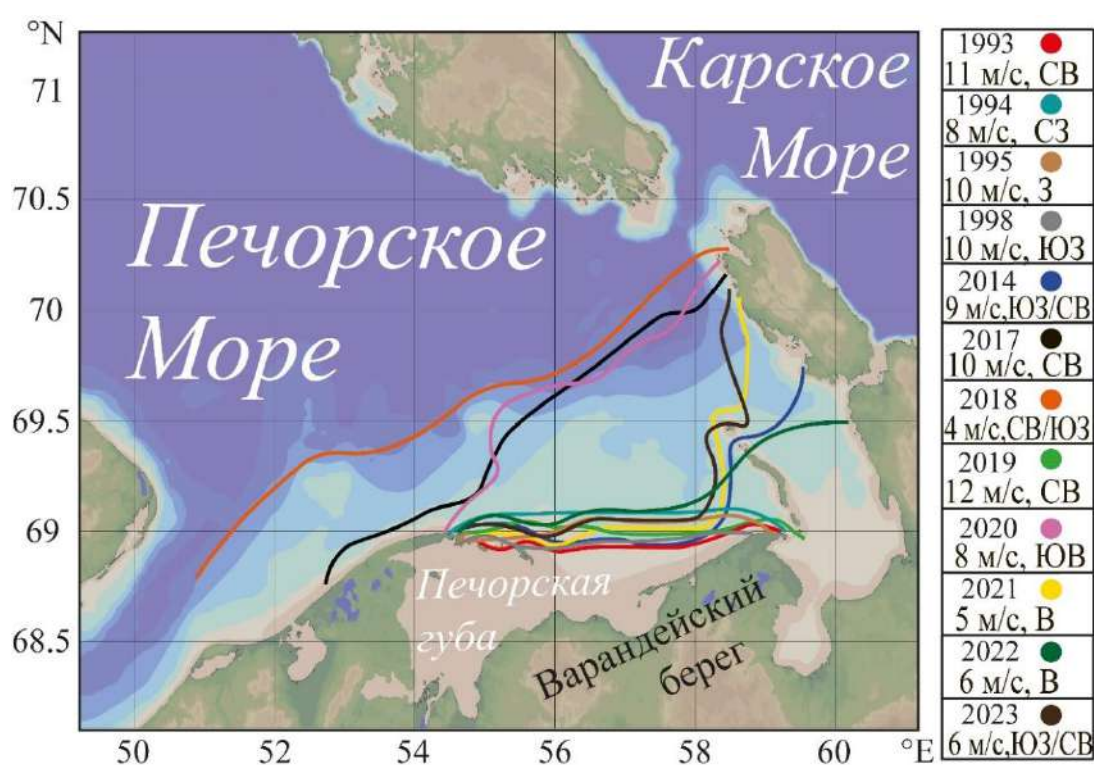


Рис. 2. Расположение внешней границы плюма р. Печора в безледный период по данным натурных измерений и спутниковых снимков в разные годы (цветные линии). Скорость и доминирующее направление ветра в период проведения экспедиционных работ в определенный год (правая часть рисунка)

В 2014, 2021, 2022 и 2023 гг. акватория моря, занимаемая водами плюма, распределялась значительно дальше на восток, однако также не охватывала центральную область Печорского моря. Такое распространение происходило под действием умеренных ветров с переменным направлением. На внешней границе плюма формировалась четкая

фронтальная зона с резким перепадом солености в 10-12 ЕПС (от 20 до 30-32 ЕПС) с горизонтальным градиентом 0,5 ЕПС/км.

В 2017, 2018 и 2020 гг. наблюдали наибольшую площадь плюма р. Печора. Его внешняя фронтальная зона выходила за пределы мелководной акватории моря, значения солености не превышали 20 ЕПС, а градиент во фронтальной зоне составлял от 0,6 до 1,0 ЕПС/км. Причины формирования столь большой области распространения плюма р. Печора в оба года были разные. В 2017 г. отмечался значительный объем речного стока по сравнению с остальными годами, в 2018 г. ключевыми факторами были ледовые условия и речной расход, а в 2020 г. – ветровые. В июле 2018 г. льдом, который наблюдался как до полевых работ, так и после их завершения, была покрыта вся юго-восточная часть моря. Максимальные значения речного расхода также пришлось на период проведения измерений. Таким образом, поступление значительных объемов речных и талых вод в акваторию Печорского моря привели к формированию аномально большой площади области опреснения в июле 2018 г. В 2020 г. основным фактором, повлиявшим на расширение границ плюма, по-видимому, был сильный (скоростью 10 м/с) северо-восточный ветер, наблюдавшийся непосредственно перед началом полевых работ.

Кроме исследования натуральных данных, был выполнен анализ безоблачных спутниковых снимков за июнь-октябрь 2002-2023 гг., который показал, что в регионе периодически формируются прибрежные ветровые апвеллинги в зоне распространения плюма р. Печора. Наиболее часто они наблюдаются вдоль южного побережья Печорского моря. Безоблачная погода с 26 июля по 2 августа 2004 г. позволила оценить по ежедневным спутниковым данным температуры поверхности моря скорость формирования зоны апвеллинга под воздействием северо-восточных ветров, а также последующее восстановление плюма в его зоне. На рис. 3 представлена первичная зона апвеллинга площадью 400 км², сформировавшаяся к 26 июля под воздействием трехдневных северо-восточных ветров скоростью более 7 м/с. Воздействие продолжалось еще два дня, и к 28 июля площадь перемешанных вод увеличилась до 1800 км². К 31 июля произошла смена направления ветра, в результате апвеллинг прекратился. Через двое суток сильных северо-западных ветров к 2 августа плюм р. Печора восстановил свою площадь в прибрежной зоне и следов апвеллинга в поверхностном слое моря больше не наблюдалось.

Проанализированные натурные и спутниковые данные показали, что пространственное распределение плюма р. Печора имеет значительную изменчивость в масштабе суток и недель, которая вызвана адвекцией вод плюма под воздействием ветра и получающейся в результате этого перестройки площади его распространения. При воздействии стабильного

по направлению ветра скоростью от 5 до 10 м/с, начиная с 1,5-2,0 сут после перестройки атмосферной циркуляции, отклик распространения плюма становится видимым, при этом его площадь увеличивается при юго-восточных, восточных и северо-восточных ветрах, которые способствуют адвекции плюма в открытую часть Печорского моря.

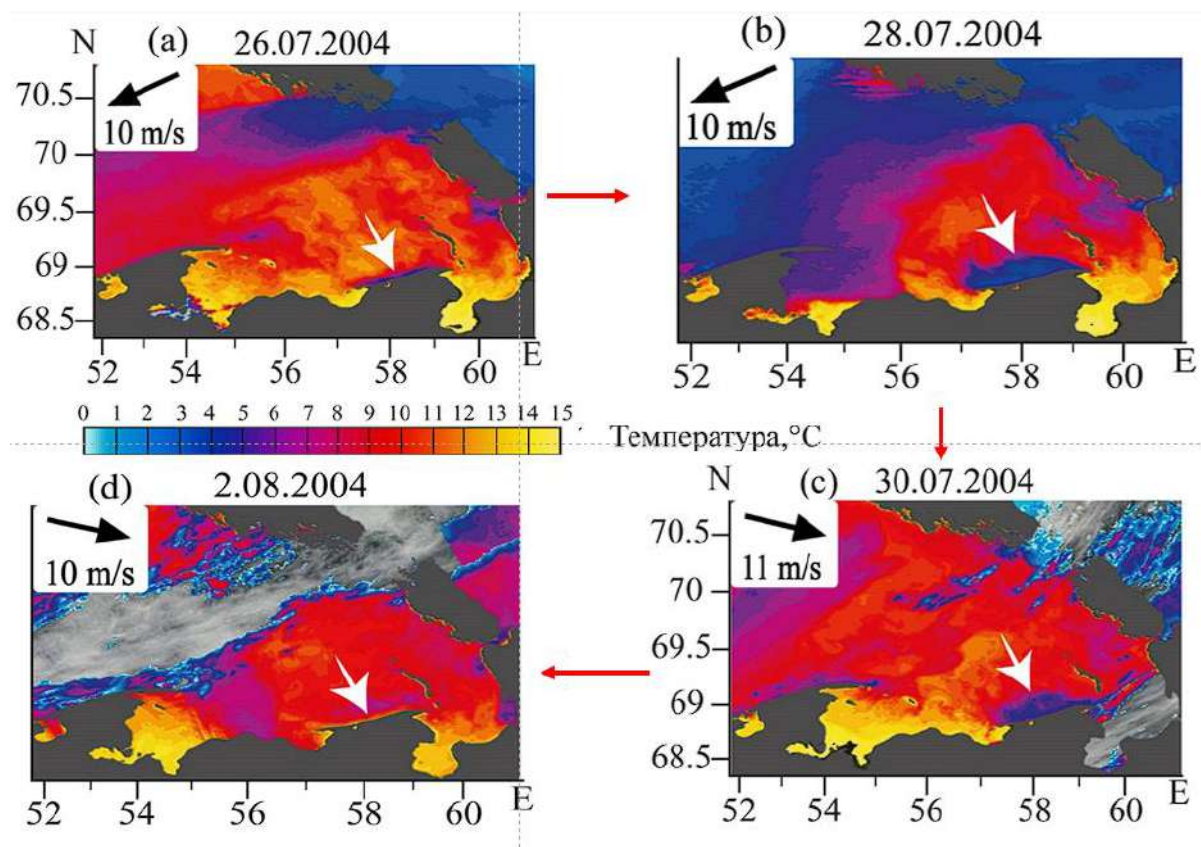


Рис. 3. Процесс появления и затухания ветрового апвеллинга в Печорском море по спутниковым данным температуры поверхности моря

Длительное воздействие северо-восточных ветров на акваторию Печорского моря приводит к периодическому распространению плюма р. Печора на запад от Печорской губы вдоль п-ова Русский Заворот (рис. 4). При влиянии продолжительных юго-восточного и восточного ветров плюм р. Печора занимает всю площадь акватории между губой Печорская и о-вом Вайгач. Спутниковые снимки показывают, что в отдельные периоды плюм р. Печора поступает узким вдольбереговым течением через прол. Карские Ворота в Карское море и направляется далее на юго-восток вдоль восточного побережья о-ва Вайгач. Стоит отметить, что заливы опресненных вод плюма р. Печора в Карское море не были описаны ранее в научной литературе.

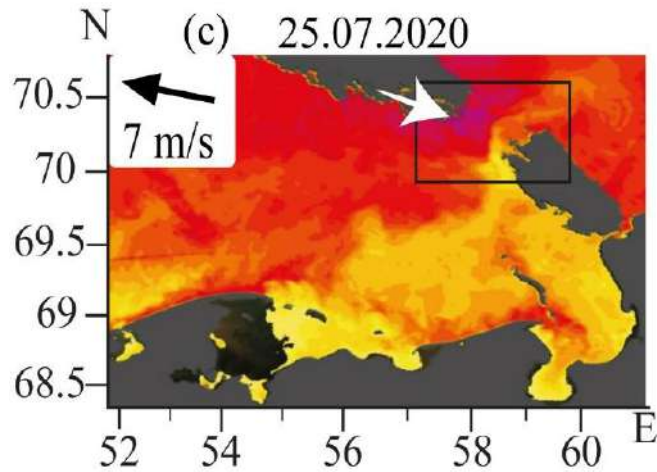


Рис. 4. Распространение плюма р. Печора на северо-восток под воздействием ветра

По данным натурных и спутниковым исследованиям (температура и соленость поверхности моря) были выделены три основных типа распространения плюма р. Печора на акватории моря (рис. 5). При первом («минимальном») типе опресненные воды после выхода из губы Печорская распространяются на восток вдоль побережья Печорского моря в виде узкой струи (шириной 20-40 км) (темно-коричневая область, см рис. 5). В такой ситуации плюм не доходит даже до о-ва Долгий, занимая лишь южную и восточную части губы Печорская, а также акваторию южного побережья Печорского моря, площадь его невелика и составляет примерно 6-7 тыс. км² (1993, 1994, 1995, 1998 гг.). Данная конфигурация формируется после окончания половодья в результате снижения расхода реки и значительного ветрового воздействия, приводящего к интенсивному перешиванию вод плюма. «Минимальный» тип распространения является наиболее типичным для летне-осенней межени.

При втором («среднем») типе распространения плюм р. Печора занимает всю восточную часть Печорского моря (светло-коричневая область, см. рис. 5), его площадь составляет 20-22 тыс. км² (2014, 2021, 2022 и 2023 гг.). В этом случае минимальная соленость наблюдается в районах губы Печорская (10-15 ЕПС), вдоль Южного побережья Печорского моря (15-20 ЕПС) и в акватории к востоку от о-ва Долгий. «Средний» тип распространения плюма р. Печора является наиболее типичным во время и непосредственно после половодья в отсутствие сильного ветрового воздействия. Стоит отметить, что именно во время второго типа возможно формирование области повышенной солености внутри плюма вдоль южного побережья Печорского моря, вызванной ветровым апвеллингом (желтая область, см. рис. 5).



Рис. 5. Расположение границы плюма р. Печора в зависимости от влияния внешних факторов

Третий («максимальный») тип распространения плюма р. Печора характеризуется относительно далекими затоками вод на запад от губы Печорская и/или на восток до прол. Карские ворота и далее в Карское море (красная область, см. рис. 5). В этом случае площадь зоны опреснения увеличивается до 25-28 тыс. км², а внешняя граница плюма сдвигается на 40-50 км к северу относительно «среднего» типа (2017, 2018, 2020 гг.). Формирование «максимального» типа распространения происходит в период половодья в результате значительного ветрового воздействия и/или таяния большого массива морского льда. Так, в 2018 г. основным фактором расширения границ плюма послужило таяние крупного массива льда в юго-восточной части Печорского моря. Зона опреснения в июле 2018 г. охватывала практически всю мелководную акваторию моря, ее площадь достигала 36 тыс. км². В 2017 г., напротив, основным фактором увеличения площади плюма послужило значительное увеличение интенсивности речного расхода, а также благоприятные ветровые условия. В периоды «максимального» типа распространения плюма р. Печора на спутниковых снимках наблюдаются регулярные затоки вод в Карское море. Стоит отметить, что его границы очень подвижны, и в течение одного сезона можно наблюдать достаточно быстрые и неоднократные переходы между всеми тремя вышеописанными конфигурациями. Наиболее важным фактором, влияющим на изменение границ плюма, является ветровое

воздействие. Существенное смещение его границы формируется уже после 1,5-2,0 дней сильного ветра, что существенно меньше аналогичного периода отклика у плюмов рек Обь, Енисей и Лена, который достигает 1-2 недель (Influence of estuarine ..., 2020; Osadchiev, Silvestrova, Myslenkov, 2020; Structure of the..., 2017; Structure of the..., 2021).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант РНФ 23-17-00087.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Адров, Н.М. Океанографическая характеристика Печорского моря / Н.М. Адров, С.Г. Денисенко // Биогеоценозы гляциальных шельфов Западной Арктики. – Апатиты. – 1996. – С. 166-180.

Матишов, Г.Г. Биоокеанологические исследования ММБИ в Печорском море в 1992-1994 гг. / Г.Г. Матишов, С.Г. Денисенко // Экосистемы, биоресурсы и антропогенное загрязнение Печорского моря – 1996. – С. 9-12.

Мохова, О.Н. Изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик в Печорской губе Баренцева моря / О.Н. Мохова, Р.А. Мельник // Проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивое развитие арктических территорий. – 2019. – С. 340-345.

Полонский, В.Ф. Влияние приливов на перераспределение стока воды в дельте реки Печоры // Арктика: экология и экономика. – 2012. – Т. 6, № 2. – С. 20.

Dense water formation and circulation in the Barents Sea / M. Årthun, R. B. Ingvaldsen, L.H. Smedsrud, C. Schrum // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. – 2011. – Vol. 58, № 8. – P. 801-817.

Noaa atlas nesdis 87 / T.P. Boyer, O.K. Baranova, C. Coleman [et al.] // World Ocean Database. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1-207.

Structure of mesozooplankton community in the Barents Sea and adjacent waters in August 2009 / V.G. Dvoretzky, A.G. Dvoretzky // Journal of Natural History. – 2013. – Vol. 47, № 31-32. – P. 2095-2114.

Кос, N. Pechora Sea Environments: Past, Present and Future / N. Кос // Berichte zur Polar-und Meeresforschung (Reports on Polar and Marine Research). – 2005. – Vol. 501.

Lee, K.H. On the Distribution of Zooplankton in the Southeastern Barents Sea during July 2002 / K.H. Lee, H.Y. Soh // Korean Journal of Environmental Biology. – 2003. – Vol. 21, № 4. – P. 392-399.

Lind, S. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import / S. Lind, R.B. Ingvaldsen, T. Furevik // *Nature climate change*. – 2018. – Vol. 8, № 7. – P. 634-639.

Loeng, H. Water fluxes through the Barents Sea / H. Loeng, V. Ozhigin, B. Ådlandsvik // *ICES Journal of Marine Science*. – 1997. – Vol. 54, № 3. – P. 310-317.

Structure of the buoyant plume formed by Ob and Yenisei river discharge in the southern part of the Kara Sea during summer and autumn / A.A. Osadchiev, A.S. Izhitskiy, P.O. Zavialov [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2017. – Vol. 122, № 7. – P. 5916-5935.

Structure of the Freshened Surface Layer in the Kara Sea During Ice-Free Periods / A.A. Osadchiev, D.I. Frey, S.A. Shchuka [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2021. – Vol. 126, № 1. – Art. e2020JC016486.

Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes / A. Osadchiev, I. Medvedev, S. Shchuka [et al.] // *Ocean Science*. – 2020. – Vol. 16, № 4. – P. 781-798.

Osadchiev, A. Wind-driven coastal upwelling near large river deltas in the Laptev and East-Siberian seas / A. Osadchiev, K. Silvestrova, S. Myslenkov // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, № 5. – P. 844.

Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine / Ø. Skagseth, T. Eldevik, M. Årthun [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2020. – Vol. 10, № 7. – P. 661-666.

Spatial and temporal variation of hydrological characteristics and zooplankton community composition influenced by freshwater runoff in the shallow Pechora Sea / N. Usov, V. Khaitov, V. Smirnov, A. Sukhotin // *Polar Biology*. – 2019. – Vol. 42, № 9. – P. 1647-1665.

ПРОМЫСЛОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И ЭКОЛОГИЯ ГРЕНЛАНДСКОГО ТЮЛЕНЯ БЕЛОМОРСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОЙ ЛЕДОВИТОСТИ БЕЛОГО МОРЯ

В.Н. Светочев, О.Н. Светочева

*Мурманский морской биологический институт РАН
(ММБИ РАН), г. Мурманск*

Аннотация. Рассмотрена экология гренландского тюленя беломорской популяции, дан обзор итогов промысла, изменений в структуре и численности популяции, мониторинга популяции в нестабильных ледовых условиях в Белом и Баренцевом морях в 1995-2022 гг.

Ключевые слова: гренландский тюлень, численность, экология, ледовые условия.

ВВЕДЕНИЕ

Гренландский тюлень (*Phoca groenlandica*) – самый многочисленный пагофильный вид в северном полушарии (беломорская, ян-майенская, ньюфаундлендская популяции), ежегодно совершает протяженные нагульные миграции. Ареалы беломорской и ян-майенской популяций перекрываются вне периода размножения в Гренландском, Норвежском и Баренцевом морях (Folkow, Nordøy, Blix, 2004; Nordøy, Folkow, Potelov, 2008). Все популяции сохранили промысловое значение, но имеют разную степень изученности и использования (Хузин, 1972; Sergeant, 1991; International council for..., 2019; 2023). Считается, что в 1875 г. численность беломорской популяции достигала 6 млн тюленей. В 1927 г. она составила 3-3,5 млн, а в середине 1950-х годов – 1,2-1,5 млн шт. В 1962 г. количество тюленей в возрасте 1+ оценивали в 240-500 тыс. шт., что является минимальным. После введения запрета промысла взрослых самок на ценных залежках и квотирования добычи детенышей численность популяции в 1976 г. составила 551 тыс. шт. (Хузин, 1972; Назаренко 1984; Skaug, Frimannslund, Øien, 2007).

Статистика промысла гренландского тюленя беломорской популяции в Белом и Баренцевом морях ведется с 1875 г., до этого времени добыча тюленя составляла, очевидно, не более 30 тыс. шт. в год. В период до 1920 г. промысел рос, достигая более 100 тыс. шт. в год, в 1925 г. были добыты более 470 тыс. шт. тюленей, а с 1920 по 1937 г. ежегодно вылавливали более 150 тыс. шт. (советский и норвежский промысел в целом). Во время Великой Отечественной войны добыча сократилась,

после ее окончания в Белое море снова вышли крупные ледоколы, и в 1945-1950 гг. тюленей добывали в среднем 156 тыс. шт. в год. В 1951-1955 гг. вылавливали 134 тыс. шт. в год, в 1955 г. СССР (в одностороннем порядке для советских судов) ввел квоту 100 тыс. шт. в год, и в 1956-1960 гг. добывали в среднем 96 тыс. шт. ежегодно. В 1964 г. был введен мораторий на добычу взрослых самок на ценных залежках (Назаренко, 1984; Яковенко, 1967; Хузин, 1972; Светочев, Светочева, 2012). После Второй мировой войны концессия на норвежский судовой промысел в Белом море не была возобновлена, поэтому норвежские зверобои добывали тюленей на льдах в Баренцевом море, не пересекая границу Белого моря. В 1946-1964 гг. норвежская среднегодовая добыча тюленей составила 15391 шт.

В 1965 г. в Белом море судовой промысел был запрещен, советская квота ограничена лимитом в 20 тыс. шт., которая осваивалась за счет вертолетной добычи тюленей в возрасте до 1 мес. В дальнейшем отмечался рост численности детенышей, что привело к увеличению добычи в Белом море (Назаренко, 1984). В 1981 г. квота составила 40 тыс. шт., а в 1982-1988 гг. была увеличена до 60 тыс. шт., с частичным участием судов типа ЗРС (Хузин, 1972; Назаренко, 1984; Светочев, Светочева, 2012). Норвежская добыча в это время была ограничена до 19 тыс. шт. (12394 шт. в среднем в год) в Баренцевом море и зависела от количества судов и ледовых условий.

В 1989-1998 гг. общая квота на добычу была снижена до 40 тыс. шт. В эти годы российская квота была 30,5 тыс. шт. (International council for..., 2009; 2011). Норвежцы вели судовой промысел тюленей разного возраста на дрейфующих льдах в юго-восточной части Баренцева моря. Среднегодовая российская добыча в эти годы составила 29941 шт., норвежская – 7448 шт. (International council for..., 2009; 2011).

В 1999-2008 гг. квота устанавливалась на тюленей в возрасте 1 год и старше, в случае добычи тюленей в возрасте до 1-го года применялся переводной коэффициент, в соответствии с которым квота увеличивалась согласно пропорции: 1 тюлень в возрасте 1 год и старше равен 2 или 2,5 детенышам. Такой подход позволял более точно оценивать влияние промысла на динамику численности популяции. Коэффициент применялся в нескольких моделях мониторинга гренландского тюленя беломорской популяции, в основе которых лежал принцип предосторожного подхода к освоению запасов (International council for..., 2009; 2011). В этот период времени ежегодная квота на добычу гренландского тюленя в возрасте 1+ колебалась от 21400 до 78200 шт. при увеличении российской части, норвежская часть составляла 5-15 тыс. шт. в возрасте 1+. Ожидаемого роста российской добычи не произошло, в 1999-2003 гг. среднегодовая

добыча составила чуть более 32,5 тыс. шт., а в 2004-2008 гг. она сократилась до 7,9 тыс. шт. Норвежцы добывали в среднем 4-4,8 тыс. шт. Российская добыча тюленей в Белом море в 2004-2008 гг. сокращалась вследствие экономических проблем, а норвежский промысел в Баренцевом море в эти годы зависел от ледовых условий и количества судов (International council for..., 2009; 2011).

В 2009-2023 гг. общие квоты на промысел гренландского тюленя колебались от 35 (2009 г.) до 7 (2010-2014 гг.) тыс. шт. с некоторым ростом до 21172 тыс. шт. (2020-2023 гг.), без деления тюленей по возрасту. Норвежская часть составляла 7 тыс. шт. (добыча 550 шт. в год в среднем), российская – 28 тыс. шт. (2009 г.), в 2010-2014 гг. квота не выделялась. В целом за последние 15 лет были добыты только 19 тюленей для научных целей (International council for..., 2023). Очевидно, что такой небольшой промысел не мог оказать влияние на численность популяции (International council for..., 2009, 2011, 2023). Причиной был запрет на добычу тюленей в возрасте до одного года в Белом море, который действовал с 2008 до 2014 г. и в итоге разорил добывающие организации. Выделяемые с 2015 г. коммерческие квоты для российских зверобоев оставались невостребованными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Показатели темпов вступления в размножение самок гренландского тюленя взяты из совместной российско-норвежской работы (Trends in age..., 2003), а также из отчетов Рабочих групп ИКЕС/НАФО по гренландскому тюленю и хохлачу (2009, 2011, 2019, 2023), данные о сроках деторождения и выкармливания потомства в Белом море – из работы В.Н. Светочева, О.Н. Светочевой (2018).

Сведения о ледовой обстановке 1995-2007 гг. в Белом море в ценный период (с конца февраля до середины 2-й декады марта) представлены по результатам авианаблюдений с самолета Л-410 и вертолета Ми-8. В 2008-2022 гг. ледовая обстановка оценивалась по интерактивным картам (multimaps.ru). Информация о наблюдениях деторождения тюленей в 2015 и 2020-2022 гг. была получена по опросным сведениям от туркомпании RuDIVE и в результате совместных авианаблюдений в 2021-2022 гг.

Данные о питании гренландских тюленей в Белом море были собраны в апреле-мае 2006 и 2007 гг. по общепринятым методикам (Светочев, Прищемихин, Светочева, 2003).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 1998-2007 гг. не отмечали уменьшения численности щенков и увеличения промысловых усилий во время добычи, ледовая обстановка на уровне среднесноголетних наблюдений (Голиков, 2003; Светочев, Светочева, 2012). Затем, после закрытия промысла в 2008 г., весенние авиасъемки 2009, 2010 и 2013 гг. показали низкую численность детенышей, но площадь пригодного для деторождения льда оставалась достаточной (International council for..., 2013; Stenson, Haug, Hammill, 2020). В период 2014-2020 гг. аномально низкая ледовитость (на 10 марта) была отмечена в 2015 и 2020 гг. (Stenson, Haug, Hammill, 2020) (рис. 1).

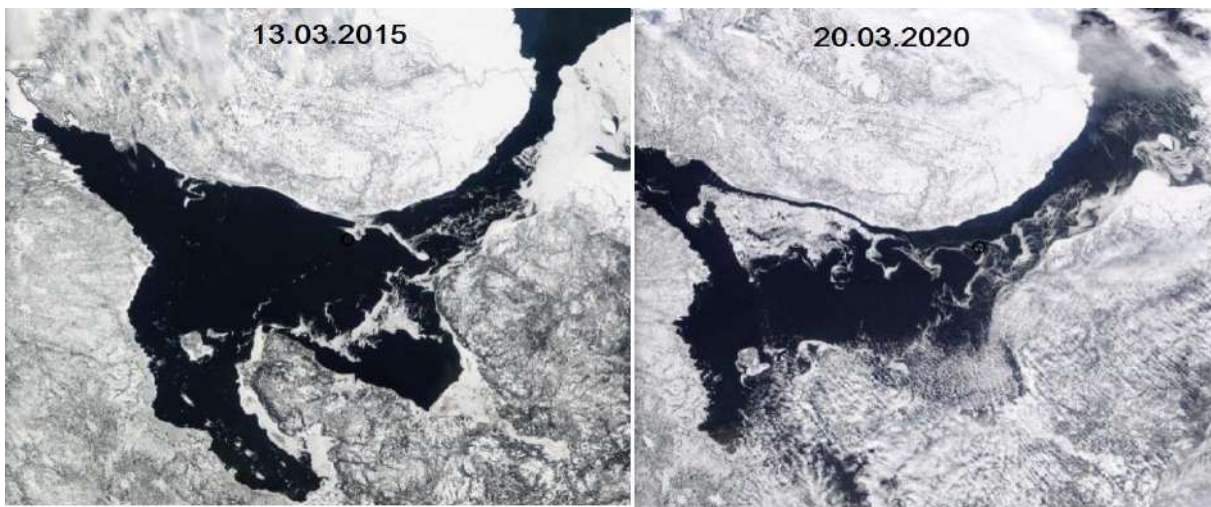


Рис. 1. Аномальная ледовая обстановка в Белом море в марте 2015 и 2020 гг. (по: multimaps.ru)

Щенные залежки в 2015 г. сформировались в Бассейне. По устному сообщению И.А. Кромберга, детеныши были отмечены 3 марта на 66.0110° с.ш. и 36.8487° в.д., небольшая залежка на мелкобитом льду 6 марта была на 66.0220° с.ш. и 39.2408° в.д., а 8 марта – на 66.7688° с.ш. и 42.3273° в.д. Залежки южными ветрами быстро выносило в Горло, что приводило к повышенной смертности детенышей в период выкармливания.

Дрейфующий однолетний лед отсутствовал и в марте 2020 г. Авиаразведка (инициатор – туркомпания RuDIVE) 05.03.2020 г. на акватории от о-вов Соловецкого архипелага до о-ва Моржовец включительно не обнаружила ни льда, ни детенышей. Самок и детенышей в количестве не более 5000 шт. на мелкобитом льду наблюдали только 11 марта с ледокола «Диксон» у Терского берега (Горло). Также в конце апреля в устье р. Северная Двина были отловлены два истощенных

детеныша на стадии «серка 1», видимо, небольшая часть самок все-таки щенилась в Белом море (Светочев, Светочева, 2021; 2022).

Величину возрастной когорты 2020 г. рождения может отразить их доля в возрастной структуре популяции в последующие годы (Светочев, Светочева, 2022). Пригодные для деторождения льды тюлени могли найти в юго-восточной части Баренцева моря (Назаренко, 1984). Косвенно это подтверждают результаты спутникового мечения тюленей в 2010 г., когда два тюленя с датчиками во время обратной миграции пришли на юго-восток Баренцева моря, а не в Белое море. Один из тюленей фиксировался в этом местоположении (по сигналам датчика) до начала февраля, а другой – до начала мая 2011 г., т.е. весь линный период. Представляется вероятным, что линные залежки молодых тюленей могут формироваться на льдах Чёшской губы и в прилегающих районах на юго-востоке Баренцева моря (Матишов, Светочев, Кавцевич, 2011; Светочев, Светочева, Кавцевич, 2015; Svetochev, Kavtsevich, Svetocheva, 2016).

В марте 2021 г. ледовая обстановка в Белом море оценивалась как средняя. Во время авиаразведки ценных залежек (туркомпания RuDIVE, 4, 5 и 7 марта) были обнаружены небольшие группы взрослых тюленей и единичные следы деторождения. Залежки гренландского тюленя в восточной части Бассейна были обнаружены только 26 марта во время повторной авиаразведки, основная доля самок щенилась в более поздние сроки, со смещением на 10-14 дней. Более поздние сроки щенения в 2021 г. были следствием аномальной ледовой обстановки в феврале-марте 2020 г., когда спаривание и постнатальная линька также проходили позднее обычного (Светочев, Светочева, 2022).

В феврале-марте 2022 г. ледовая обстановка в Белом море была благоприятной, ледовые поля дрейфующего льда сформировались в северной части Бассейна, Горле и на севере Двинского залива. Авиаразведка (туркомпания RuDIVE, 10.03.2022 г.) обнаружила ценную залежку севернее 65°30' с.ш. площадью около 100 км² в стадии интенсивного формирования. На следующий день на этой залежке высадившаяся группа туристов наблюдала около 400 детенышей, причем доля новорожденных составляла примерно 30 %. Следует отметить, что туристы осматривали небольшую часть залежки, общее количество детенышей, очевидно, было намного больше. Внушительная доля новорожденных детенышей 10 марта позволяет предположить, что в 2022 г. деторождение также происходило с задержкой на 8-10 дней.

При анализе ледовых карт Белого моря в период 1998-2020 гг. (на 10 марта) был отмечен ряд лет с незначительной площадью льдов в периоды деторождения и выкармливания детенышей. Снижение толщины

и площади льдов в Белом море, пригодных для деторождения, отмечается как иллюстрация к изменению климата (Stenson, Naug, Hammill, 2020).

Численность. В последние 25 лет были выполнены несколько учетов численности детенышей, в 1998-2003 гг. она составила 286-340 тыс. шт., а в 2004 г. были учтены лишь 230 тыс. Авиасъемки ценных залежек в 2005 и 2008 гг. показали дальнейшее снижение численности – 122,5 и 123 тыс. шт., лишь в 2009 г. она возросла до 157 тыс. шт. (Potelov, Golikov, Bondarev, 2003; Шафигов, Забавников, Егоров, 2006; Черноок, Болтнев, 2008; International council for..., 2011). В марте 2010 г. были выполнены два независимых учета, в первом случае численность детенышей оценили в 109 тыс. (Результаты тепловой авиасъемки..., 2010), во втором – 163 тыс. шт. (International council for..., 2011). В 2013 г. численность детенышей оценили в 129 тыс. шт. (International council for..., 2013; 2023). Рассчитанная численность тюленей в возрасте 1 года и старше в 2000-2013 гг. сократилась с 1,8-2,2 до 1-1,3 млн шт. (International council for..., 2014). Численность популяции в 2019 г. была оценена без выполнения учетных работ в размере 1,3-1,7 млн шт. (International council for..., 2019). В 2023 г. общую численность оценили в 1,28 млн шт., а численность детенышей – в 85,5 тыс. шт., но из-за неопределенности доверительный интервал оценок слишком широк. Для улучшения настройки модели динамики численности РГ ИКЕС/НАФО рекомендовала провести учеты численности детенышей гренландского тюленя в Белом море (International council for..., 2023). Данная модель показывает, что численность популяции будет неуклонно снижаться, однако учетных сведений о численности детенышей в 2014-2023 гг. нет. В связи этим РГ ИКЕС/НАФО признала недостаток данных о численности гренландского тюленя беломорской популяции, а оценку этой численности – с большой степенью неопределенности (International council for..., 2023). В дальнейшем 53-я сессия Смешанной российско-норвежской комиссии по рыболовству (Рабочая группа по тюленям) вышла с предложением не выделять коммерческую квоту на промысел гренландского тюленя на 2024 г. и далее, пока не будет новых данных о численности детенышей (Приказ федерального агентства..., 2023).

Темпы полового созревания и условия деторождения. Средний возраст наступления половой зрелости (СВПЗ) в беломорской популяции увеличился, если в 1960-е годы он составлял 5,5 лет, то в начале 1990-х годов СВПЗ достиг 8,2 лет. В 2006 и 2018 гг. СВПЗ составлял 7 лет. Был сделан вывод, что увеличение СВПЗ происходит вследствие увеличения численности тюленей в популяции или в результате изменений в экосистеме, приводящих к ограничению доступности кормовой базы (Trends in age..., 2003; International council for..., 2019; Stenson, Naug,

Hammill, 2020). Коэффициент беременности (КБ) до 1990 г. считался постоянным – 0,84. В дальнейшем КБ линейно интерполировали между периодами получения новых данных, в 1990 г. он составил 0,84, в 2006 г. – 0,68, в 2011 г. – 0,84 и в 2018 г. – 0,86. После 2018 г. показатель считали постоянным – 0,91. (International council for..., 2019). Новые данные о СВПЗ и КБ были получены в 2021 г. во время норвежского промысла тюленей в Баренцевом море: 6,6 лет и 0,72 соответственно (International council for..., 2023).

Массовое деторождение на дрейфующих льдах Белого моря происходит с конца февраля до начала марта. В 1995-2005 гг. сдвигов сроков и темпов деторождения не отмечали, массовая щенка шла с 27 февраля по 3 марта, щенный период продолжался с 14-17 февраля по 12-14 марта (Светочев, Светочева, 2018). Выкармливание длится до 14 дней, затем самки уходят, детеныши остаются на льду и, проходя несколько стадий постнатальной линьки, на стадии «серка 1» сходят в воду (Светочев, Светочева, 2018). Успешность их выживания в Белом море зависит от совокупности ряда факторов – ледовых условий в период деторождения, выкармливания, линьки и кормовых условий. Причинами повышенной смертности могут быть раннее разрушение льда с неперелинявшими детенышами, а также задержка ледовых полей с ними во внутренних районах Белого моря – такие случаи отмечали в годы с высокой ледовитостью моря – 1966, 1979, 1981 гг. (Тамбовцев, 1966; Тимошенко, 1986; Светочев, Светочева, 2012, 2018).

Питание тюленей. Одной из главных причин резкого сокращения численности детенышей может быть уменьшение доли беременных самок в популяции вследствие ухудшения состояния организма из-за негативных изменений в кормовой базе Баренцева моря, прежде всего из-за катастрофического снижения запасов мойвы. Также не исключается конкуренция гренландского тюленя с атлантической треской (International council for..., 2016; Stenson, Naug, Hammill, 2020). Например, для тюленей ньюфаунлендской популяции межгодовая изменчивость плодовитости связана с разной частотой абортных самок на поздних сроках, что, в свою очередь, связано с запасами мойвы и ледовитостью моря в середине зимы (Hammill, Stenson, Doniol-Valcroze, 2015; Stenson, Buren, Koen-Alonco, 2016). Для Белого моря пока не доказано, что площадь льда влияет на количество деторождений. Нет информации о связи биологических показателей самок с запасами мойвы в Баренцевом море, которые сегодня находятся на самом низком уровне, однако совместное влияние нестабильных ледовых условий и негативных изменений в кормовой базе может усиливать неблагоприятные процессы в популяции.

В Белом море весеннее питание тюленей является нерегулярным с низким уровнем потребления как для детенышей, так и для остальных возрастных групп. Например, в 2006 и 2007 гг. пища была отмечена менее чем в 11 % проб. Анализ проб показал, что взрослые и неполовозрелые тюлени кормятся неизбирательно, отмечены рыба и ракообразные, частота встречаемости 65 и 76 % соответственно. Пищу составляют амфиподы, креветки, эвфаузииды, мойва (до 71 %), бычковые, корюшковые, тресковые. Для детенышей, впервые начинающих кормиться, успешность питания – важный фактор выживания, где большую долю в пище составляют амфиподы, креветки (78 %), мойва (13,5 %), песчанка (4,5 %) (Светочев, Светочева, 2009).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение данных для оценки колебаний численности беломорской популяции гренландского тюленя таких параметров, как ежегодные репродуктивные показатели, смертность, возраст, количество деторождений сегодня представляется сложной проблемой. Возникают значительные неопределенности и большие пробелы в информации, что делает затруднительной интерпретацию изменений в популяции. Очевидным остается факт сокращения численности беломорской популяции, не находящейся под влиянием промысла длительное время. В последние 10 лет эту ситуацию в отдельные годы осложняют нестабильные ледовые условия в Белом море, где традиционно проходит массовое деторождение тюленей.

Очевидно, что поколение 2020 г. будет слабо представлено в возрастной структуре популяции в связи с вероятно высокой смертностью детенышей (также с учетом аборт у самок на поздних сроках).

Отсутствие льда в Белом море в феврале-марте 2020 г. оказало влияние на сроки спаривания тюленей, так как сдвиг сроков деторождения на две недели в 2021 г. можно объяснить только этой причиной.

Аномальная ледовитость Белого моря в феврале-марте 2015 и 2020 гг. оказала негативное влияние на численность гренландского тюленя, нестабильные ледовые условия усилили тенденцию ее снижения.

Представляется вероятным то, что в годы с аномальной ледовитостью Белого моря щенение гренландского тюленя происходит в юго-восточной части Баренцева моря, например в Чёшской губе. Возможно также, что массовые спаривание и линька тюленей весной 2020 г. проходили в юго-восточной части Баренцева моря.

Нестабильность ледовитости Белого моря в отдельные годы выражается в полном отсутствии однолетнего дрейфующего льда в основных районах массового щенения гренландского тюленя. В такие аномальные годы выполнение авиаучетов должно охватывать не только Белое море, но и возможные районы щенения в юго-восточной части Баренцева моря.

Гренландский тюлень беломорской популяции в меняющихся условиях среды обитания фактически является чутким индикатором для мониторинга морского биоразнообразия в Северной Атлантике и Арктике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Голиков, А.П. Особенности распределения детных залежек гренландского тюленя (*Phoca groenlandica* Erxleben, 1777) в Белом море в 1997-2003 гг. / А.П. Голиков // Материалы отчетной сессии СевПИНРО по итогам НИР 2001-2002 гг. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. – С. 271-275.

Матишов, Г.Г. Спутниковое мечение щенков гренландского тюленя в 2010 году / Г.Г. Матишов, В.Н. Светочев, Н.Н. Кавцевич [и др.] // Морские животные на службе человеку: материалы научно-практического семинара. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. – С. 47-52.

Назаренко, Ю.И. Биология и промысел беломорской популяции гренландского тюленя // Морские млекопитающие: сборник статей. – М.: Наука, 1984. – С. 109-117.

Приказ Федерального агентства по рыболовству 25.10.2023, № 602 «О мерах по выполнению решений 53-й сессии СРНК по рыболовству» (URL:<https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408009439/?ysclid=lrkp47ux2q579216913>). – Текст: электронный.

Результаты тепловой авиасъемки тюленей и моржей в Белом море в марте 2010 г. / В.И. Черноок, Д.М. Глазов, Н.А. Черноок [и др.] // Сборник трудов VI Международной конференции «Морские млекопитающие Голарктики». 11-15 октября 2010 г. – Калининград: Капрос, 2010. – С. 627-633.

Светочев, В.Н. Наставление для полевого определения китообразных и ластоногих в северо-восточной Атлантике и прилегающих прибрежных водах / В.Н. Светочев, В.Ф. Прищемихин, О.Н. Светочева [и др.]. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. – 56 с.

Светочев, В.Н. Экология питания гренландского тюленя весной в Белом море / В.Н. Светочев, О.Н. Светочева // Доклады Академии наук. – М.: Наука. – 2009. – Т. 429, № 4. – С. 571-573.

Светочев, В.Н. Морские млекопитающие: биология, питание, запасы / В.Н. Светочев, О.Н. Светочева // Биологические ресурсы Белого

моря: изучение и использование. Исследования фауны морей. – СПб.: Зоологический институт РАН. – 2012. – Т. 69 (77). – С. 261-286.

Светочев, В.Н. Гренландский тюлень: биология, экология, промысел / В.Н. Светочев, О.Н. Светочева. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. – 2018 – 174 с.

Светочев, В.Н. Результаты мониторинга гренландского тюленя (*Phoca (Pagophilus) groenlandica*) весной 2020 г. в Белом море / В.Н. Светочев, О.Н. Светочева. – Евразийское научное объединение. – М.: Изд-во Орлов Максим Юрьевич, 2021. – № 3-2 (73). – С. 113-118.

Светочев, В.Н. Мониторинг ценных залежек гренландского тюленя в Белом море в 2020-2022 гг. / В.Н. Светочев, О.Н. Светочева // Морские исследования и образование (MARESEDU) – 2022. – Труды XI Международной научно-практической конференции. – Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. – С. 387-392.

Светочев, В.Н. Миграции гренландских тюленей беломорской популяции на первом году жизни по данным спутниковой телеметрии / В.Н. Светочев, О.Н. Светочева, Н.Н. Кавцевич // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – М.: Академия Естествознания. – 2015. – № 12-3. – С. 485-491.

Тамбовцев, Б.М. Массовые подходы детенышей гренландского тюленя к берегам Белого моря / Б.М. Тамбовцев // Рыбное хозяйство, 1966. – № 12. – 17 с.

Тимошенко, Ю.К. Влияние ледовых и метеорологических условий на некоторых настоящих тюленей / Ю.К. Тимошенко // Экология. – 1986. – № 3. – С. 72-78.

Хузин, Р.Ш. Эколого-морфологический анализ различий и перспективы промысла гренландского тюленя беломорской, январь-майской и ньюфаундлендской популяций. – Мурманск: Мурманское книжное издательство, 1972. – 176 с.

Черноок, В.И. Регулярный инструментальный мониторинг зафиксировал резкое снижение рождаемости беломорской популяции гренландского тюленя / В.И. Черноок, А.И. Болтнев // Сборник трудов V Международной конференции «Морские млекопитающие Голарктики». – Одесса, 2008. – С. 100-104.

Шафиков, И.Н. Результаты авиасъемок гренландского тюленя (*Phoca groenlandica*) беломорской популяции на ценных и линных залежках в 2004-2005 гг. / И.Н. Шафиков, В.Б. Забавников, С.А. Егоров [и др.] // Сборник трудов IV Международной конференции «Морские млекопитающие Голарктики». 10-14 сентября 2006 г. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 552-555.

Яковенко, М.Я. Беломорская популяция гренландского тюленя и перспективы ее промысла / Исследования морских млекопитающих. – Труды ПИНРО. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1967. – Вып. 21. – С. 6-18.

International Council for the Exploration of the Sea. 2009. Report of the Joint ICES/NAFO Working Group on Harp and Hooded Seals, 24-27 August 2009, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2009/ACOM 17. – 51 p.

International Council for the Exploration of the Sea. 2011. Report of the Joint ICES/NAFO Working Group on Harp and Hooded Seals, 15-19 August 2011. St. Andrews, Scotland ICES CM 2011/ACOM 17. – 73 p.

International Council for the Exploration of the Sea. 2019. Report of the Joint ICES/NAFO/NAMMCO Working Group on Harp and Hooded Seals (WGHARP). 1:72. – 193 p.

International Council for the Exploration of the Sea. 2023. Report of the Joint ICES/NAFO/NAMMCO Working Group on Harp and Hooded Seals (WGHARP). ICES Scientific Reports. 5:96.

Folkow, L.P. 2004. Distribution and diving behaviour of harp seals from the Greenland Sea stock / L.P. Folkow, E.S. Nordøy, A.S. Blix // Polar Biology. – Germany: Springer Verlag, 2004. – № 27. – P. 281-298.

Hammill, M.O. Conservation of northwest Atlantic harp seals: past success, future uncertainty? / M.O. Hammill, G.B. Stenson, T. Doniol-Valcroze // Biology Conservation. – 2015. – 192. – P. 181-191.

Nordøy, E.S. Seasonal distribution and dive behaviour of harp seals of the White Sea / E.S. Nordøy, L.P. Folkow, V. Potelov [et al.] // Barents Sea stock. – Polar Biology, 2008. – № 31. – P. 1119-1135.

Øien, N. Use of mark-recapture experiments to monitor seal populations subject to catching, in Whales, Seals, Fish and Man / N. Øien, T. Øritsland // Developments in Marine Biology. – Amsterdam: Elsevier, 1995. – Vol. 4. – P. 35-45.

Potelov, V.A. Estimated pup production of harp seals *Pagophilus groenlandicus* in the White Sea Russia, in 2000 / V.A. Potelov, A.P. Golikov, V.A. Bondarev. – ICES Journal of Marine Science, 2003. – Vol. 60. – P. 1012-1017.

Sergeant, D.E. Harp seals, man and ice / D.E. Sergeant // Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Sciences. – Ottawa: Fisheries and Oceans Canada, 1991. – P. 153.

Skaug, H.J. Historical population assessment of Barents Sea harp seals (*Pagophilus groenlandicus*) / H.J. Skaug, L. Frimannslund, N.I. Øien // ICES Journal of Marine Science. – 2007. – Vol. 64. – P. 1356-1365.

Stenson, G.B. The impact of changing climate and abundance on reproduction in an ice-dependent species, the Northwest Atlantic harp seal.

Pagophilus groenlandicus / G.B. Stenson, A.D. Buren, M. Koen-Alonso // ICES Journal of Marine Science. – 2016. – Vol. 73. – P. 250-262.

Stenson, G.B. Harp Seals: Monitors of Change in Differing Ecosystems / G.B. Stenson, T. Haug, M.O. Hammill // Front. Mar. Sci. – 2020. – Vol. 7. – P. 1-20.

Svetochev, V.N. Satellite tagging and seasonal distribution of harp seal (juveniles) of the White sea-Barents sea stock / V.N. Svetochev, N.N. Kavtsevich, O.N. Svetocheva // Czech Polar Reports. – 2016. – Vol. 6, № 1. – P. 31-42.

Trends in age at maturity and growth parameters of female northeast Atlantic harp seals / A.K. Frie, V.A. Potelov, M.C. Kingsley [et al.] // ICES Journal of Marine Science, 2003. – Vol. 60. – P. 1018-1032.

ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ И ЗАПАДНОЙ АРКТИКЕ НА РУБЕЖЕ XX И XXI вв.

Е.В. Сентябов, А.Г. Трофимов

*Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
г. Мурманск*

Аннотация. Рассмотрены особенности изменений условий среды в Баренцевом, Норвежском, Карском морях и районах Северной Атлантики в 1981-2022 гг. Показано, что с начала 1980-х годов в описываемых районах на фоне повышающейся штормовой активности наблюдаются увеличение температуры воздушных и водных масс и уменьшение площади льда, особенно с начала XXI в., однако изменения рассматриваемых параметров имеют циклический характер. С 2016 г. в Баренцевом и Норвежском морях отмечаются похолодание воздушных и водных масс и увеличение ледовитости Баренцева моря.

Ключевые слова: Северная Атлантика, моря Западной Арктики, изменения климата, температура воздуха, температура поверхности океана, штормовая активность, ледовитость, временная изменчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Начало XXI в. в Северной Атлантике и Арктике характеризовалось потеплением климата (Трофимов, Карсаков, Ившин, 2018; ICES Report on..., 2022). Оно оказало значительное влияние на распределение гидробионтов, поскольку условия среды играют важную роль в их жизни, обуславливая особенности нагула, зимовки, нереста, сезонных миграций (The Barents Sea..., 2011; The effect of..., 2015; Spatial and temporal..., 2017). А это в итоге влияет на урожайность поколений водных биологических ресурсов и их промысловые запасы (The Barents Sea..., 2011; Changes in Barents Sea..., 2012).

В работе исследована межгодовая изменчивость условий среды в 1981-2022 гг. в промысловых районах Северной Атлантики и Западной Арктики, включающих Большую Ньюфаундлендскую банку (БНБ), море Ирмингера, банку Рокколл, Норвежское и Баренцево моря, а также юго-западную часть Карского моря (рис. 1). Выбор этих регионов обусловлен их важным промысловым значением для отечественного флота (Состояние сырьевых биологических..., 2022). Так, в районе БНБ ведется активный промысел окуней, палтуса, трески и креветки, в море Ирмингера вылавливают окуня-клювача, в районе банки Рокколл – путассу и пикшу (Винниченко, Сентябов, 2005). В Норвежском море активно добывают

таких рыб, как сельдь, скумбрия и путассу (The Norwegian Sea..., 2004). Промысловое значение Баренцева моря не подвергается сомнению (The Barents Sea..., 2011). Юго-западная часть Карского моря обращает на себя внимание как район перспективного промысла сайки, наваги, краба-стригуна опилио и окраина нагульных ареалов трески и пикши (Боркин, Васильев, Четыркина, 2008; Новые данные по..., 2011).

Цель настоящей работы – исследовать и охарактеризовать особенности изменений условий среды в актуальных для отечественного рыболовства районах Северной Атлантики и Западной Арктики на протяжении последних более чем 40 лет.

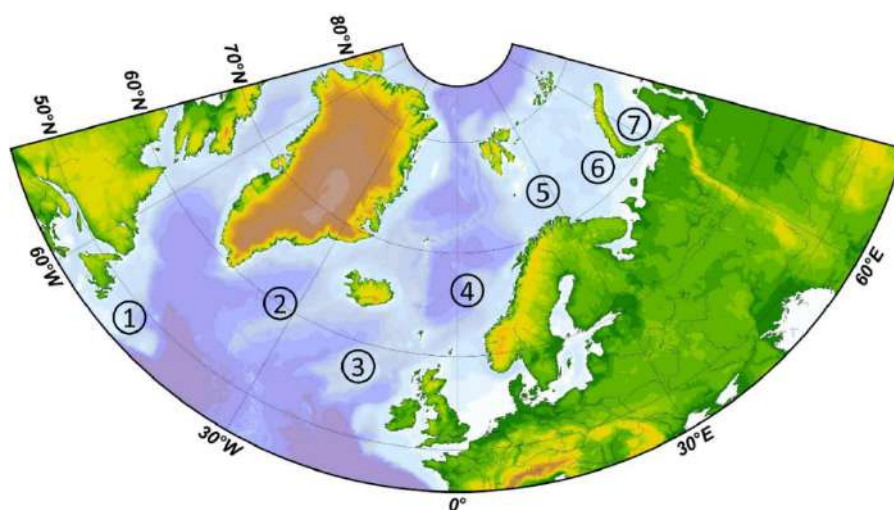


Рис. 1. Карта Северной Атлантики и Западной Арктики с положением регионов, описанных в работе: Большая Ньюфаундлендская банка (1); море Ирмингера (2); банка Рокколл (3); Норвежское море (4); западная (5) и восточная (6) части Баренцева моря; юго-западная часть Карского моря (7)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки изменений условий среды использовались следующие данные 1981-2022 гг.:

– индекс Атлантического мультидекадного колебания (АМК), отражающий тепловое состояние поверхностного слоя Северной Атлантики от экватора до 70° с.ш. (AMO Atlantic Multidecadal..., 2023);

– штормовая активность (количество дней с ветром более 15 м/с в целом за год) в районе БНБ, море Ирмингера, южной части Норвежского и центральной части Баренцева морей;

– среднегодовая температура воздуха (Monthly mean time..., 2023) и температура поверхностного слоя моря (ТПСМ) (Monthly SST from..., 2023) в районах БНБ, моря Ирмингера, банки Рокколл, Норвежского, Баренцева и Карского морей (для Карского моря использовались средние за июнь-

ноябрь значения ГПСМ, исключая декабрь-май – период полного покрытия моря льдом (Сентябов, 2008));

– среднегодовая ледовитость Баренцева, Карского морей и Арктики (Sea Ice Index..., 2023);

– среднегодовая температура атлантических вод (в слое 0-200 м) на разрезе «Кольский меридиан» (70°30'-72°30' с.ш., 33°30' в.д.) (120 лет океанографических..., 2022);

– климатический индекс (CI) Баренцева моря, рассчитанный согласно данным А.Г. Трофимова, А.Л. Карсакова, В.А. Ившина (2018).

Для расчета аномалий указанных параметров использовались средние значения за 1981-2020 гг. Нормирование аномалий выполнялось с помощью стандартного отклонения, рассчитанного за тот же период.

В работе использовались сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный и спектральный анализы (Елисеева, Юзбашев, 2004). Спектральный анализ выполнялся для детрендрованных рядов, полученных вычитанием из исходного ряда линейного тренда. Статистическая обработка данных и построение графиков сделаны в программах Microsoft Excel 2016 и Statgraphics 19.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные на рис. 2 изменения индекса АМК указывают на высокую температуру поверхностных вод в Северной Атлантике с конца 1990-х годов. За рассматриваемый 40-летний период отмечается значимый положительный тренд ($R^2 = 0,57$), составляющий $0,1\text{ }^\circ\text{C}$ за декаду.

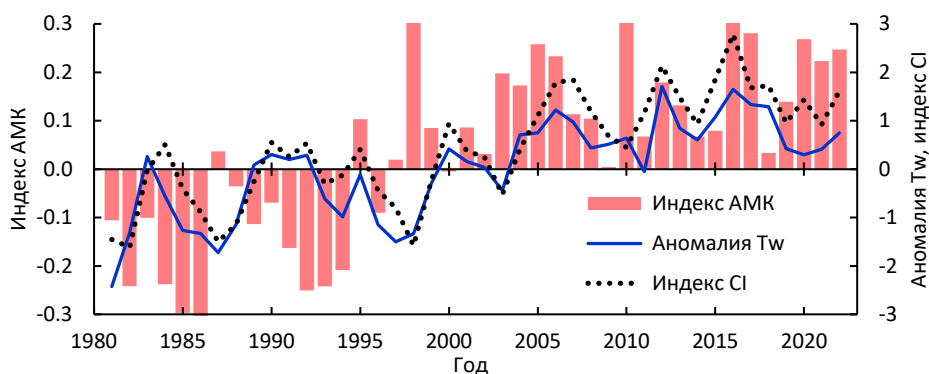


Рис. 2. Индекс Атлантического мультидекадного колебания (АМК), нормированные аномалии температуры атлантических вод (0-200 м) на разрезе «Кольский меридиан» (Тw), а также климатический индекс (CI) Баренцева моря в 1981-2022 гг.

В температуре атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» также наблюдался значимый положительный тренд ($0,3\text{ }^\circ\text{C}$ за декаду, $R^2 = 0,54$) (см. рис. 2.). С 2004 г. температура находилась на уровне теплых и аномально теплых лет, а в 2012 г. она достигла рекордно высокого

значения с 1900 г., которое повторилось в 2016 г. Согласно климатическому индексу Баренцева моря (см. рис. 2), с 2005 г. условия были самыми теплыми за рассматриваемый период, а 2016 г. характеризовался как рекордно теплый. С 2016 г. в изменениях индекса отмечается тенденция к похолоданию.

В 1981-2022 гг. в рассматриваемых районах в изменениях температуры воздуха и поверхности воды наблюдались значимые положительные тренды (см. таблицу, рис. 3, 4), лишь для температуры воздуха в районе банки Роколл он оказался статистически незначимым.

Величины трендов (жирным шрифтом) для штормовой активности, температуры воздуха, ТПСМ и ледовитости в различных регионах в 1981-2022 гг.

Район	Штормы, дни/10 лет	Температура воздуха, °C/10 лет		ТПСМ, °C/10 лет		Ледови- тость, 10 ⁶ км ² /10 лет
Большая Ньюфаунд- лендская банка	15,4 0,39/0,000*	0,18 0,12/0,024*		0,32 0,40/0,000*		–
Море Ирмингера	11,2 0,20/0,004*	0,26 0,20/0,003*		0,20 0,21/0,003*		–
Банка Роколл	23,3 0,31/0,007*	0,07 0,03/0,273*		0,16 0,24/0,001*		–
Норвежское море	1,6 0,01/0,618*	0,25 0,37/0,000*		0,20 0,34/0,000*		–
Баренцево море	16,2 0,64/0,000*	0,50 0,54/0,000* (запад)	0,94 0,52/0,000* (восток)	0,34 0,60/0,000* (запад)	0,39 0,36/0,000* (восток)	–0,103 0,68/0,000*
Карское море	–	1,18 0,49/0,000*		0,53 0,29/0,000*		–0,051 0,61/0,000*

*Значение R^2 и p -value.

При этом величина трендов увеличивалась при движении в северо-восточном направлении. Так, в Северной Атлантике и Норвежском море как для температуры воздуха, так и для ТПСМ, тренды были наименьшими и составляли 0,2-0,3 °C за декаду, а в Карском море – наибольшими (1,2 °C за декаду для температуры воздуха и 0,5 °C за декаду для ТПСМ) (см. табл. 1).

В 1980-1990-х годах во всех районах преобладали отрицательные аномалии температуры воздуха и ТПСМ (см. рис. 3, 4). Наиболее раннее начало потепления (с изменением знака аномалий) отмечено в западной части района исследований с 1996-1998 гг. на БНБ, в море Ирмингера и районе банки Роколл. В Норвежском море преобладание положительных аномалий отмечалось с 2002 г., в Баренцевом – с 2004 г.

Исторический максимум температуры воздуха и поверхности воды в море Ирмингера отмечался в 2010 г., в Норвежском море – в 2014 г., в Баренцевом – в 2016 г. В Северо-Западной Атлантике, районе банки Роколл

и Карском море максимумы температуры были «размыты» во времени и не так ярко выражены для какого-то конкретного периода. Так, в районе БНБ максимальная температура воздуха и воды отмечалась в 2006 и 2012 гг., в районе банки Роколл – в 1997, 2003 и 2007 гг., в юго-западной части Карского моря – в 2012, 2016 и 2020 гг.

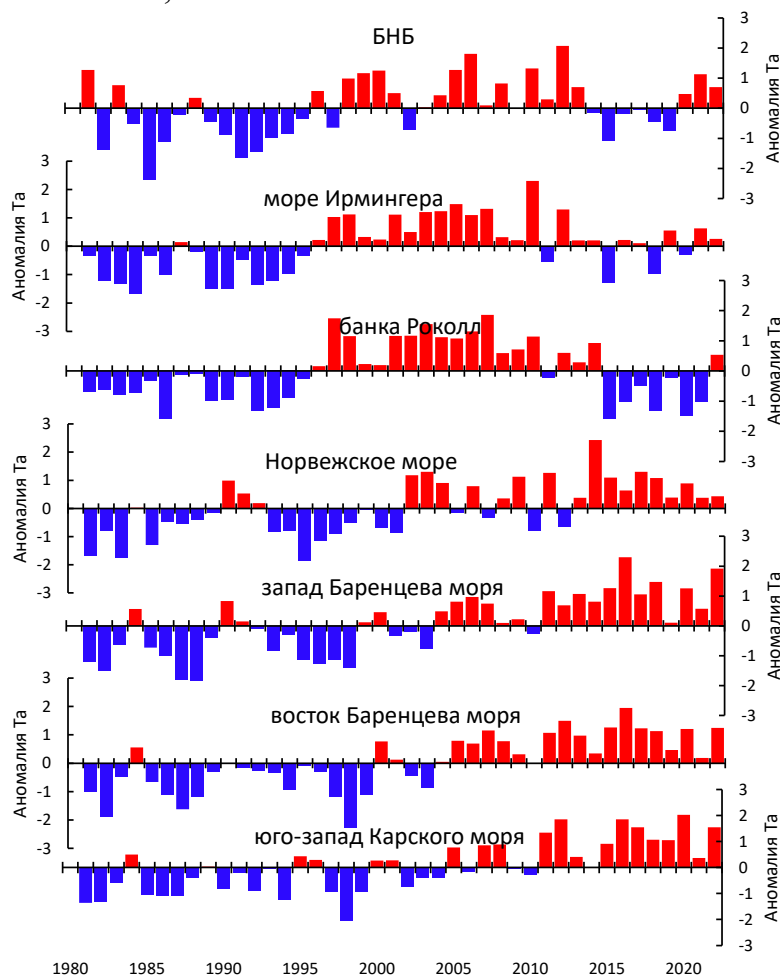


Рис. 3. Нормированные аномалии температуры воздуха (Ta) в 1981-2022 гг. в различных регионах

Рис. 3 и 4 иллюстрируют постепенное смещение «волны» положительных аномалий температуры из Северной Атлантики в моря Западной Арктики: Норвежское, а затем Баренцево и Карское. И если в Северной Атлантике пик потепления пришелся на середину 2000-х годов, то в Баренцевом море – только на середину 2010-х годов, когда в море Ирмингера, на БНБ и в районе банки Роколл уже отмечались отрицательные аномалии.

На фоне общего тренда к потеплению в изменениях температуры воздуха и ТПСМ присутствуют и циклические составляющие. Так, в районе БНБ в обоих параметрах выделены циклические компоненты с периодами 6, 8, 14 и 21 год, каждая из которых объясняет 10-15 % (в сумме 49 %)

изменчивости температуры воздуха и 16-19 % (в сумме 69 %) изменчивости ТПСМ. В море Ирмингера и районе банки Роколл основной вклад в изменения температуры вносит циклическая составляющая с периодом 21 год: 28 и 34 % для температуры воздуха, 41 и 35 % для ТПСМ. В Норвежском море в температуре воздуха преобладают циклы с периодами 14 лет (27 %) и 3 года (12 %), а в ТПСМ – с периодами 14 лет (21 %) и 6 лет (29 %). На западе Баренцева моря в обоих параметрах отмечались циклы с периодами 5-6, 8 и 10-11 лет со вкладом 23, 19 и 12 % (в сумме 54 %) для температуры воздуха и 14-15 % (в сумме 43 %) для ТПСМ. На востоке Баренцева и юго-западе Карского морей в этих параметрах преобладали циклы с периодами 4-6 лет и 21 год, объясняющие в сумме 50 и 54 % изменчивости температуры воздуха, а также 46 и 51 % изменчивости ТПСМ.

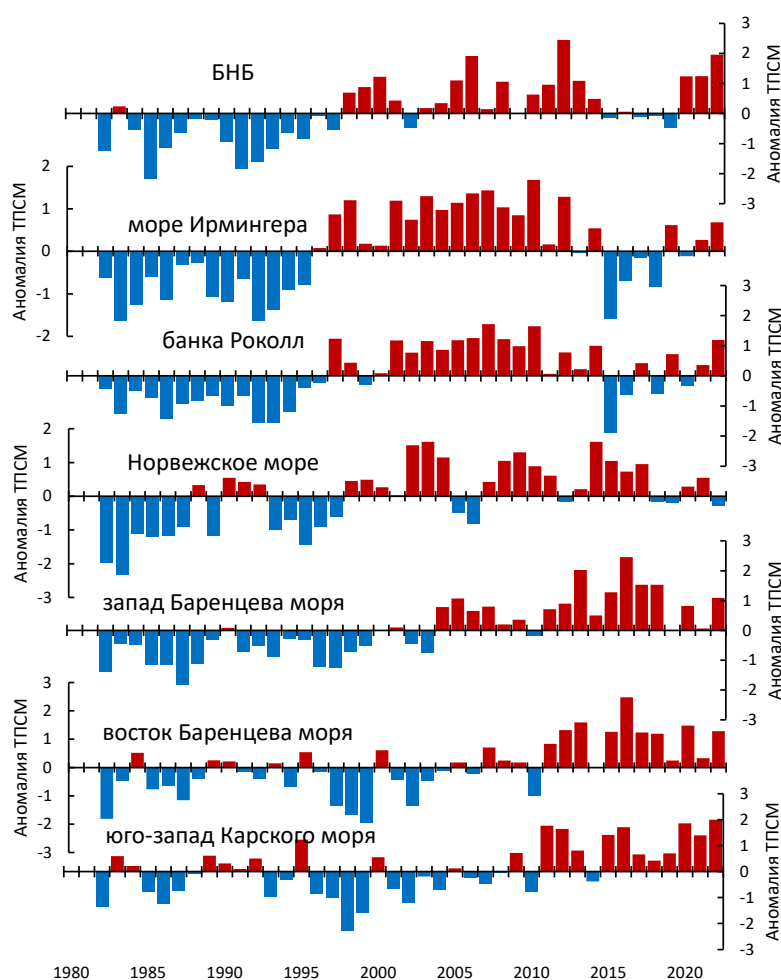


Рис. 4. Нормированные аномалии температуры поверхностного слоя моря (ТПСМ) в 1981-2022 гг. в различных регионах

На протяжении рассматриваемого периода ледовитость территории в целом сокращалась (рис. 5), наблюдался значимый отрицательный тренд: 534 тыс. км² за декаду ($R^2 = 0,89$) в Арктике, 103 и 51 тыс. км² за декаду

($R^2 = 0,68$ и $0,61$) в Баренцевом и Карском морях соответственно (см. таблицу).

При этом наименьшая среднегодовая ледовитость в Баренцевом море наблюдалась в 2012 и 2016 гг., а в Карском море – в 2012, 2016 и 2020 гг. За последние 30 лет льда в Баренцевом море стало вдвое меньше, однако с 2016 г. в этих районах наметилась тенденция к увеличению ледовитости.

Тренды ледовитости описывают основную часть ее изменчивости. Тем не менее в детрендрованных рядах ледовитости Арктики, Баренцева и Карского морей были выявлены циклические составляющие с периодами 5 лет (11, 25 и 15 %) и 21 год (14, 18 и 12 %). Также для Баренцева моря отмечался 8-летний цикл (12 %), а для Карского – 4-летний (17 %).

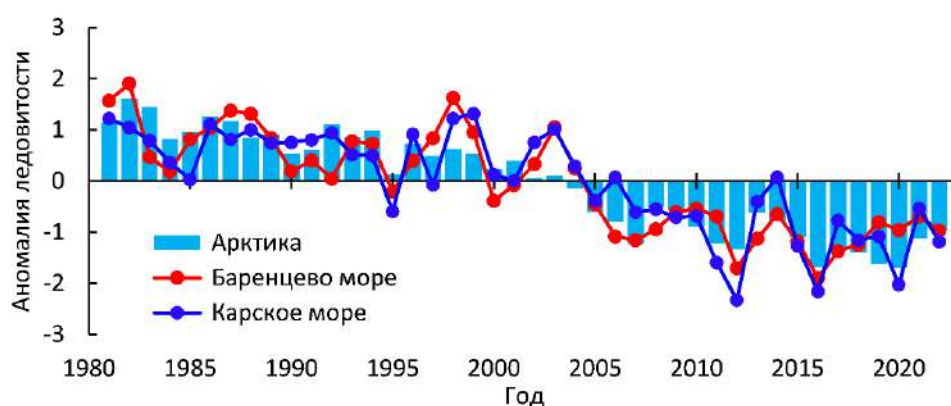


Рис. 5. Нормированные аномалии ледовитости Арктики, Баренцева и Карского морей в 1981-2022 гг.

Штормовая активность в последние два десятилетия XX в. характеризовалась большими различиями амплитуд в исследуемых районах, достигавших в Норвежском море 112 штормовых дней в году, а в Баренцевом – всего 41. С начала XXI в. амплитуды межгодовых изменений количества штормовых дней примерно выровнялись, составив 72-95 дней, а сама штормовая активность, особенно после «локального минимума» 2010 г., стала неуклонно расти (рис. 6). Значимые положительные тренды (R^2 до $0,64$) отмечены для всех районов, кроме Норвежского моря, для которого тренд отсутствовал (см. таблицу).

На протяжении последних десяти лет (2013-2022 гг.) количество штормовых дней в районе БНБ составляло в среднем 181 за год (при норме 141, рост относительно 1980-х годов на 37 %), в море Ирмингера – 183 (при норме 149, рост на 28 %), а в Баренцевом море – 152 (при норме 113, рост на 58 %). В штормовой активности над БНБ и в морях Ирмингера и Норвежском выделены циклы с периодами 6-7 лет (29 и 12 % соответственно) и 13-14 лет (14 и 23 %). В Баренцевом море отмечены циклы с периодами 4 года (12 %), 11 лет (16 %) и 21 год (13 %).

Современное потепление, как и в 1930-1950-е годы, вызвано усилением переноса теплого атлантического воздуха из Северной Атлантики в Западную Арктику и увеличением адвекции тепла Северо-Атлантическим и Норвежским течениями (The Barents Sea..., 2011). В работе получены статистически значимые прямые связи климатического индекса Баренцева моря с индексом АМК ($r = 0,68$, сдвиг 2 года). Ледовитость Баренцева, Карского морей и Арктики имеет статистически значимые обратные связи со штормовой активностью над Баренцевым морем, температурой воздуха и воды Баренцева моря.

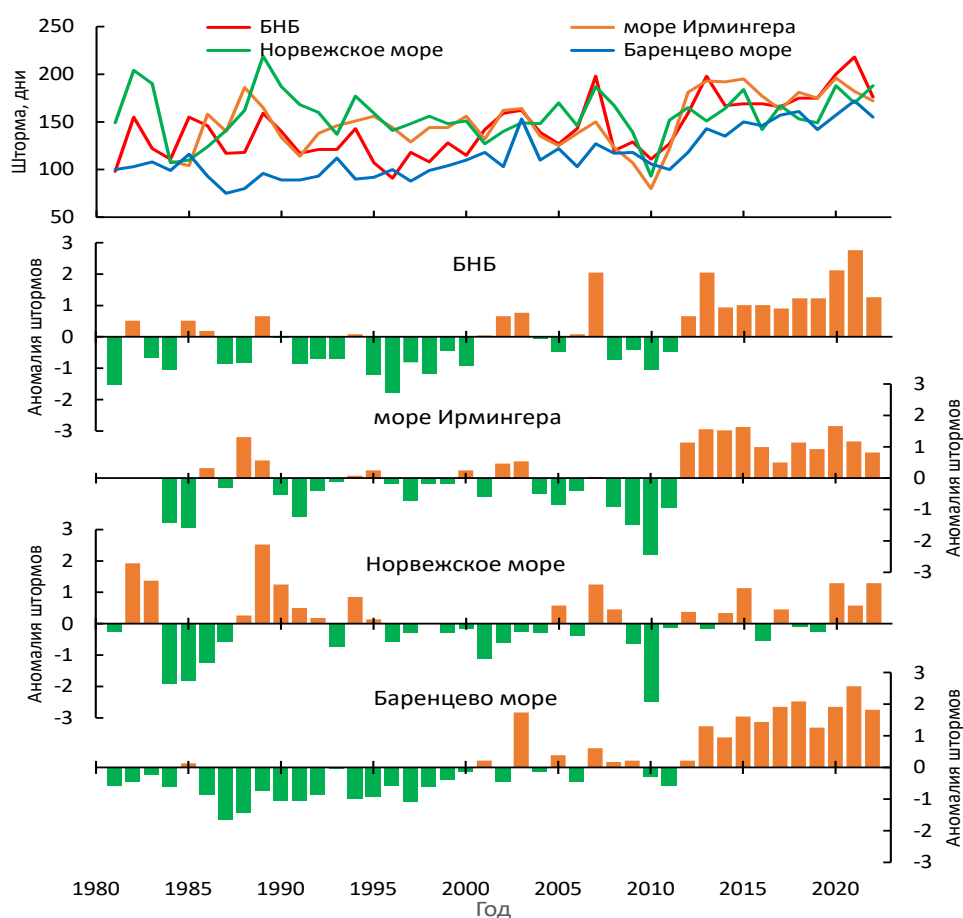


Рис. 6. Суммарное за год количество штормовых дней в различных регионах и их нормированные аномалии в 1981-2022 гг.

Современное длительное потепление вод морей Западной Арктики является благоприятным для многих тепловодных бореальных видов водных биоресурсов. Одним из следствий потепления вод Баренцева и Карского морей было обнаружение на акватории Карского моря летом 2007-2008 гг. таких тепловодных промысловых видов, как окунь-клювач, треска, пикша, мойва, зубатки (Новые данные по..., 2011), продолживших встречаться в этом море и в последующие годы (Некоторые

предварительные результаты..., 2020). В середине 2010-х годов, вследствие значительного потепления вод Норвежского течения и его ветвей, в Баренцевом море, западнее разреза «Кольский меридиан», было выловлено несколько экземпляров такого тепловодного вида, как скумбрия (Калашников, Сентябов, 2022), однако наметившаяся со второй половины 2010-х годов тенденция к похолоданию вод в описываемых промыслово-значимых районах при ее сохранении может помешать теплолюбивым видам рыб проникать дальше на север.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С начала 1980-х годов в Северной Атлантике и Западной Арктике на фоне увеличивающейся штормовой активности наблюдалось значительное повышение температуры воздушных и водных масс и сокращение площади льдов в полярных широтах. В морях Западной Арктики устойчивый теплый период отмечался с начала XXI в. Пик потепления в море Ирмингера пришелся на 2010 г., в Норвежском море – на 2014 г., в Баренцевом море – на 2016 г. Максимальные значения температуры воды и воздуха в Северо-Западной Атлантике отмечались в 2006 и 2012 гг., в районе банки Роколл – в 1997 и 2007 гг., в Карском море – в 2012, 2016 и 2020 гг. Тенденция к похолоданию зарегистрирована в Северной Атлантике с 2010-2012 гг., в Норвежском и Баренцевом морях – с 2014-2016 гг. В описываемый период наблюдалось постепенное смещение потепления из Северной Атлантики в моря Западной Арктики: вначале в Норвежское, а затем Баренцево и Карское. Когда в Баренцевом море отмечался пик потепления, в море Ирмингера и районах Большой Ньюфаундлендской банки и банки Роколл уже отчетливо прослеживалась тенденция к похолоданию.

На фоне положительных трендов в температуре воздуха, воды, количестве штормовых дней и отрицательного тренда в ледовитости в изменениях этих параметров также присутствовали циклические составляющие. Чаще всего отмечались циклы с периодами 5-6, 8, 14 и 21 год, их вклад в дисперсию детрендрованных рядов достигал соответственно 29, 30, 32 и 40 %.

Важно продолжать мониторинг условий среды и предвидеть их изменения, так как от того, какая тенденция (потепление или похолодание) будет наблюдаться в ближайшие годы, будет зависеть характер распределения в морях Западной Арктики промысловых гидробионтов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Боркин, И.В. Ихтиофауна / И.В. Боркин, А.В. Васильев, О.Ю. Четыркина // Экосистема Карского моря. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2008. – С. 130-206.

Винниченко, В.И. Распределение миграции пикши (*Melanogrammus aeglefinus*) на банке Роколл / В.И. Винниченко, Е.В. Сентябов // Вопросы рыболовства. – М., 2005. – Т. 6. – № 1 (21). – С. 44-55.

Елисеева, И.И. Общая теория статистики / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 2004 – 656 с.

Калашников, Ю.Н. Атлантическая скумбрия в Норвежском и Баренцевом морях: история и современность / Ю.Н. Калашников, Е.В. Сентябов // Труды ВНИРО. – 2022. – Т. 188. – С. 49-58.

Карсаков, А.Л. Основные особенности условий среды в Баренцевом море в 2017 г. / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, О.В. Титов // Труды ВНИРО. – 2018. – Т. 173. – С. 17-32.

Некоторые предварительные результаты биологических исследований в Карском море на НИС «Профессор Леванидов» в сентябре 2019 г. / А.М. Орлов, А.Н. Бензик, М.О. Рыбаков [и др.] // Труды ВНИРО. – 2020. – Т. 182. – С. 201-215.

Новые данные по ихтиофауне Карского моря (по результатам исследований ПИНРО в 2007-2008 гг.) / А.В. Долгов, О.В. Смирнов, Е.В. Сентябов [и др.] // Наземные и морские экосистемы. – М.: Паулсен, 2011. – С. 112-128.

Сентябов, Е.В. Физико-географическая характеристика и гидрометеорологические условия Карского моря / Е.В. Сентябов // Экосистема Карского моря. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2008. – С. 21-42.

Состояние сырьевых биологических ресурсов Баренцева, Белого и Карского морей и Северной Атлантики в 2022 г. / Под ред. К.М. Соколова. – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2022. – 161 с.

120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А.Л. Карсаков, А.Г. Трофимов, М.Ю. Анциферов [и др.]. – Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича, 2022. – 145 с.

Трофимов, А.Г. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека / А.Г. Трофимов, А.Л. Карсаков, В.А. Ившин // Труды ВНИРО. – 2018. – Т. 173. – С. 79-91.

AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index. – Текст: электронный // NOAA PSL. – URL: <https://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/> (дата обращения 01.02.2023).

Changes in Barents Sea ecosystem state, 1970-2009: climate fluctuations, human impact, and trophic interactions / E. Johannesen, R.V. Ingvaldsen,

B. Bogstad [et. al.] // ICES Journal of Marine Science, 2012. – Vol. 69. – № 5. – P. 880-889.

ICES Report on ocean climate 2020 / C. González-Pola, K.M.H. Larsen, P. Fratantoni, A. Beszczynska-Möller (Eds.) // ICES Cooperative Research Reports. 2022. – № 356. – 121 p.

Monthly mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset. – Текст: электронный // NOAA PSL. – URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl> (дата обращения 01.02.2023).

Monthly SST from NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn_SmithOIv2. – Текст: электронный // NOAA. – URL: http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/EMC/CMB/GLOBAL/Reyn_SmithOIv2/monthly/sst/ (дата обращения 01.02.2023).

Sea Ice Index Daily and Monthly Image Viewer. – Текст: электронный // NSIDC. – URL: https://nsidc.org/data/seaice_index/data-and-image-archive (дата обращения 01.12.2023).

Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming / E. Eriksen, H.R. Skjoldal, H. Gjøsæter [et al.] // Progress in Oceanography. – 2017. – Vol. 151. – P. 206-226.

The effect of recent warming on polar cod and beaked redfish juveniles in the Barents Sea / E. Eriksen, R.B. Ingvaldsen, K. Nedreaas [et al.] // Regional Studies in Marine Science. – 2015. – Vol. 2. – P. 105-112.

The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation / Eds. T. Jakobsen, V.K. Ozhigin. – Trondheim: Tapir Academic Press, 2011. – 825 p.

The Norwegian Sea Ecosystem / H.R. Sætre, R. Færnø, A. Misund [et al.]. – Trondheim: Tapir Academic Press, 2004. – 560 p.

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И ТЕРМОХАЛИННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ В РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНАХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

А.А. Сумкина^{1,2}, **В.В. Иванов**^{2,3}, **К.К. Кивва**¹

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства
и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), г. Москва*

²*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
(АНИИ), г. Санкт-Петербург*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
(МГУ), г. Москва*

Аннотация. Баренцево море – один из ключевых районов Арктики, где современные климатические изменения проявляются наиболее ярко. Цель исследования – оценка взаимосвязи между сезонными изменениями характеристик ледяного покрова и термохалинных параметров верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в различных районах Баренцева моря. Установлено, что во всех рассмотренных районах вклад таяния льда в уменьшение солености в летний сезон более чем вдвое превышает вклад ледообразования в увеличение солености. Это означает, что поступление льда извне во всех рассмотренных районах значительно превышает локальное ледообразование.

Ключевые слова: изменение климата, соленость перемешанного слоя, температура перемешанного слоя.

ВВЕДЕНИЕ

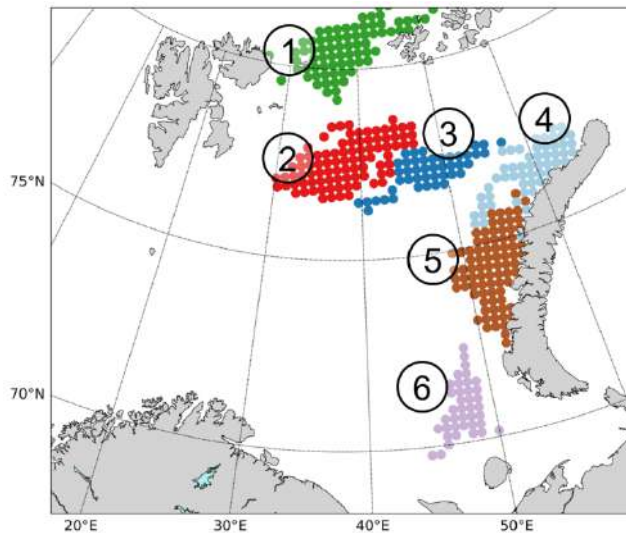
В Баренцевом море (БМ) наблюдается резкое сокращение площади морского льда с начала 2000-х годов, что, в том числе, сказывается на гидрологии моря (Stroeve, Crawford, Stammer, 2016). Одним из параметров, характеризующих изменение ледового режима, является дата полного очищения ото льда (ДПО). В исследовании использованы данные о концентрации (сплоченности) льда. Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости ДПО для акватории Баренцева моря с применением метода кластерного анализа HDBSCAN. Выделено шесть районов (кластеров) с синхронной динамикой ДПО. Согласно полученным результатам, на всей акватории Баренцева моря после 2003 г. наблюдается устойчивое смещение сроков сезонного очищения ото льда на более ранние (Сезонное очищение ото..., 2022), при этом каждому из выделенных районов свойственны свои динамика и скорость изменений ДПО. Для понимания причин и механизмов изменчивости ДПО в этих районах необходимо рассмотреть характеристики перемешанного слоя.

Цель исследования – оценить пространственно-временную изменчивость термохалинных характеристик верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в выделенных районах с синхронной динамикой смещения сроков сезонного очищения ото льда.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы данные о концентрации льда Climate Data Record (CDR) NOAA/NSIDC (NOAA/NSIDC. Climate..., 2017) с 1979 по 2019 г. Исходный массив сформирован на полярной стереографической сетке с горизонтальным разрешением 25×25 км. Временная дискретность составляет 2 дня до июля 1987 г. и 1 день после этой даты. ДПО определяется по данным о концентрации льда. Для установления ДПО по акватории всей Арктики использовали пороговое значение концентрации льда 15 % (Temporal means and..., 2018). ДПО устанавливали как последний день с концентрацией льда 15 % перед минимальной летней концентрацией льда. После этой даты продолжительность периода с концентрацией льда менее 15 % должна быть наибольшей. Выполнен кластерный анализ рядов ДПО в каждом узле сетки методом HDBSCAN – алгоритмом кластерного анализа, являющимся расширением DBSCAN (A density-based..., 1996). В данном методе группировки необходимо задать единственный параметр – минимальное количество соседних объектов (minPts) (в нашем случае узлов сетки), необходимое для объединения объектов в кластер. Предлагается выбирать minPts в зависимости от целей анализа. Руководствуясь этой рекомендацией и необходимостью выделения географических районов с относительно синхронной изменчивостью ДПО, мы выполнили группировку с разными значениями minPts (от 10 до 60) и выбрали вариант (рис. 1), максимально отражающий географические особенности акватории (minPts = 25) (Сезонное очищение ото..., 2022).

Нижняя граница ВКС, как правило, отождествляется с глубиной устойчивого возрастания градиента потенциальной плотности. В исследовании это значение было задано равным $0,0025 \text{ кг/м}^3$. Результаты осреднялись в пределах одного района, анализировалась временная изменчивость средних по району величин и базовые статистики. Данные о температуре и солености воды взяты из системы глобального океанского реанализа GLORYS12v1 (Ocean Physics Reanalysis, 2021) с пространственным разрешением $1/12^\circ$. Ядром системы реанализа служит модельный комплекс NEMO v.3.2 (NEMO. Community Ocean..., 2021).



**Рис. 1. Районы с синхронной изменчивостью ДПО
(Сезонное очищение ото..., 2022)**

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значительное смещение ДПО на более ранние сроки выявлено для района юго-западного шельфа архипелага Новая Земля, где существенно возросла амплитуда межгодовых колебаний ДПО, причем после 2007 г. в отдельные годы этот район был круглогодично безледным, чего ранее не наблюдалось. Освобождение ото льда в среднем начинается в феврале в южной части моря и последовательно продвигается на север, где полное очищение происходит в конце сентября (Сезонное очищение ото..., 2022). Освобождение ото льда в южной части моря наблюдается в апреле-мае, в центральной – с конца мая по конец июня, в северной – во второй половине июля. Самое позднее очищение акватории ото льда – в начале 1980-х и в 1989-90-х годах.

Параметры верхнего квазиоднородного слоя во многом определяют характеристики ледяного покрова в каждом из шести районов. Локальное ледообразование возможно только при достижении температурой ВКС точки замерзания, которая зависит от солености. В то же время ледяной покров, после его нарастания до первых десятков сантиметров, начинает влиять на параметры ВКС, экранируя теплоотдачу в атмосферу и, благодаря этому, уменьшая скорость дальнейшего нарастания льда, осолонения подледного слоя и заглубления ВКС вследствие халинной конвекции. Максимальная толщина ВКС отмечается для районов 1-3 в среднем в феврале-марте, районов 4-6 – в январе. Максимальная глубина в районе 3 – 247 м, при этом максимум толщины ВКС составляет 210 м и достигается в феврале. Максимальная глубина в районе 6 – 102 м, средняя многолетняя толщина ВКС 98 м (максимум приходится на январь), т.е.

конвекция практически достигает дна. Минимальная толщина перемешанного слоя для всех районов зарегистрирована в июне-июле. В самом южном из рассматриваемых районов (район 6) максимальная температура ВКС наблюдается в конце июля-начале августа (7,8 °С). Минимальная температура ВКС в летний период отмечается в районе 1 (0,1 °С). В период выхолаживания поверхности моря максимальная температура ВКС также в самом южном районе 6 (0 °С), минимальная – в районах 1 и 2 (–1,7...–1,9 °С). Минимальная соленость ВКС в районах 1 и 2 наблюдается в середине июля (32,4 и 33,8 ЕПС соответственно), максимальная соленость – в начале апреля (34,5 и 34,6 ЕПС). Сравнивая соленость ВКС в исследуемых районах, можно заключить, что максимальная отмечается в районах 3-5. В период выхолаживания соленость ВКС достигает 34,8 ЕПС, в период нагрева поверхности моря – 34,4 ЕПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сохранении существующих трендов на повышение приземной температуры воздуха можно ожидать дальнейшее возрастание максимальной температуры ВКС в летний сезон, что благоприятствует сохранению тенденции к смещению осеннего ледообразования на более поздние сроки. С другой стороны, более раннее весеннее очищение акватории Баренцева моря от морского льда создает предпосылки для возрастания продолжительности безледного периода, что способствует дополнительному нагреву ВКС, таким образом обеспечивая положительную обратную связь на сезонном масштабе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами / А.А. Сумкина, К.К. Кивва, В.В. Иванов, А.В. Смирнов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2022. – Вып. 15 (1). – С. 82-97. – DOI 10.59887/fpg/1krp-xbuk6gpz.

A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // *In kdd*. – 1996. Vol. 96 (34). – P. 226-231.

NEMO. Community Ocean Model. – URL: www.nemo-ocean.eu (last accessed: 10.02.2021).

NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 3. Boulder, Colorado USA / W.N. Meier [et al.]. –

NSIDC: National Snow and Ice Data Center. – 2017. – DOI 10.7265/N59P2ZTG.

Ocean Physics Reanalysis. – URL: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/INFORMATION (last accessed: 10.02.2021). – DOI 10.48670/moi-00021.

Stroeve, J.C. Using timing of ice retreat to predict timing of fall freeze-up in the Arctic / J.C. Stroeve, A.D. Crawford, S. Stammerjohn // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – Vol. 43 (12). – P. 6332-6340. – DOI 10.1002/2016GL069314.

Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record / G. Peng [et al.] // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10 (9). – P. 1328.

ОЖИДАЕМЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ ПОКОЛЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ПИКШИ И НОРВЕЖСКО-БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО ОКУНЯ-КЛЮВАЧА

А.А. Филин, А.А. Русских, Г.Г. Балякин

Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
г. Мурманск

Аннотация. Представлены результаты анализа литературных данных и материалов Полярного филиала о встречаемости молоди окуня-клювача и пикши в глубоководной части Гренландского моря, за пределами материкового склона арх. Шпицберген. Обсуждена возможность ее выживания на шельфе Восточной Гренландии. Рассмотрено влияние изменения климата на условия дрейфа и выноса молоди за пределы шельфа и материкового склона арх. Шпицберген. На основе сравнительного анализа сделано заключение о возможных последствиях для пополнения популяций норвежско-баренцевоморского окуня-клювача и северо-восточной арктической пикши увеличения выноса их молоди за пределы материкового склона.

Ключевые слова: окунь-клювач *Sebastes mentella*, пикша *Melanogrammus aeglefinus*, пополнение, миграции, сеголетки, смертность, Баренцево море, Гренландское море.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата оказывает большое влияние на условия обитания и воспроизводства промысловых рыб. В последние десятилетия в Баренцевом море наблюдается теплый период, характеризующийся повышенной температурой воды и сокращением ледового покрова (Трофимов, 2021; Voitsov, Karsakov, Trofimov, 2012; Barents Sea ecosystem..., 2012). Потепление не только способствует расширению ареалов и увеличению протяженности сезонных миграций бореальных видов промысловых рыб в Баренцевом море, но и оказывает положительное влияние на выживаемость их молоди, что отражается на динамике запасов (Climate impacts on..., 2011).

Температурные условия в Баренцевом море, предшествовавшие наблюдаемому потеплению, характеризовались последовательным чередованием теплых, умеренных и холодных лет. Смена теплых и холодных периодов отражалась на урожайности поколений трески, пикши и морских окуней. Общей закономерностью были рост пополнения и увеличение запасов этих рыб в теплые периоды и их снижение в холодные. На основе выявленных статистических зависимостей были разработаны

прогностические модели, которые успешно использовали для средне- и долгосрочных прогнозов численности пополнений трески и пикши (Треска Баренцева моря..., 2003; Ковцова, Мухина, Двинина, 1989), однако в условиях долговременного потепления такие модели утратили свою значимость.

Климатические изменения приводят к перестройке механизмов регулирования численности пополнения промысловых рыб. В условиях долговременного потепления смертность молоди трески, пикши и окуня-клювача в период первой зимовки утратила доминирующее значение для формирования урожайности их поколений. Наряду с температурой воды, важнейший фактор, определяющий условия выживания личинок и пелагической молоди донных рыб, – течения, которые в условиях климатических изменений также могут меняться. Баренцево море и прилегающие воды арх. Шпицберген – зона активной циркуляции, где взаимодействуют атлантические и арктические водные массы. Наиболее мощными и устойчивыми течениями являются Нордкапское и Шпицбергенское, которые разделяются на ряд ветвей, достигающих о-вов Новая Земля и Западный Шпицберген. В свою очередь, Западно-Шпицбергенское течение разветвляется в районе 78° с.ш.: одна ветвь уходит в северном направлении, вторая поворачивает к западу, а затем – к югу, образуя циклонический круговорот в Гренландском море (Суховой, 1986; Воды Баренцева моря..., 2016).

Жизненные циклы трески, пикши и морских окуней адаптированы к существующей системе циркуляции вод. Их нерестилища расположены вдоль норвежского шельфа, а выростными районами служат Баренцево море и акватория шельфа в районе арх. Шпицберген, куда их молодь заносится с потоком атлантических вод. Если изменение климата отразится на циркуляции вод в Баренцевом море, то это может привести к нарушению маршрутов дрейфа пелагической молоди донных рыб, что связано с опасностью их заноса в глубоководные районы, где они обречены на гибель в связи с невозможностью перехода к донному образу жизни, или в отдаленные районы, откуда будет невозможна возвратная миграция.

Вероятность и последствия таких сценариев рассмотрены нами на примере двух видов – окуня-клювача *Sebastes mentella* норвежско-баренцевоморской популяции и пикши *Melanogrammus aeglefinus* северо-восточной арктической популяции. Цель работы – обобщение и анализ литературных сведений и материалов, содержащихся в базе данных Полярного филиала, о встречаемости молоди указанных видов в Гренландском море за пределами шельфа арх. Шпицберген, возможности ее выживания в этих условиях и способности участвовать в пополнении численности материнских популяций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали данные о численности и распределении в Медвежинско-Шпицбергенском районе молоди пикши в возрасте до 3 лет и молоди окуня-клювача в возрасте до 5 лет. Значения индексов численности и распределение этих видов на стадии 0-группы (пелагическая молодь) взяты из отчетов совместной российско-норвежской экосистемной съемки в Баренцевом море, которые представлены на официальном сайте Бергенского института морских исследований (IMR). Аналитические оценки численности пикши в возрасте 3 лет и окуня-клювача в возрасте 2 лет получены из отчетов совместной российско-норвежской рабочей группы по арктическому рыболовству (JRN AFWG). Пространственное распределение их донной молоди оценивали по результатам многовидовой тралово-акустической съемки ПИНРО, которую до 2018 г. ежегодно проводили в осенне-зимний период. При анализе межгодовых особенностей распределения молоди в Баренцевом море использовали значения среднегодовой температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» в слое 0-200 м, которые доступны на официальном сайте Полярного филиала.

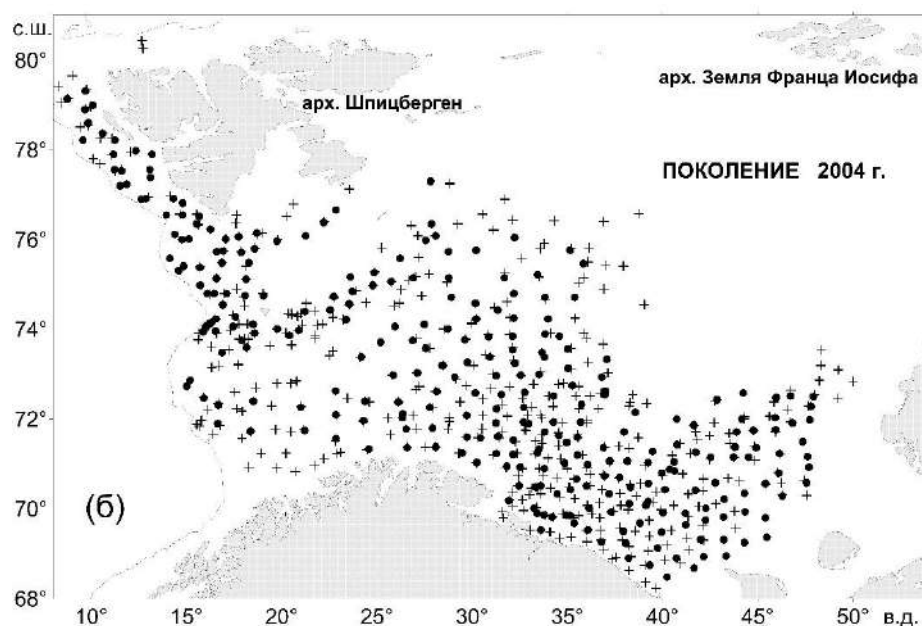
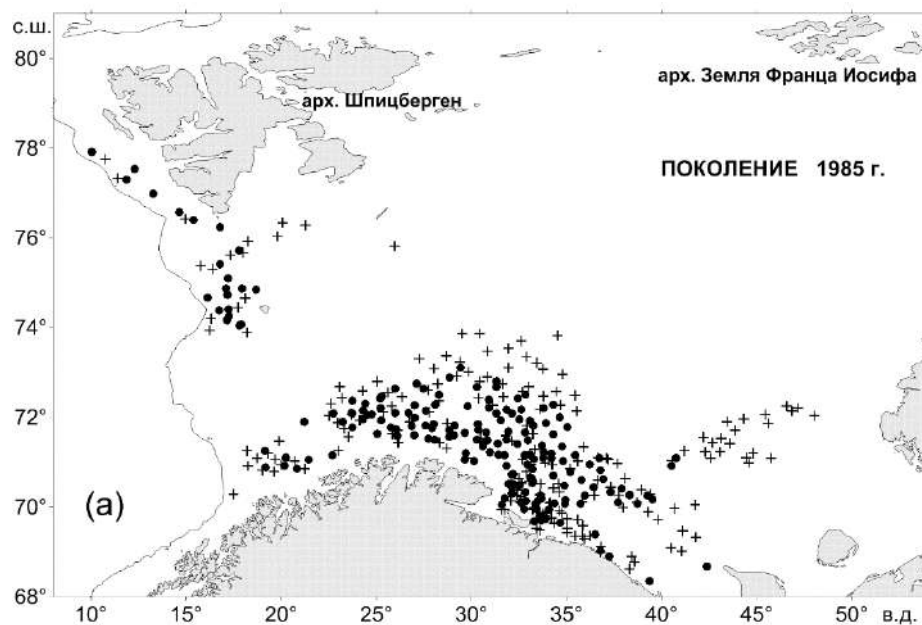
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа данных съемок свидетельствуют о сокращении акватории распределения молоди пикши после ее первой зимовки в большинстве случаев с 1980 по 1997 г. Обусловлено это тем, что в холодные годы часть сеголеток вынуждена зимовать в неблагоприятных температурных условиях, соответствующих местам оседания. В результате повышается смертность на окраинах ареала, что приводит к сокращению акватории их распределения в возрасте двухлеток.

С начала текущего столетия в условиях потепления Баренцева моря не наблюдалось существенных различий в распределении одно- и двухлеток пикши, которые были характерны для холодных лет прошлого века. Независимо от урожайности поколений двухлетки всегда распределяются на обширной акватории, охватывая как юго-восточную часть Баренцева моря, так и Медвежинско-Шпицбергенский район. Примером может служить распределение молоди пикши поколений 1985 и 2004 гг. до и после первой зимовки, представленное на рисунке.

Высокая встречаемость сеголеток и двухлеток пикши на западной периферии ареала, вдоль свала больших глубин, предопределяет вероятность их частичного заноса на глубоководные участки, недоступные для обитания данного вида. Подтверждением этому служат сообщения норвежских исследователей (High latitude epipelagic..., 2017). По их данным,

сеголетки пикши встречаются в районе к западу и северо-западу от арх. Шпицберген над глубинами свыше 800 м. Г. Сэтерсдал (Saetersdal, 1962) сообщает о больших скоплениях молоди пикши, дрейфующей в отдельные годы поздней осенью над большими глубинами Норвежского моря.



Типичное распределение молоди северо-восточной арктической пикши одного поколения до и после первой зимовки в холодные (а) и теплые (б) годы. Крестиками указана встречаемость в уловах сеголеток (возраст 0+), кружками – двухлеток (возраст 1+) (по данным съемок ПИНРО). Линией обозначено положение изобаты 800 м (Филин, Русских, 2019)

В отношении окуня-клювача имеются прямые свидетельства дрейфа его пелагической молоди к северо-восточному побережью Гренландии через пролив Фрама. О.В. Карамушко и Й.Ш. Христиансен (2021), основываясь на данных норвежских экспедиционных исследований ихтиофауны фьордов, прибрежных вод и прилегающего шельфа Восточной Гренландии, собранных в 2002-2017 гг., пришли к выводу, что область распространения сеголеток норвежско-баренцевоморского окуня-клювача не ограничивается европейским шельфом, а простирается гораздо дальше к западу, достигая гренландского шельфа. По мнению этих авторов, часть молоди окуня-клювача, оседающая на склонах Восточной Гренландии, впоследствии может попадать в море Ирмингера, а часть – возвращаться на шельф и континентальные склоны Норвежского и Баренцева морей. В связи с отсутствием доказательств таких миграций вопрос об участии молоди окуня-клювача с северо-восточных склонов Гренландии в пополнении численности норвежско-баренцевоморской популяции остается открытым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Северо-восточная арктическая пикша и норвежско-баренцевоморский окунь-клювач характеризуются как общими, так и отличительными эколого-биологическими особенностями, что предопределяет для них сходство и различие ожидаемых последствий в случае усиления дрейфа их молоди за пределы шельфа арх. Шпицберген. Оба вида относятся к бореальным рыбам, распределение которых связано с атлантическими водами. Они могут обитать как у дна, так и в толще воды, однако у окуня-клювача способность к пелагическому образу жизни выражена в большей степени. Основные нерестилища у них расположены вдоль шельфа и материкового склона Норвегии, у пикши от – 62 до 70° с.ш., у окуня-клювача – от 64 до 74° с.ш. (Russkikh, Dingsør, 2011; Monitoring beaked redfish..., 2013).

Сроки размножения рассматриваемых видов в Норвежском море близки между собой. Вымет икры у пикши происходит в марте-июне, а вымет предличинок у окуня-клювача – в феврале-мае (Барсуков, Шестова, Мухина, 1986; Russkikh, Dingsør, 2011). С нерестилищ личинки и пелагическая молодь заносятся в Баренцево море и Медвежинско-Шпицбергенский район. У окуня-клювача, в отличие от пикши, большая доля личинок и пелагической молоди дрейфует на север по Шпицбергенской ветви теплого течения, чем на восток с Нордкапским течением (Барсуков, Шестова, Мухина, 1986). В Баренцевом море районы распределения молоди рассматриваемых видов разобщены, молодь пикши держится в мелководной южной части Баренцева моря, а молодь окуня-

клювача – в более глубоководной центральной и северной частях моря, однако на западных склонах о-вов арх. Шпицберген их пространственное распределение совпадает. Первые месяцы жизни сеголетки проводят в пелагиали, а в осенне-зимний период оседают и переходят к придонному образу жизни (Берестовский, Мухина, 1986; Drevetnyak, Nedreaas, Planque, 2011; Changes in the..., 2013). Возвратные миграции в район обитания взрослых особей молодь пикши совершает с 3-летнего возраста, а окуня-клювача – в возрасте 5-7 лет (Барсуков, Шестова, Мухина, 1986; Cod, haddock, saithe..., 2010).

Основываясь на эколого-биологических особенностях окуня-клювача и пикши, их способности переносить низкие температуры и образовывать пелагические группировки, следует ожидать, что занос пелагической молоди в глубоководную часть Гренландского моря и далее на шельф Восточной Гренландии будет иметь различные последствия для их выживания, а также для репродуктивного потенциала этих видов. Усиление дрейфа молоди окуня-клювача за пределы шельфа арх. Шпицберген приведет к расширению его ареала и формированию новых выростных районов, в частности на шельфе Северо-Восточной Гренландии, откуда молодь окуня-клювача с возрастом будет мигрировать в районы обитания взрослых рыб. Возвратные миграции молоди пикши с северо-восточного шельфа Гренландии вряд ли возможны, этот район может стать для нее лишь зоной стерильного выселения, поэтому увеличение выноса молоди пикши за пределы материкового склона арх. Шпицберген, даже при условии ее выживания, будет оказывать негативное влияние на численность пополнения ее северо-восточной арктической популяции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Барсуков, В.В. Морские окуни рода *Sebastes* / В.В. Барсуков, Л.М. Шестова, Н.В. Мухина // Ихтиофауна и условия ее существования в Баренцевом море. – Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, ММБИ. – 1986. – С. 48-55.

Берестовский, Е.Г. Пикша *Melanogrammus aeglefinus* (L.) / Е.Г. Берестовский, Н.В. Мухина // Ихтиофауна и условия ее существования в Баренцевом море. – Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, ММБИ. – 1986. – С. 32-34.

Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В.К. Ожигин, В.А. Ившин, А.Г. Трофимов [и др.]. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2016. – 260 с.

Карамушко, О.В. Новые данные о распространении окуня-клювача *Sebastes mentella* (Sebastidae) в Гренландском море / О.В. Карамушко, Й.Ш. Христиансен // *Вопр. ихтиологии.* – 2021. – Т. 61, № 1. – С. 52-58.

Ковцова, М.В. Воздействие океанологических и биологических факторов на выживаемость аркто-норвежской пикши в период раннего онтогенеза / М.В. Ковцова, Н.В. Мухина, Е.А. Двинина // *Вопросы промысловой океанологии Северного бассейна: сб. науч. ст. / ПИНРО.* – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1989. – С. 126-138.

Треска Баренцева моря: биология и промысел / В.Д. Бойцов, Н.И. Лебедь, В.П. Пономаренко [и др.] – Изд. 2-е. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. – 296 с.

Суховой, В.Ф. Моря Мирового океана / В.Ф. Суховой. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 288 с.

Трофимов, А.Г. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря / А.Г. Трофимов // *Труды ВНИРО.* – 2021. – Т. 186, № 4. – С. 101-118.

Филин, А.А. Особенности формирования численности поколений северо-восточной арктической пикши *Melanogrammus aeglefinus* в условиях потепления Баренцева моря / А.А. Филин, А.А. Русских // *Вопросы ихтиологии.* – 2019. – Т. 59, № 2. – С. 195-203.

Barents Sea ecosystem state 1970-2009: climate fluctuations, human impact and trophic interactions / E. Johannesen, R. Ingvaldsen, P. Dalpadado [et al.] // *ICES J. Marine. Sci.* – 2012. – Vol. 69. – P. 880-889.

Boitsov, V.D. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000-2009 / V.D. Boitsov, A.L. Karsakov, A.G. Trofimov // *ICES. – J. Marine Sci.* – 2012. – Vol. 69. – P. 833-840.

Changes in the relationship between sea temperature and recruitment of cod, haddock and herring in the Barents Sea / B. Bogstad, G.E. Dingsør, R. Ingvaldsen [et al.] // *Marine Biology Research.* – 2013. – Vol. 9, № 9. – P. 895-907.

Cod, haddock, saithe, herring and capelin in the Barents Sea and adjacent waters: a review of the biological value of the area / E. Olsen, S. Aanes, S. Mehl [et al.] // *ICES J. Marine Sci.* – 2010. – Vol. 67, № 1. – P. 87-101.

Climate impacts on the Barents Sea ecosystem / K. Drinkwater, H. Loeng, O.V. Titov, V.D. Boitsov // *The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation.* – Trondheim: Tapir Academic Press, 2011. – P. 777-809.

Drevetnyak, K.V. Redfish. Chapter 5.7. / K.V. Drevetnyak, K.H. Nedreaas, B. Planque // *The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation.* – Trondheim: Tapir Academic Press, 2011. – P. 292-307.

High latitude epipelagic and mesopelagic scattering layers – a reference for future Arctic ecosystem change / T. Knutsen, P.H. Wiebe, H. Gjøsæter [et al.] // *Front. Mar. Sci.* – 2017. – Vol. 4. – P. 334-355. – DOI 10.3389/fmars.2017.00334.

Monitoring beaked redfish (*Sebastes mentella*) in the North Atlantic, current challenges and future prospects / B. Planque, K. Kristinsson, A. Astakhov, [et al.] // *Aquatic Living Resources.* – 2013. – Vol. 26. – P. 293-306.

Russkikh, A.A. Haddock. Chapter 5.5 / A.A. Russkikh, G.E. Dingsør // *The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation.* – Trondheim: Tapir Academic Press, 2011. – P. 271-280.

Sætarsdal, G. Torsk, Sei og Hyse / G. Sætarsdal // *Havet og våre Fisker / hovedredaktør G. Rollefson.* – Bergen: Eide Forlag, 1962. – Vol. 2. – S. 94-107.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Трофимов А.Г.</i> История океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан».....	5
<i>Александрова А.Г., Жердев П.Е.</i> Мониторинг пленочных нефтяных загрязнений в Кольском заливе.....	16
<i>Алексеев Г.В., Глок Н.И., Харланенкова Н.Е.</i> Данные «Кольского меридиана» – индикатор влияния океана на изменения климата в Арктике.....	21
<i>Артамонова К.В., Лукьянова О.Н., Запотьелько В.С., Гладышев С.В.</i> Межгодовая изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик вод в северной части Атлантического океана.....	29
<i>Боровков А.В., Алдарова Н.В.</i> Гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности, выпуск предупреждений об опасных явлениях на акваториях морей в зоне ответственности ФГБУ «Мурманское УГМС».....	38
<i>Венгер М.П.</i> Вирио- и бактериопланктон на разрезе «Кольский меридиан» Баренцева моря в разные по уровню инсоляции сезоны... ..	43
<i>Гордеева С.М., Новоселова Е.В., Белоненко Т.В., Будянский М.В.</i> Атлантические ворота в Арктику в зеркале «Кольского меридиана».....	53
<i>Губанищев М.А., Педченко А.П., Анциферов М.Ю., Канищев А.А., Двинин М.Ю.</i> Исследование распределения микропластика в Баренцевом море в 2021-2023 гг.	64
<i>Дикаева Д.Р.</i> Распределение полихет на разрезе «Кольский меридиан»..	73
<i>Долгов А.В.</i> Влияние потепления на встречаемость и распределение рыб тепловодных видов в Баренцевом море.....	80
<i>Ившин В.А., Анциферов М.Ю.</i> Классификация полей вертикального распределения температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» с использованием алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта.....	85
<i>Ильина О.В., Коваленко Д.В., Ильинский В.В., Полякова М.С., Поярков А.А.</i> Идентификация бактерий – потенциальных деструкторов пластика из состава обрастаний пластиковых материалов, обнаруженных в прибрежной зоне Баренцева и Белого морей.....	95
<i>Кивва К.К., Сумкина А.А.</i> Проявление бореализации в изменчивости фенологических параметров на примере Баренцева и Берингова морей.....	105
<i>Кровнин А.С., Мельников С.П., Кивва К.К.</i> Пространственно-временные связи численности пополнения тресковых рыб в Североатлантическом бассейне с климатическими показателями.....	114
<i>Манухова Д.А., Ильина О.В., Жданов И.А., Виноградская М.И., Ильинский В.В., Поярков А.А.</i> Микропластик в желудочно-кишечном тракте атлантической трески (<i>Gadus morhua</i>) из прибрежной зоны Баренцева моря.....	124
<i>Марченко С.Л.</i> Влияние изменения климата на состояние запасов горбуши <i>Oncorhynchus gorbuscha</i> и кеты <i>Oncorhynchus keta</i> в водных объектах Чукотского автономного округа.....	134
<i>Марченко Ю.Т., Хайтов В.М., Малавенда С.С., Стрелков П.П.</i> Долговременная динамика обилия мидий <i>Mytilus</i> на Мурмане в условиях меняющегося климата.....	150
<i>Намятов А.А.</i> Климатические изменения температуры, солености и состава вод Баренцева моря за последние 100 лет.....	160

Новиков М.А., Горбачева Е.А. Многолетний мониторинг загрязнения воды и донных отложений на разрезе «Кольский меридиан».....	170
Олейник А.А., Дружкова Е.И., Ларионов В.В., Макаревич П.Р. Влияние современных климатических трендов на состав микропланктона Баренцева моря.....	181
Пастухов И.А., Намятов А.А. Применение параметра $\delta^{18}\text{O}$ в исследованиях морских экосистем на примере Баренцева моря.....	187
Прокопчук И.П., Трофимов А.Г. Зимний зоопланктон на разрезе «Кольский меридиан».....	196
Рогожин В.С., Осадчиев А.А., Коновалова О.П., Шабалин Н.В. Изменчивость и динамика плюма реки Печора в юго-восточной части Баренцева моря на основе натурных и спутниковых данных.....	206
Светочев В.Н., Светочева О.Н. Промысловый потенциал и экология гренландского тюленя беломорской популяции в условиях нестабильной ледовитости Белого моря.....	216
Сентябов Е.В., Трофимов А.Г. Особенности климатических изменений в Северной Атлантике и Западной Арктике на рубеже XX и XXI вв.....	228
Сумкина А.А., Иванов В.В., Кивва К.К. Сезонные изменения характеристик ледяного покрова и термохалинных параметров верхнего квазиоднородного слоя в различных районах Баренцева моря.....	239
Филин А.А., Русских А.А., Балякин Г.Г. Ожидаемые последствия климатических изменений для формирования численности поколений северо-восточной арктической пикши и норвежско-баренцевоморского окуня-клювача.....	244

ЭКОСИСТЕМЫ И КЛИМАТ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

**Материалы всероссийской научно-практической конференции,
посвященной 125-летию векового разреза
«Кольский меридиан»
(г. Мурманск, 27-28 марта 2024 г.)**

Редакторы Е.Н. Кривошеева, Л.Н. Нестерова, Е.Е. Олонцева
Техническое редактирование Е.Н. Кривошеевой, Е.Е. Олонцевой
Обложка О.С. Морозовой

Подписано в печать 17.04.2024 г.

Уч.-изд. л. 17,8.

Усл. печ. л. 14,8.

Формат 60x84/8.

Тираж 25 экз.

Заказ б.

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