



Водные биологические ресурсы

Распределение трески в Баренцевом море в условиях изменяющегося климата

А.Г. Трофимов, Н.А. Ярагина, В.А. Ившин, Ю.А. Ковалев, М.Ю. Анциферов, Е.В. Сентябов

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

E-mail: trofimov@pinro.ru

Целью работы является оценка влияния изменений климата и океанографических условий на распределение запасов трески в Баренцевом море в последние десятилетия.

Материалом исследования послужили океанографические данные, собранные в ходе экспедиций ПИНРО в Баренцево море, и другая доступная информация о его гидрометеорологических условиях за 1981–2021 гг., а также данные о российском вылове трески в Баренцевом море по промысловым операциям донным тралом.

Используемые методы: сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный и регрессионный анализы.

Результаты: дана характеристика современных изменений климата и океанографических условий в Баренцевом море. С начала 1980-х гг. наблюдается происходящее на фоне увеличения штормовой активности потепление, пик которого пришёлся на 2016 г. После этого, несмотря на сохранение всё ещё тёплых и мало-лёдных условий, в Баренцевом море отмечается тенденция на похолодание. На фоне климатических изменений в последние десятилетия треска совершала всё более протяжённые миграции в северном и восточном направлениях, более широко распределяясь в районах нагула. Наиболее информативными предикторами при оценке влияния изменений климата и океанографических условий на распределение запасов трески в Баренцевом море оказались ледовитость Арктики, средняя по площади температура воды на глубине 100 м, площадь атлантических вод в слое 50–100 м и параметры термических фронтальных зон Баренцева моря.

Практическая значимость: полученные результаты позволят лучше понимать процессы, происходящие в экосистеме Баренцева моря, и в дальнейшем будут использованы для прогноза особенностей распределения трески на акватории моря в зависимости от океанографических условий и климатических изменений.

Ключевые слова: Баренцево море, северо-восточная арктическая треска, распределение, центроиды, океанографические условия, изменения климата.

Cod distribution in the Barents Sea under climate changes

Alexander G. Trofimov, Natalia A. Yaragina, Viktor A. Ivshin, Yury A. Kovalev, Mikhail Yu. Antsiferov, Evgeniy V. Sentyabov

Polar Branch of VNIRO («PINRO» named after N.M. Knipovich), 6, Academician Knipovich St., Murmansk, 183038, Russia

The aim of the paper is to assess the impact of climate changes and oceanographic conditions on the distribution of cod stocks in the Barents Sea in recent decades.

The material for the study was oceanographic data obtained during surveys in the Barents Sea by PINRO and other available information on hydrometeorological conditions of the sea in 1981–2021, as well as data on Russian catches of cod in the Barents Sea based on bottom trawl fishing operations.

Methods of descriptive statistics as well as comparative, correlation and regression analyses were applied.

Results: The modern changes in the climate and oceanographic conditions of the Barents Sea are described. Since the early 1980s, the warming has been observed against the background of increasing storm activity, having peaked in 2016. After that, despite still warm and low-ice conditions, there has been a cooling trend in the Barents Sea. Under climate changes in recent decades, cod made increasingly long migrations north and east, spreading more widely in the feeding areas. The most informative predictors in assessing the impact of climate changes and oceanographic conditions on the distribution of cod stocks in the Barents Sea were Arctic ice extent, area-averaged temperature at a depth of 100 m, Atlantic water area in the 50–100 m layer, and parameters of the Barents Sea thermal frontal zones.

Practical significance: The obtained results are useful for a better understanding of the processes occurring in the Barents Sea ecosystem and, in the future, will be used to predict cod distributions in the sea, depending on oceanographic conditions and climate changes.

Keywords: Barents Sea, Northeast Arctic cod, distribution, centroids, oceanographic conditions, climate changes.

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море – шельфовое море Северного Ледовитого океана – играет ключевую роль в водообмене между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном [Ingvaldsen et al., 2004; Maslowski et al., 2004; Boitsov et al., 2012] и является важным рыбохозяйственным водоёмом с высокой биопродуктивностью, которая в значительной степени зависит от океанографических условий, во многом определяемых упомянутым выше водообменом [Ижевский, 1961; Гершанович, Муромцев, 1983; Ожигин и др., 1999; Шевченко, 2000; Loeng, Drinkwater, 2007; Jakobsen, Ozhigin, 2011; Johannesen et al., 2012; Dalpadado et al., 2014; Eriksen et al., 2017]. В последние десятилетия в Баренцевом море и Арктике в целом наблюдаются существенные климатические изменения, проявляющиеся в значительном росте температуры воздушных и водных масс и сокращении площади льдов [Ingvaldsen et al., 2003; Boitsov et al., 2012; Трофимов и др., 2018; González-Pola et al., 2020].

Одним из наиболее важных объектов промысла в Баренцевом море является северо-восточная арктическая (СВА) треска. Её нагульные миграции начинаются в апреле-мае и проходят из районов нереста и зимовки в направлениях на север и восток; окраин ареала она достигает обычно в августе-октябре, рассредоточиваясь в поисках пищи на обширной акватории [Маслов, 1944; Бойцов и др., 1996; Jakobsen, Ozhigin, 2011]. Отечественный траловый промысел трески в это время ведётся в южной части Баренцева моря и Медвежинско-Шпицбергенском районе.

Поскольку местоположение промысла трески смещается от года к году из-за особенностей её распределения, связанных как с изменениями климата, так и с состоянием её запасов, представляется актуальным изучение закономерностей таких смещений, особенностей распределения трески и определяющих их факторов, особенно в условиях современных глобальных изменений климата.

Цель данной работы – оценить влияние изменений климата и океанографических условий на распределение запасов трески в Баренцевом море и прилегающих водах в 1981–2021 гг.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для анализа и оценки влияния изменений климата на распределение запасов СВА трески в Баренцевом море и прилегающих водах использовались следующие параметры окружающей среды за 1981–2021 гг. (среднегодовые значения, если не сказано иного): годовой и зимний индексы Северо-

Атлантического колебания (**NAO**, **wNAO**),¹ индекс Атлантического мультидекадного колебания (**AMO**),² теплосодержание вод Норвежского моря в слое 0–800 м (**HeatNS**),³ количество штормовых дней в целом за год в центральной части Баренцева моря (68–80° с. ш. 30–40° в. д., **Storms**, получено из ФГБУ «Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»), температура воздуха,⁴ осреднённая для западной (70–76° с. ш. 15–35° в. д., **TaW**) и восточной (69–77° с. ш. 35–55° в. д., **TaE**) частей моря, ледовитость Баренцева моря (**IceBS**, получена из ФГБУ «Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды») и Арктики (**IceAO**),⁵ температура поверхности моря (ТПМ),⁶ осреднённая для юго-запада (71–74° с. ш. 20–40° в. д., **SSTSW**) и юго-востока (69–73° с. ш. 42–55° в. д., **SSTSE**) моря, температура воды в слое 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» (ст. 3–7: 70°30'–72°30' с. ш. 33°30' в. д., **TwKS**) [Карсаков и др., 2022], средняя по площади (71–79° с. ш. 25–55° в. д.) температура воды на 100 м в августе–сентябре (**AAT**), площади атлантических (**AW**) и арктических (**ArW**) вод в слое 50–100 м, а также тёплых (**WBW**) и холодных (**CBW**) придонных вод в августе–сентябре (71–79° с. ш. 25–55° в. д.). Расчёт площадей вод и средней по площади температуры выполнялся на основе данных по температуре, взятых из океанографической базы данных ПИНРО. В работе также использовались индекс протяжённости термических фронтальных зон в Баренцевом море (73–78° с. ш. 15–43° в. д., **FrontsLI**), средний градиент температуры в них (**Gradient**) и их географические центроиды (широта – **LatC**, долгота – **LonC**, с градиентами температуры в качестве весовых коэффициентов) на 50 м в августе–сентябре [Ившин и др., 2020]. Климатический индекс (**CI**) Баренцева моря рассчитывался как среднее значение нормированных аномалий температуры воды и воздуха, а также свободной ото льда площади моря [Трофимов и др., 2018].

¹ Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) index (PC-based). NCAR. 21.03.2022. Accessible via: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based>.

² AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index. NOAA PSL. 21.03.2022. Accessible via: <https://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/>.

³ ICES Report on Ocean Climate (IROC). ICES. 21.03.2022. Accessible via: <https://ocean.ices.dk/core/iroc#>.

⁴ Monthly mean time series from the NCEP Reanalysis Dataset. NOAA PSL. 21.03.2022. Accessible via: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl>.

⁵ Sea Ice Index Daily and Monthly Image Viewer. NSIDC. 21.03.2022. Accessible via: https://nsidc.org/data/seaice_index/data-and-image-archive

⁶ Monthly SST from NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn_SmithOlv2. NOAA. 21.03.2022. Accessible via: http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/NOAA/NCEP/EMC/CMB/GLOBAL/Reyn_SmithOlv2/monthly/sst/.

Динамика промыслового и нерестового запасов СВА трески и её вылова в 1981–2021 гг. рассматривалась по данным Рабочей группы ИКЕС по арктическому рыболовству (AFWG) [ICES, 2021]. Для анализа распределения запасов трески использовались имеющиеся в ПИНРО данные (широта, долгота, улов в тоннах) о её российском вылове за 1981–2021 гг. по промысловым операциям донным тралом на акватории Баренцева моря – всего 3,13 млн записей. Учитывались только траления, в которых треска составляла более 50% улова, и исключались данные научных съёмки и уловы менее 0,2 т/траление, чтобы отсеять научно-исследовательские, незначительные или случайные уловы. В итоге для анализа осталось 2,95 млн записей о промысловых операциях. На основе данных о вылове трески за 1981–2021 гг. рассчитывались индексы распределения её запасов в Баренцевом море, а именно: центры распределения скоплений трески в августе–октябре (когда она распределена наиболее широко) в районах 1, 2 и 4 (рис. 1) (широта центраида – **Lon1, Lon2, Lon4** и долгота центраида – **Lat1, Lat2, Lat4**), доля вылова трески (в процентах) к северу и востоку от сред-

немноголетнего центраида в районах 1 (76°21' с. ш. 26°41' в. д., **Catch1**) и 2 (70°40' с. ш. 43°19' в. д., **Catch2**) от общего вылова в этих районах в августе–октябре, а также доля вылова трески (в процентах) к северу от среднемноголетнего центраида в районе 4 (76°38' с. ш. 14°31' в. д., **Catch4**) от общего вылова в нём в августе–октябре, площадь (в км²) промысла (распределения) трески в районах 1, 2 и 4 в августе–октябре (**Area1, Area2, Area4**). Поскольку промысел трески в Баренцевом море является крупномасштабным, круглогодичным и нацелен на наиболее полное и эффективное использование сырьевой базы (наиболее плотных устойчивых скоплений трески), мы считаем, что полученные индексы достаточно хорошо отражают распределение и миграции трески в исследуемый период.

Деление Баренцева моря на четыре упомянутые выше района (см. рис. 1) выполнялось экспертно и связано с жизненным циклом и сезонными миграциями трески, которые приурочены к основным течениям: районы 1, 2 и 4 являются преимущественно местами нагула трески, а район 3 – акваторией, где треска зимует и нерестится.

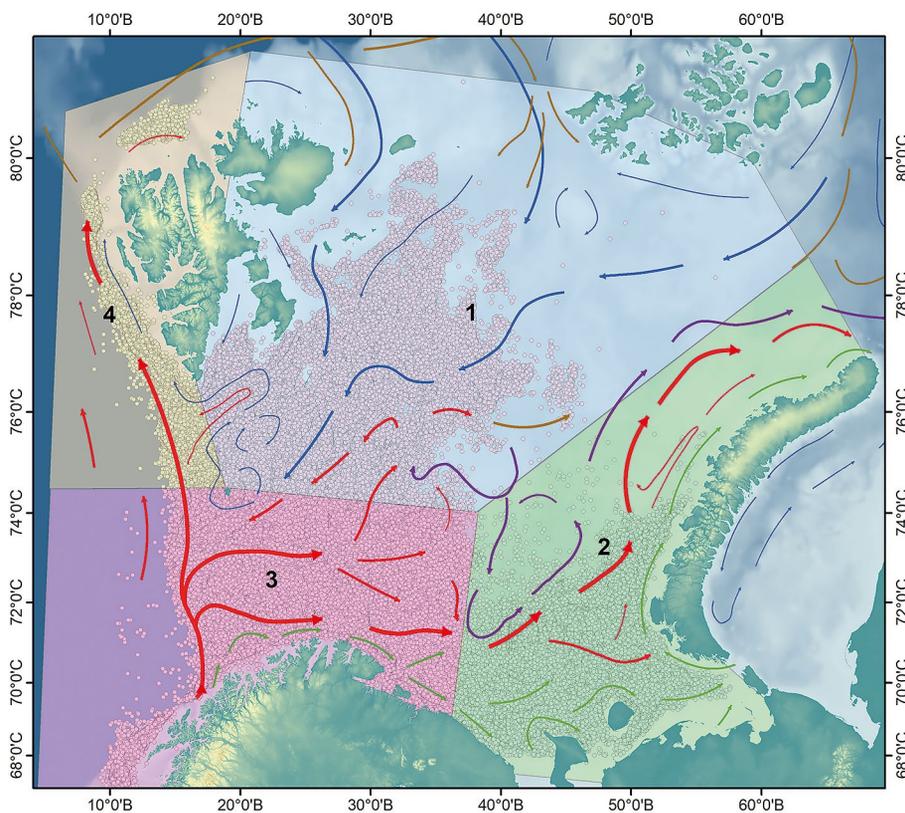


Рис. 1. Суммарное (1981–2021 гг.) распределение промысла СВА трески (кружки) в четырёх районах Баренцева моря и сопредельных вод на фоне схемы течений: красные стрелки – атлантические воды, зелёные – прибрежные, синие – арктические, фиолетовые – холодные донные, коричневые – атлантические трансформированные (по [Ожигин и др., 2016])
Fig. 1. The total (1981–2021) distribution of NEA cod fishery (circles) in four regions of the Barents Sea and adjacent waters against the background of the current scheme: red arrows – Atlantic waters, green arrows – coastal waters, blue arrows – Arctic waters, purple arrows – cold bottom waters, brown arrows – Atlantic modified waters [by Ozhigin et al., 2016]

В настоящей работе использовались сравнительный анализ данных, методы описательной статистики, корреляционный и регрессионный анализы [Елисеева, Юзбашев, 2004]. Статистическая обработка данных и построение графиков выполнялись в программах Microsoft Excel 2016 (надстройка «Анализ данных»), Statistica 13 и геоинформационной программе ArcGis 10.2. Аномалии рассчитывались с использованием среднесноголетних значений за период с 1981 по 2020 гг., а их нормирование выполнялось с помощью стандартного отклонения за тот же период. Расчёт годовых центроидов распределения скоплений трески (т. е. центроидов ежегодных выловов трески в нагульный период) проводился по формулам [Боровков и др., 2014]:

$$\varphi_{cj} = \frac{\sum \varphi_{ij} \times C_{ij}}{\sum C_{ij}}; \quad \lambda_{cj} = \frac{\sum \lambda_{ij} \times C_{ij}}{\sum C_{ij}},$$

где φ_{cj} и λ_{cj} – широта и долгота центроида для j -го года, φ_{ij} и λ_{ij} – широта и долгота i -го траления в j -ом году, C_{ij} – вылов трески в i -ом тралении в j -ом году (в августе–октябре). Для получения пентадных центроидов φ_{cj} и λ_{cj} среднялись за пять лет, а для получения среднесноголетних центроидов – за весь рассматриваемый период.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменчивость климатических параметров

С начала 1980-х гг. в Баренцевом море наблюдается потепление, происходящее на фоне увеличения штормовой активности (рис. 2). В 1981–2016 гг. среднегодовая температура воздуха увеличивалась на 0,05 и 0,10 °C в год на западе и востоке моря соответственно, среднегодовая ТПМ и температура атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» – на

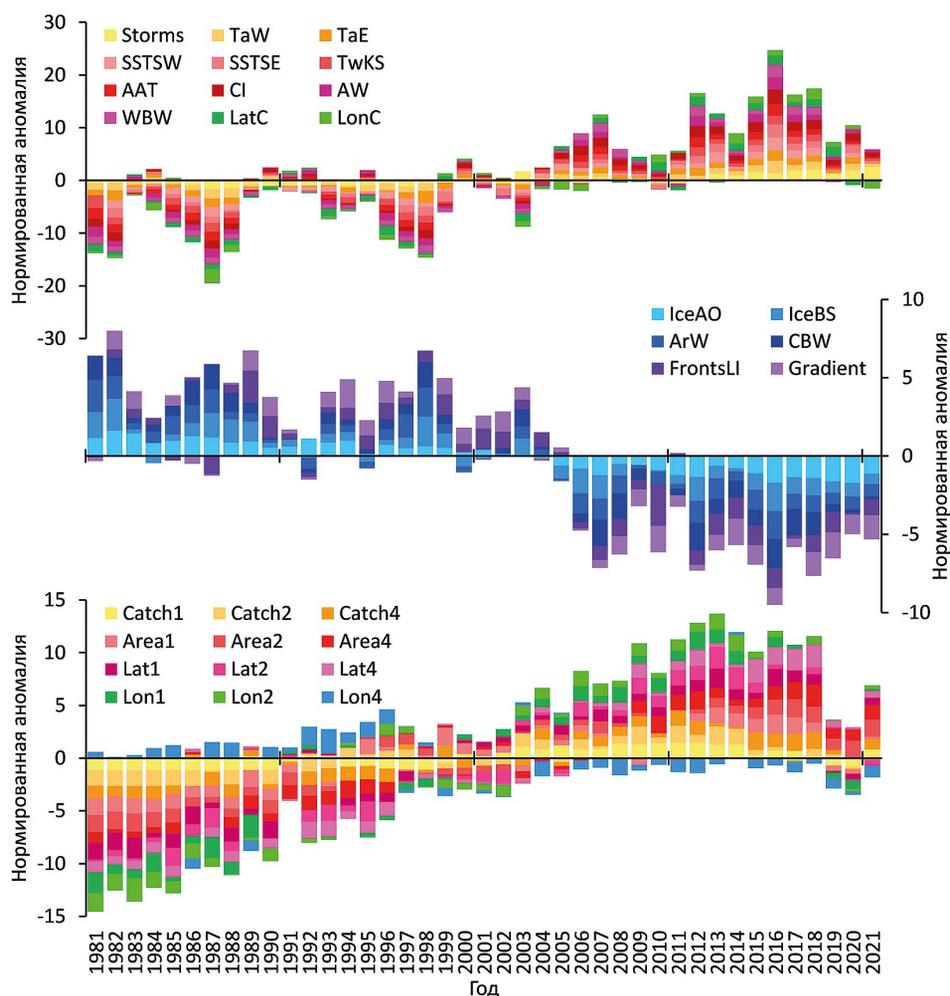


Рис. 2. Нормированные аномалии климатических параметров и индексов распределения трески в 1981–2021 гг. (обозначения приведены в разделе «Материал и методика»)

Fig. 2. Normalized anomalies of climatic parameters and cod distribution indices in 1981–2021 (denotations are given in the Material and Methods section)

0,04 °C в год, площадь атлантических вод в августе–сентябре – на 4,0 тыс. км² в год, тогда как площадь арктических вод в августе–сентябре сокращалась на 6,9 тыс. км² в год, а среднегодовая ледовитость Баренцева моря – на 0,6% в год. В 2000-е гг. произошло резкое сокращение протяжённости и уменьшение обострённости (средний градиент температуры) термических фронтальных зон, в 2010 г. эти показатели достигли рекордно низких значений. Несмотря на квазистационарный характер положения термических фронтальных зон Баренцева моря, их среднедекадные центроиды сместились на 86 км в северо-восточном направлении с 1980-х по 2010-е гг.

Пик потепления в Баренцевом море пришёлся на 2016 г., когда рекордно высоких значений достигли среднегодовая температура воздуха на западе (3,3 °C при норме 1,5 °C) и востоке (1,1 °C при норме –2,0 °C) моря, среднегодовая ТПМ на западе (6,6 °C при норме 5,3 °C) и востоке (4,8 °C при норме 2,9 °C) моря, среднегодовая температура атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» (в 2016 г. 5,32 °C, а в 2012 г. 5,36 °C при норме 4,40 °C), площадь атлантических вод в августе–сентябре (402 тыс. км² при норме 255 тыс. км²). При этом в 2016 г. площадь арктических вод в августе–сентябре и среднегодовая ледовитость в Баренцевом море достигли рекордно низких значений (соответственно 91 тыс. км² при норме 258 тыс. км² и 14,5% при норме 31,3%).

После 2016 г. в Баренцевом море, несмотря на сохранение всё ещё тёплых и малоледных условий, наблюдается тенденция на похолодание: температура воздушных и водных масс понижается, площадь атлантических вод сокращается, тогда как ледовитость моря и площади арктических и холодных придонных вод, наоборот, растут (см. рис. 2). При этом штормовая активность в последние годы остаётся на высоком уровне (от 142 до 172 штормовых дней в год при норме 113 дней), а протяжённость термических фронтальных зон и средний градиент температуры в них – на низком уровне.

Согласно климатическому индексу Баренцева моря, устойчивый тёплый период начался с 2000 г. Период с 2005 г. характеризовался самыми высокими температурами и штормовой активностью, наибольшими площадями тёплых вод и самым северным положением центроида термических фронтальных зон, тогда как сами фронтальные зоны были ослабленными, а ледовитость моря и площади холодных вод были наименьшими за всю историю наблюдений. При этом 1981, 1982, 1987 и 1998 гг. были аномально холодными, а 2006, 2007, 2012, 2013, 2015–2018

и 2020 гг. – аномально тёплыми с рекордно тёплыми условиями в 2016 г.

Изменчивость состояния запасов и распределения трески

На фоне изменений климата в последние десятилетия происходили колебания биомассы запаса СВА трески, связанные с появлением поколений различной урожайности и изменением пресса промысла, а также распределения трески (см. рис. 2). В 1980-е гг. как промысловый (0,7–0,8 млн т в 1982–1984 гг.), так и нерестовый (0,1–0,3 млн т в 1981–1990 гг.) запасы находились на низком уровне (рис. 3). Появление одного богатого поколения 1983 г. на фоне высокой интенсивности промысла (промысловая смертность $F = 0,8–0,9$) не привело к улучшению ситуации. Отечественный вылов трески в 1983–1984 гг. упал до 22–23 тыс. т. В конце 1980-х – начале 1990-х гг., признав ситуацию критической, Смешанная российско-норвежская комиссия по рыболовству существенно снизила величину общего допустимого улова, а F снизилась до 0,4–0,6. После чего, с появлением богатого поколения 1990 г. начался рост запаса, который достиг локального максимума в 1993–1994 гг. Однако, начиная с 1994 г. промысловая смертность вновь превысила значение критического ориентира, определяемого в рамках предосторожного подхода – $F_{lim} = 0,74$, и оставалась крайне высокой до начала 2000-х гг. В первой половине 2000-х гг. состояние запаса оценивалось около 1,2–1,7 млн т; с появлением двух богатых поколений 2004–2005 гг. и одновременным вступлением в действие Правила регулирования промысла (с 2003 г.), более строго и формализовано ограничивающего уровни эксплуатации (установлена целевая смертность $F = 0,4$), рост запаса заметно ускорился. Величина промыслового запаса к 2010 г. составила 3,3 млн т, что выше среднемноголетнего уровня (2,2 млн т за 1946–2020 гг.). Рост промыслового запаса трески достиг пика в 2012–2013 гг. (3,7 млн т). Однако далее началось постепенное снижение биомассы трески, и в 2021 г. промысловый запас составил 2,1 млн т.

Максимально удалёнными на север местами промысла трески в исследованные годы были: в районе 1–80°03' с. ш., в районе 2–75°36' с. ш. и в районе 4–81°01' с. ш., а наиболее удалёнными на восток местами промысла были: в районе 1–56°29' в. д., в районе 2–51°19' в. д. и в районе 4–18°41' в. д. Сезонная динамика площади промысла была примерно похожей во всех районах нагула: площадь уменьшалась в январе–мае и увеличивалась в июне–ноябре (рис. 4). Увеличение площади промысла в районе 4

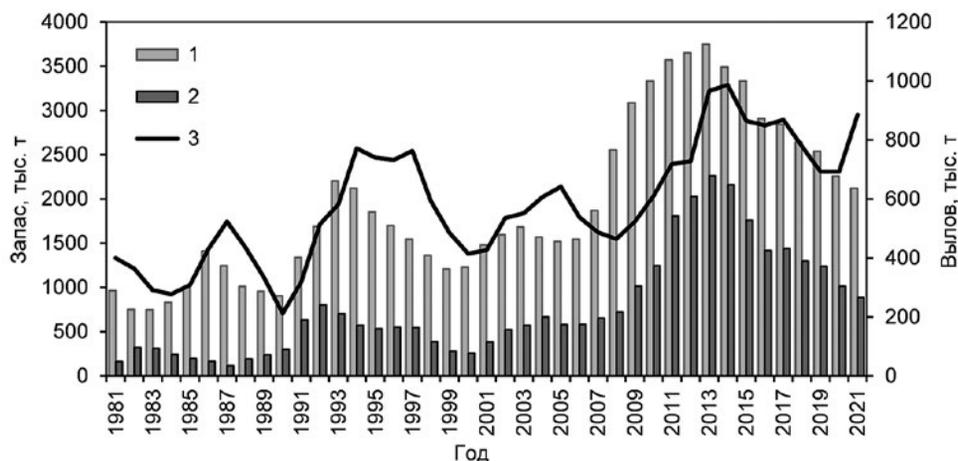


Рис. 3. Промысловый (1), нерестовый (2) запасы и общий вылов (3) СВА трески в 1981–2021 гг. (данные AFWG [ICES, 2021])
Fig. 3. Commercial (1), spawning (2) stocks and total catch (3) of NEA cod in 1981–2021 (data from AFWG [ICES, 2021])

во второй половине года было не столь значительным по амплитуде, как в двух других районах нагула (1 и 2), что, по-видимому, связано с ограниченной здесь областью шельфа, где ведётся промысел. Динамика площади промысла в районе 3 (районы нереста и зимовки) была обратной таковой в районах нагула, что вполне согласуется с сезонным ходом миграций трески [Маслов, 1944; Бойцов и др., 1996; Jakobsen, Ozhigin, 2011].

Площади промысла, а, следовательно, площади распределения запаса трески, во всех четырёх районах демонстрируют значительные колебания по годам (рис. 5). Однако в целом за исследуемый период отмечается тренд на увеличение площади промысла в районах нагула: в районе 1 – в среднем на 840 км² в год, в районе 2 – на 1351 км² в год и в районе 4 – на 710 км² в год. Наиболее значимый тренд отмечен для района 2 ($R^2 = 0,766$). В районах нереста и зимов-

ки (район 3) наблюдался малоинформативный ($R^2 = 0,136$) тренд на снижение площади промысла (отмечавшийся в 1996–2001 гг. значительный пик, причины которого пока не вполне ясны, оказал существенное влияние на снижение значимости и информативности этого отрицательного тренда).

Центроиды площадей промысла трески в районах 1 и 2 в исследованные годы постепенно смещались в северо-восточном направлении, а в районе 4 – в северном направлении (рис. 6–8). Расстояние между двумя наиболее удалёнными друг от друга центроидами в районе 1 составило 230 мор. миль (1981 и 2013 гг.), в районе 2 – 186 мор. миль (1983 и 2013 гг.), в районе 4 – 285 мор. миль (1996 и 2015 гг.). Пентадные центроиды ещё более наглядно показывают смещение промысла в районе 1 от самого южного и западного в 1981–1985 гг. к самому восточному в 2006–2010 гг. и самому северному в 2011–2015 гг.

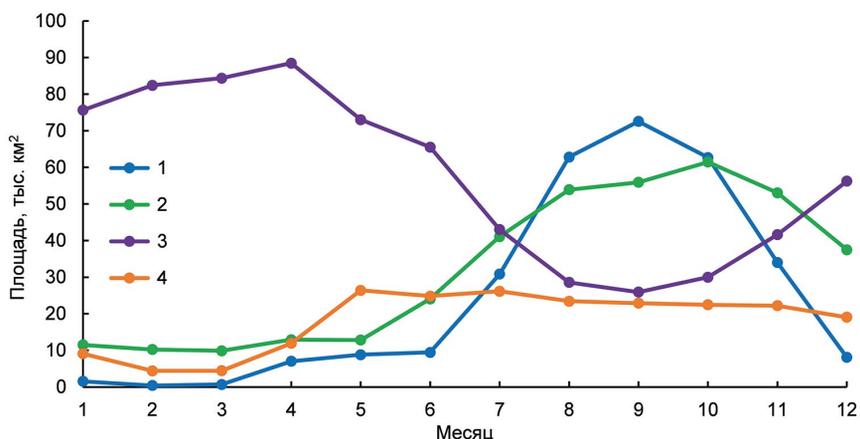


Рис. 4. Среднегодовой (1981–2021 гг.) сезонный ход площадей промысла трески в четырёх районах Баренцева моря и сопредельных вод

Fig. 4. Long-term (1981–2021) mean seasonal cycle of cod fishing areas in four regions of the Barents Sea and adjacent waters

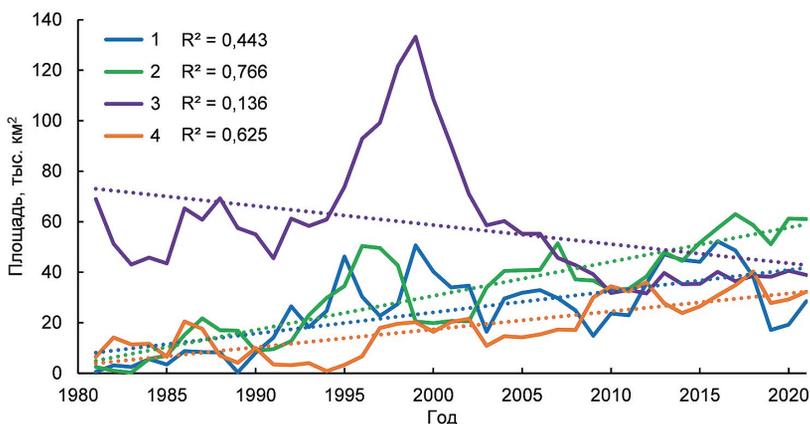


Рис. 5. Среднегодовые площади промысла трески в четырёх районах Баренцева моря и сопредельных вод в 1981–2021 гг. Пунктирными линиями показаны линейные тренды. Все тренды статистически значимы с вероятностью 95%

Fig. 5. Annual mean cod fishing areas in four regions of the Barents Sea and adjacent waters in 1981–2021. Dashed lines show linear trends. All the trends are statistically significant at 95% confidence level

(см. рис. 6). В районе 2 пентадные центроиды сначала сдвигались в восточном направлении от 1981–1985 к 1991–1995 гг., сдвиг в северном направлении в эти годы практически отсутствовал (центроиды занимали положение между 70°01' и 70°14' с. ш.); а к 2011–2015 гг. они переместились к самому северному положению (см. рис. 7). В последнюю пентаду (2016–2020 гг.) произошло смещение центроидов промысла трески в обратном направлении: в районе 1 – пре-

имущественно на запад, в районе 2 – на юго-запад, а в районе 4 – на юг (см. рис. 6–8).

Корреляционный анализ климатических параметров и индексов распределения трески

Результаты корреляционного анализа показали, что параметры окружающей среды в Баренцевом море тесно связаны между собой. Так, на основе выполненного анализа можно заключить, что штормо-

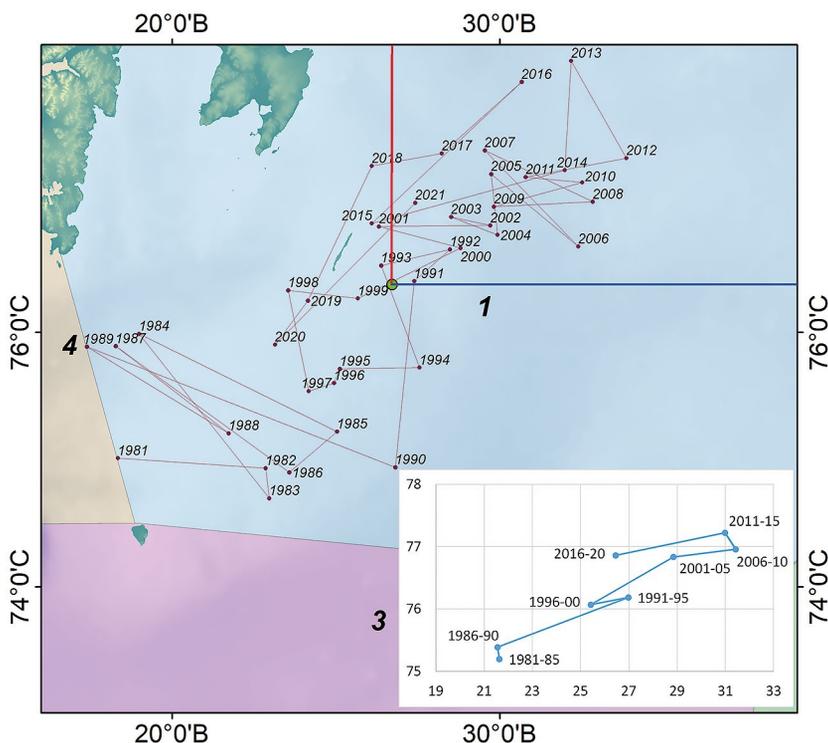


Рис. 6. Годовые, пентадные (на врезке) и среднеголетний (1981–2021 гг., зелёный кружок) центроиды промысла трески в районе 1

Fig. 6. Annual, pentad (inset) and long-term average (1981–2021, green circle) centroids of cod fishery in region 1

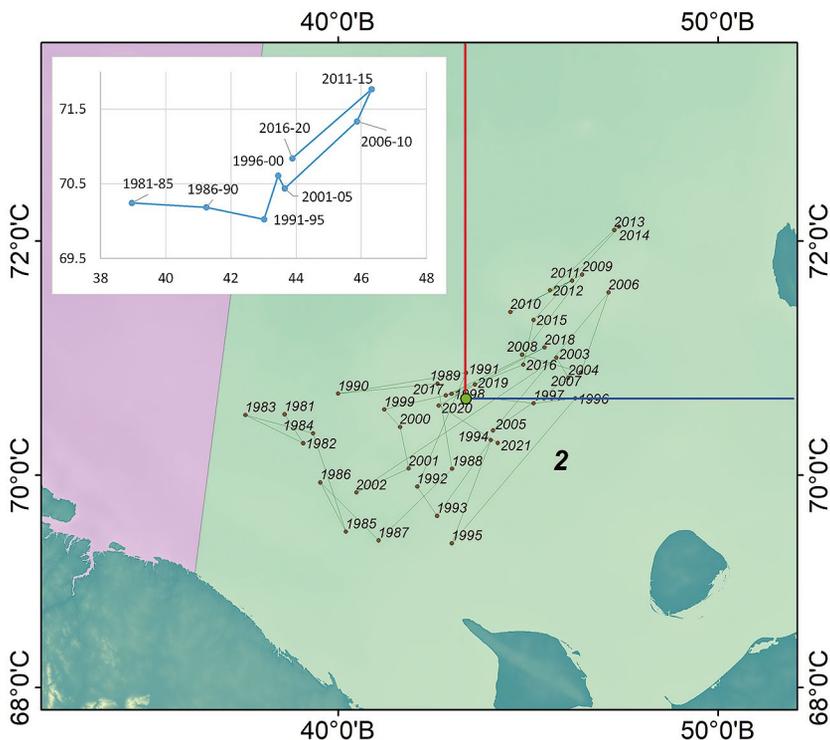


Рис. 7. Годовые, пентадные (на врезке) и среднееголетний (1981–2021 гг., зелёный кружок) центры промысла трески в районе 2

Fig. 7. Annual, pentad (inset) and long-term average (1981–2021, green circle) centroids of cod fishery in region 2

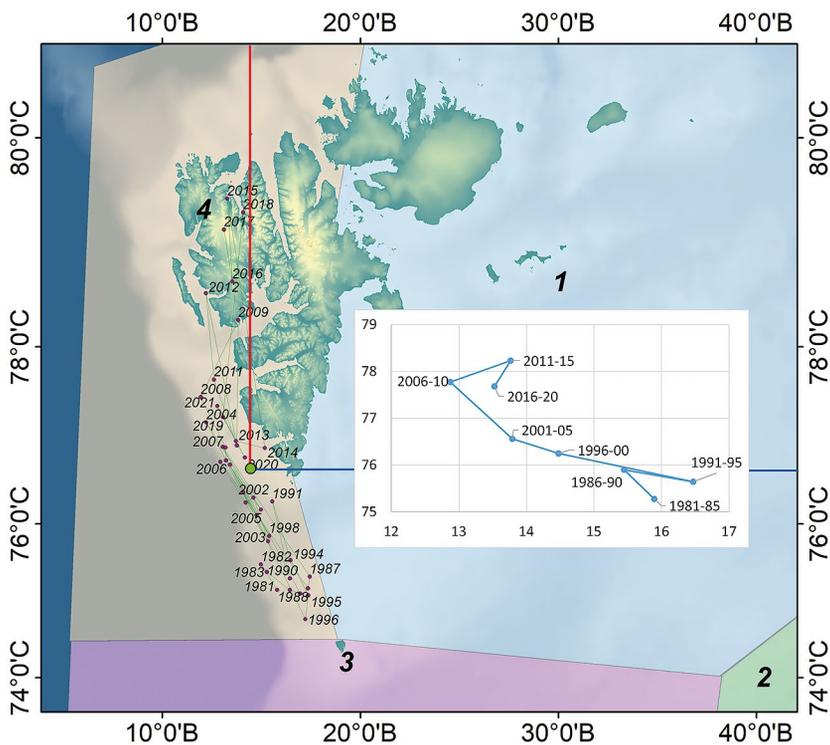


Рис. 8. Годовые, пентадные (на врезке) и среднееголетний (1981–2021 гг., зелёный кружок) центры промысла трески в районе 4

Fig. 8. Annual, pentad (inset) and long-term average (1981–2021, green circle) centroids of cod fishery in region 4

вая активность влияет на температуру воздуха ($r = 0,60-0,62$), которая, в свою очередь, обуславливает ТПМ ($r = 0,89-0,90$) и температуру глубинных вод ($r = 0,84-0,88$), а также ледовитость моря ($r = -0,84...-0,94$) (табл. 1 и 2). ТПМ также влияет на температуру глубинных вод ($r = 0,87-0,88$), и вместе они определяют ледовитость моря ($r = -0,78...-0,89$). От температуры воды зависят площади водных масс ($|r| = 0,92-0,97$), которые обуславливают параметры термических фронтальных зон. Так, чем больше площадь тёплых вод и, соответственно, меньше площадь холодных вод, тем севернее ($|r| = 0,69-0,74$) и восточнее ($|r| = 0,48-0,59$) смещается центроид фронтальных зон. Чем больше площадь холодных вод, тем более обострёнными и протяжёнными будут фронтальные зоны ($r = 0,53-0,55$), а смещение на север центроида фронтальных зон сопровождается их ослаблением ($r = -0,54...-0,58$).

Анализ сопряжённости индексов распределения запасов СВА трески в Баренцевом море выявил, что долготы центроидов в районах 1 и 2 имеют прямую связь ($r = 0,64$), т. е. чем восточнее центр промысла

в районе 1, тем он восточнее и в районе 2 (табл. 3). Связи долгот центроидов в районах 1 и 2 с долготой центроидов в районе 4 слабые (но значимые) и отрицательные ($r = -0,40$ и $-0,38$), что свидетельствует о собственной пространственной динамике промысла в районе 4, связанной с положением этого района в относительно узкой области шельфа между свалом глубин и мелководьями Западного Шпицбергена, в отличие от протяжённых и относительно более однородных по глубине районов 1 и 2.

Широты центроидов в районах 1 и 2, 1 и 4, 2 и 4 также имеют прямую связь ($r = 0,54, 0,62$ и $0,61$ соответственно), т. е. чем севернее центр промысла в районе 1, тем он севернее и в районе 2, а также в районе 4 (см. табл. 3). Связи долготы центроидов в районе 1 с широтами центроидов в районах 1, 2 и 4 оказались прямыми ($r = 0,72, 0,55$ и $0,43$), как и связи долготы центроидов в районе 2 с широтами центроидов в районах 1, 2 и 4 ($r = 0,70, 0,68$ и $0,49$), т. е., смещаясь восточнее, центр промысла вместе с тем сдвигался и севернее. Отличие было отмечено для района 4: связи долготы центроидов в нём с широтами цен-

Таблица 1. Корреляционная матрица климатических параметров
 Table 1. Correlation matrix of climatic parameters

Параметр	NAO	wNAO	AMO	HeatNS	Storms	TaW	TaE	SSTSW	SSTSE	IceBS	IceAO
NAO	1	0,67	-0,36	0,01	0,00	0,27	0,08	0,10	0,19	0,02	0,13
wNAO	0,67	1	-0,16	-0,08	0,01	0,19	0,19	0,11	0,27	-0,11	0,01
AMO	-0,36	-0,16	1	0,52	0,51	0,42	0,41	0,58	0,30	-0,45	-0,74
HeatNS	0,01	-0,08	0,52	1	0,65	0,72	0,63	0,71	0,48	-0,60	-0,74
Storms	0,00	0,01	0,51	0,65	1	0,62	0,60	0,66	0,58	-0,58	-0,73
TaW	0,27	0,19	0,42	0,72	0,62	1	0,88	0,90	0,75	-0,84	-0,77
TaE	0,08	0,19	0,41	0,63	0,60	0,88	1	0,86	0,89	-0,94	-0,81
SSTSW	0,10	0,11	0,58	0,71	0,66	0,90	0,86	1	0,80	-0,81	-0,81
SSTSE	0,19	0,27	0,30	0,48	0,58	0,75	0,89	0,80	1	-0,78	-0,68
IceBS	0,02	-0,11	-0,45	-0,60	-0,58	-0,84	-0,94	-0,81	-0,78	1	0,81
IceAO	0,13	0,01	-0,74	-0,74	-0,73	-0,77	-0,81	-0,81	-0,68	0,81	1
TwKS	0,09	0,19	0,53	0,77	0,57	0,84	0,85	0,88	0,70	-0,85	-0,77
AAT	0,12	0,26	0,50	0,72	0,56	0,85	0,88	0,87	0,76	-0,89	-0,80
ArW	-0,03	-0,13	-0,49	-0,71	-0,57	-0,79	-0,88	-0,82	-0,75	0,90	0,81
AW	0,16	0,33	0,46	0,65	0,55	0,78	0,81	0,82	0,73	-0,84	-0,74
CBW	-0,07	-0,19	-0,43	-0,68	-0,59	-0,82	-0,89	-0,84	-0,74	0,88	0,80
WBW	0,05	0,17	0,45	0,69	0,52	0,80	0,84	0,83	0,70	-0,85	-0,72
LonC	0,14	0,23	0,15	0,45	0,43	0,50	0,47	0,48	0,34	-0,42	-0,49
LatC	-0,13	0,06	0,45	0,60	0,45	0,64	0,58	0,68	0,38	-0,61	-0,65
FrontsLI	0,42	0,28	-0,36	-0,48	-0,46	-0,36	-0,43	-0,41	-0,36	0,48	0,59
Gradient	0,22	0,19	-0,47	-0,55	-0,57	-0,50	-0,51	-0,53	-0,47	0,49	0,72
CI	0,10	0,20	0,48	0,70	0,61	0,92	0,96	0,90	0,82	-0,97	-0,84

Примечание: жирным шрифтом указаны статистически значимые коэффициенты корреляции с вероятностью 95%.

Таблица 2. Корреляционная матрица климатических параметров
Table 2. Correlation matrix of climatic parameters

Параметр	TwKS	AAT	ArW	AW	CBW	WBW	LonC	LatC	FrontsLI	Gradient	CI
NAO	0,09	0,12	-0,03	0,16	-0,07	0,05	0,14	-0,13	0,42	0,22	0,10
wNAO	0,19	0,26	-0,13	0,33	-0,19	0,17	0,23	0,06	0,28	0,19	0,20
AMO	0,53	0,50	-0,49	0,46	-0,43	0,45	0,15	0,45	-0,36	-0,47	0,48
HeatNS	0,77	0,72	-0,71	0,65	-0,68	0,69	0,45	0,60	-0,48	-0,55	0,70
Storms	0,57	0,56	-0,57	0,55	-0,59	0,52	0,43	0,45	-0,46	-0,57	0,61
TaW	0,84	0,85	-0,79	0,78	-0,82	0,80	0,50	0,64	-0,36	-0,50	0,92
TaE	0,85	0,88	-0,88	0,81	-0,89	0,84	0,47	0,58	-0,43	-0,51	0,96
SSTSW	0,88	0,87	-0,82	0,82	-0,84	0,83	0,48	0,68	-0,41	-0,53	0,90
SSTSE	0,70	0,76	-0,75	0,73	-0,74	0,70	0,34	0,38	-0,36	-0,47	0,82
IceBS	-0,85	-0,89	0,90	-0,84	0,88	-0,85	-0,42	-0,61	0,48	0,49	-0,97
IceAO	-0,77	-0,80	0,81	-0,74	0,80	-0,72	-0,49	-0,65	0,59	0,72	-0,84
TwKS	1	0,94	-0,91	0,92	-0,88	0,90	0,51	0,75	-0,39	-0,44	0,92
AAT	0,94	1	-0,96	0,97	-0,93	0,92	0,53	0,73	-0,45	-0,46	0,96
ArW	-0,91	-0,96	1	-0,93	0,91	-0,88	-0,50	-0,69	0,54	0,55	-0,94
AW	0,92	0,97	-0,93	1	-0,88	0,89	0,57	0,74	-0,45	-0,46	0,91
CBW	-0,88	-0,93	0,91	-0,88	1	-0,94	-0,59	-0,72	0,53	0,55	-0,93
WBW	0,90	0,92	-0,88	0,89	-0,94	1	0,48	0,70	-0,51	-0,48	0,91
LonC	0,51	0,53	-0,50	0,57	-0,59	0,48	1	0,61	-0,32	-0,40	0,50
LatC	0,75	0,73	-0,69	0,74	-0,72	0,70	0,61	1	-0,58	-0,54	0,68
FrontsLI	-0,39	-0,45	0,54	-0,45	0,53	-0,51	-0,32	-0,58	1	0,84	-0,46
Gradient	-0,44	-0,46	0,55	-0,46	0,55	-0,48	-0,40	-0,54	0,84	1	-0,51
CI	0,92	0,96	-0,94	0,91	-0,93	0,91	0,50	0,68	-0,46	-0,51	1

Примечание: жирным шрифтом указаны статистически значимые коэффициенты корреляции с вероятностью 95%.

Таблица 3. Корреляционная матрица индексов распределения трески
Table 3. Correlation matrix of cod distribution indices

Параметр	Lon1	Lat1	Lon2	Lat2	Lon4	Lat4	Catch1	Catch2	Catch4	Area1	Area2	Area4
Lon1	1	0,72	0,64	0,55	-0,40	0,43	0,87	0,57	0,48	0,61	0,41	0,40
Lat1	0,72	1	0,70	0,54	-0,46	0,62	0,88	0,63	0,61	0,70	0,63	0,59
Lon2	0,64	0,70	1	0,68	-0,38	0,49	0,68	0,89	0,53	0,53	0,74	0,37
Lat2	0,55	0,54	0,68	1	-0,59	0,61	0,59	0,70	0,61	0,31	0,43	0,53
Lon4	-0,40	-0,46	-0,38	-0,59	1	-0,80	-0,49	-0,44	-0,87	-0,31	-0,46	-0,67
Lat4	0,43	0,62	0,49	0,61	-0,80	1	0,54	0,51	0,93	0,50	0,64	0,82
Catch1	0,87	0,88	0,68	0,59	-0,49	0,54	1	0,61	0,56	0,56	0,46	0,52
Catch2	0,57	0,63	0,89	0,70	-0,44	0,51	0,61	1	0,51	0,48	0,66	0,40
Catch4	0,48	0,61	0,53	0,61	-0,87	0,93	0,56	0,51	1	0,49	0,61	0,76
Area1	0,61	0,70	0,53	0,31	-0,31	0,50	0,56	0,48	0,49	1	0,64	0,45
Area2	0,41	0,63	0,74	0,43	-0,46	0,64	0,46	0,66	0,61	0,64	1	0,62
Area4	0,40	0,59	0,37	0,53	-0,67	0,82	0,52	0,40	0,76	0,45	0,62	1

Примечание: жирным шрифтом указаны статистически значимые коэффициенты корреляции с вероятностью 95%.

троидов в районах 1, 2 и 4 оказались обратными ($r = -0,46, -0,59$ и $-0,80$), свидетельствуя о том, что более северная локализация промысла в районах 1, 2 и 4 соответствовала более западному его смещению в районе 4. Видимо, это связано с уже упомянутой выше особенностью расположения данного района.

Доли вылова трески к северу и востоку от среднелетнего центроида в районах 1 и 2 имели прямую связь ($r = 0,61$), как и доли вылова трески в районах 1 и 2 с долей её вылова к северу от среднелетнего центроида в районе 4 ($r = 0,56$ и $0,51$) (см. табл. 3). Таким образом, они изменялись синхронно. Площади промысла (распределения) трески в районах 1 и 2, 1 и 4, 2 и 4 также имели прямую связь ($r = 0,64, 0,45$ и $0,62$ соответственно).

Долготы центроидов в районах 1 и 2 имели прямую связь с долями вылова трески к северу и востоку от среднелетнего центроида в соответствующих районах ($r = 0,87$ и $0,89$), но в районе 4 связь между долготой и долей вылова к северу от среднелетнего центроида была обратной ($r = -0,87$) (см. табл. 3). Широты центроидов имели положительную связь с долями вылова трески к северу и востоку от среднелетнего центроида в районах 1 ($r = 0,88$) и 2 ($r = 0,70$) и с долей вылова к северу от такового в районе 4 ($r = 0,93$). Аналогичные связи долгот и широт центроидов в районах 1, 2 и 4 отмечены для площадей промысла трески (для долготы $r = 0,61, 0,74$ и $-0,67$, для широты $r = 0,70, 0,43$ и $0,82$). Для района 4 связь долготы центроида и площади промысла была отрицательной, поскольку треска, мигрируя дальше на север и увеличивая площадь своего распространения вдоль побережья архипелага Шпицберген, смещается в западном, а не в восточном направлении, как это происходит в районах 1 и 2, по причине физической невозможности её перемещения на восток в районе 4 из-за расположенной там суши – берегов архипелага Шпицберген.

Доли вылова трески к северу и востоку от среднелетнего центроида (для района 4 – к северу) имели значимую положительную корреляцию с площадями её промысла: для района 1 $r = 0,56$, для района 2 $r = 0,66$ и для района 4 $r = 0,76$ (см. табл. 3).

Анализ связей между индексами распределения трески и климатическими параметрами выявил, что между Северо-Атлантическим колебанием и выбранными индексами связь отсутствовала (табл. 4). Слабая значимая обратная связь ($r = -0,32...-0,54$) отмечалась лишь с лагами 2–8 лет с некоторыми индексами распределения трески (Lat1, Lon2, Lat2, Lon4, Lat4, Catch1, Catch4, Area4). Следует отметить, что долгота центроида в районе 4 (Lon4) имела противоположный

(здесь положительный) знак корреляции ($r = 0,40$ с лагом 2 года) по сравнению с остальными индексами распределения трески, как в этом случае, так и в случае с другими климатическими параметрами. Значимая прямая связь ($r = 0,31-0,76$) индексов распределения трески (обратная только для Lon4, $r = -0,38...-0,55$) найдена с Атлантическим мультидекадным колебанием, теплосодержанием вод Норвежского моря, штормовой активностью, температурой воздуха, ТПМ, температурой атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан», средней по площади температурой на 100 м, площадями атлантических и тёплых придонных вод, широтой и долготой центроидов термических фронтальных зон, а также климатическим индексом Баренцева моря. Тогда как связь индексов распределения трески была значимой и обратной ($r = -0,32...-0,82$) (прямой для Lon4, $r = 0,46-0,62$) с ледовитостью Баренцева моря и Арктики, площадями арктических и холодных придонных вод, а также с протяжённостью и обострённостью термических фронтальных зон (см. табл. 4).

Некоторые климатические параметры показали гораздо более тесную связь с индексами распределения трески при использовании лага, т. е. оказывали наибольшее влияние со сдвигом (с лагом), например, в несколько лет. В табл. 5 представлены наибольшие ($\geq 0,70$) коэффициенты корреляции между климатическими параметрами и индексами распределения трески при рассмотрении различных сдвигов вплоть до 9 лет. Тесная прямая связь обнаружена с Атлантическим мультидекадным колебанием, теплосодержанием вод Норвежского моря, ТПМ на юго-западе Баренцева моря, температурой атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан», средней по площади температурой на 100 м и климатическим индексом Баренцева моря, а тесная обратная связь – с ледовитостью Арктики и площадью холодных придонных вод. При этом лучше всего с климатическими параметрами оказались связаны широта центроидов промысла трески в районах 1 и 4, долгота центроида в районе 2, доли вылова трески к северо-востоку от среднелетнего центроида в районе 1 и к северу от него в районе 4, а также площади промысла трески в районах 2 и 4 (см. табл. 5).

Регрессионный анализ климатических параметров и индексов распределения трески

Для оценки влияния изменений климата и океанографических условий на распределение запасов трески в Баренцевом море были построены уравнения линейной множественной регрессии между индексами распределения трески и климатическими

Таблица 4. Корреляционная матрица индексов распределения трески и климатических параметров
Table 4. Correlation matrix of cod distribution indices and climatic parameters

Параметр	Lon1	Lat1	Lon2	Lat2	Lon4	Lat4	Catch1	Catch2	Catch4	Area1	Area2	Area4
NAO	-0,17	-0,16	-0,17	0,01	-0,02	0,06	-0,21	-0,18	0,06	-0,08	-0,15	-0,20
wNAO	-0,14	-0,12	-0,21	-0,13	0,05	0,04	-0,15	-0,19	0,00	0,01	-0,07	-0,23
AMO	0,44	0,62	0,52	0,43	-0,52	0,53	0,53	0,52	0,54	0,57	0,72	0,61
HeatNS	0,65	0,76	0,56	0,54	-0,52	0,69	0,75	0,48	0,66	0,45	0,53	0,57
Storms	0,32	0,57	0,37	0,37	-0,44	0,62	0,48	0,31	0,53	0,44	0,68	0,63
TaW	0,56	0,67	0,43	0,57	-0,53	0,69	0,59	0,37	0,66	0,54	0,51	0,57
TaE	0,54	0,67	0,48	0,50	-0,47	0,65	0,62	0,38	0,57	0,51	0,54	0,53
SSTSW	0,57	0,73	0,52	0,60	-0,55	0,74	0,63	0,46	0,67	0,64	0,62	0,60
SSTSE	0,29	0,52	0,40	0,39	-0,28	0,54	0,40	0,31	0,40	0,38	0,52	0,40
IceBS	-0,63	-0,67	-0,50	-0,41	0,46	-0,60	-0,62	-0,38	-0,56	-0,60	-0,60	-0,52
IceAO	-0,58	-0,74	-0,65	-0,58	0,62	-0,78	-0,67	-0,58	-0,74	-0,58	-0,82	-0,77
TwKS	0,68	0,73	0,50	0,54	-0,54	0,69	0,71	0,41	0,65	0,60	0,52	0,55
AAT	0,68	0,72	0,55	0,53	-0,50	0,69	0,67	0,46	0,65	0,64	0,57	0,52
ArW	-0,69	-0,72	-0,56	-0,50	0,47	-0,63	-0,69	-0,44	-0,58	-0,63	-0,58	-0,53
AW	0,58	0,60	0,43	0,46	-0,47	0,68	0,55	0,36	0,60	0,58	0,52	0,51
CBW	-0,67	-0,73	-0,56	-0,58	0,52	-0,72	-0,68	-0,47	-0,67	-0,60	-0,59	-0,57
WBW	0,68	0,69	0,49	0,52	-0,49	0,68	0,67	0,37	0,62	0,57	0,50	0,50
LonC	0,34	0,34	0,18	0,39	-0,38	0,57	0,27	0,18	0,52	0,42	0,29	0,48
LatC	0,49	0,61	0,35	0,54	-0,52	0,69	0,51	0,34	0,61	0,52	0,41	0,64
FrontsLI	-0,41	-0,50	-0,40	-0,42	0,27	-0,48	-0,49	-0,33	-0,37	-0,24	-0,45	-0,60
Gradient	-0,32	-0,52	-0,46	-0,53	0,49	-0,65	-0,48	-0,37	-0,59	-0,24	-0,58	-0,73
CI	0,65	0,72	0,52	0,52	-0,51	0,68	0,66	0,42	0,64	0,62	0,59	0,56

Примечание: жирным шрифтом указаны статистически значимые коэффициенты корреляции с вероятностью 95%.

Таблица 5. Наибольшие ($\geq 0,70$) коэффициенты корреляции между климатическими параметрами и индексами распределения трески с различными лагами (в годах), приведёнными в скобках

Table 5. Highest (≥ 0.70) coefficients of correlation between climatic parameters and cod distribution indices with different lags (in years) given in brackets

Параметр	AMO	HeatNS	SSTSW	TwKS	AAT	CI	IceAO	CBW
Lat1	0,70 (4)	0,76 (0)	0,73 (0)	0,73-0,76 (0-1)	0,72-0,75 (0-1)	0,72-0,73 (0-1)	-0,73...-0,74 (0-1)	-0,73 (0)
Lon2	0,73 (8)	-	-	-	-	-	-	-
Lat4	-	-	0,74 (0)	-	-	-	-0,77...-0,78 (0-2, 6)	-0,72 (0)
Catch1	0,75 (5)	0,75 (0)	-	0,71 (0)	-	-	-	-
Catch4	0,71 (1)	-	-	-	-	-	-0,73...-0,74 (0-2)	-
Area2	0,72 (0)	0,78 (4)	0,75 (3-4)	0,73-0,75 (3-5)	0,73-0,77 (3-5)	0,74 (3-4)	-0,79...-0,83 (0-2)	-0,72...-0,75 (3-5)
Area4	-	0,77-0,79 (7-8)	0,73-0,74 (5-7)	-	-	0,71 (6)	-0,83...-0,85 (2, 6-7)	-0,70...-0,71 (3-5)

параметрами. Индексы распределения трески выступали в роли зависимых переменных (предиктантов), а климатические параметры – в роли независимых (предикторов). Для каждого предиктанта был построен набор уравнений, включающих в себя все возможные комбинации предикторов в количестве от одного до шести. Больше шести предикторов в уравнения не включалось, так как считается, что их максимальное количество должно быть в 6–7 раз меньше длины ряда⁷ (в нашем случае она составляет 41).

На рис. 9 на примере района 1 для каждого из рассмотренных индексов распределения трески представлены коэффициенты детерминации (R^2) 30 уравнений регрессии (по пять уравнений с наибольшим R^2 для разного количества входящих в них предикторов – от одного до шести). Как оказалось, оптимальное количество предикторов, которое следует использовать в уравнениях множественной линейной регрессии в нашем случае, составляет от двух до четырёх. Увеличение числа предикторов свыше четырёх мало увеличивает R^2 , т. е. не вносит существенного вклада в объясняемую уравнением регрессии изменчивость зависимой переменной.

Все уравнения регрессии были проанализированы на предмет статистической значимости не только их самих, но и входящих в них коэффициентов при предикторах, а также на предмет актуальности различных климатических переменных для каждого конкретного индекса распределения трески. Принимая во внимание величину R^2 , значимость коэффициентов при предикторах в уравнении регрессии и их количество, для каждой зависимой переменной в итоге было выбрано по одному наилучшему уравнению регрессии (табл. 6). Из табл. 6 видно, что разные индексы распределения трески описываются разными наборами климатических параметров и с разным процентом объяснённых вариаций.

Для района 1 наиболее чувствительными к изменениям климата оказались широта центраида распределения трески (Lat1) и доля её вылова к северо-востоку от среднемноголетнего центраида (Catch1). Коэффициенты детерминации (здесь они выражены в процентах) уравнений регрессии для этих двух параметров составили 72,6 и 69,8% соответственно, т. е. это означает, что используемые в уравнениях климатические предикторы описывают соответственно 72,6 и 69,8% изменчивости биологических предиктантов. Для долготы центраида распределения трески (Lon1) R^2 оказался меньше (62,8%), а для площади её распределения (Area1) – не превысил 50%, т. е. в этом

случае уравнение регрессии объяснило менее половины дисперсии (изменчивости) зависимой переменной. Из климатических параметров в эти четыре уравнения регрессии неоднократно входили средняя по площади температура на 100 м (AAT), площадь атлантических вод (AW) и протяжённость термических фронтальных зон (FrontsLI). Единоразы в них вошли зимний индекс Северо-Атлантического колебания

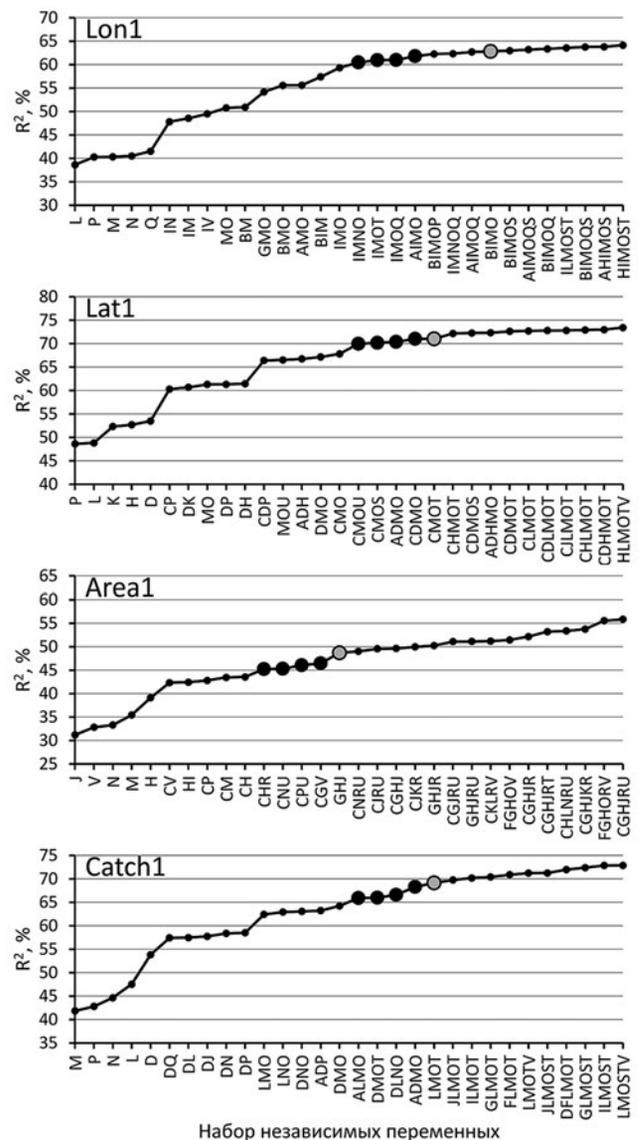


Рис. 9. Коэффициенты детерминации (R^2 , %) уравнений регрессии для индексов распределения трески в районе 1 Баренцева моря. Большими кружками отмечен набор уравнений с одинаковым количеством предикторов, к которому принадлежит лучшее уравнение (серый кружок) (см. табл. 6)

Fig. 9. Coefficients of determination (R^2 , %) of regression equations for cod distribution indices in region 1 of the Barents Sea. Large circles mark the set of equations with the same number of predictors, to which the best equation (grey circle) belongs (see Table 6)

⁷ Касьянов В.А. 2008. Эконометрика: учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург: УПИ. 200 с.

Таблица 6. Обзор лучших регрессионных уравнений (см. рис. 9) для индексов распределения трески в четырёх районах Баренцева моря и сопредельных вод

Table 6. Review of the best regression equations (see Fig. 9) for cod distribution indices in four regions of the Barents Sea and adjacent waters

		Зависимые переменные (индексы распределения трески)															
		Lon1	Lat1	Area1	Catch1	Lon2	Lat2	Area2	Catch2	Lon4	Lat4	Area4	Catch4				
R ² , %		62,8	72,6	48,7	69,8	57,2	49,9	73,2	45,6	45,0	65,2	68,6	61,9				
m		4	4	3	4	4	3	3	4	4	2	3	4				
Независимые переменные (климатические параметры) и их буквенные обозначения	A	NAO															
	B	-															
	C	+															
	D	HeatNS															
	E	Storms															
	F	TaW															
	G				-					-							
	H				+												
	I	-															
	J				-		+										
	K					-				-		+		-			
	L					+											
	M	+		+		+		+				-					
	N	ArW															
	O	-		-		-		-		-							
	P	CBW															
	Q	WBW															
	R	LonC															
S										-		+		+		+	
T			-		-								+				
U										+		-					
V						-		+		-							

Примечание: m – количество независимых переменных в уравнении регрессии; знаки «+» и «-» соответствуют знакам коэффициентов при независимых переменных в уравнении.

(wNAO), индекс Атлантического мультидекадного колебания (AMO), температура воздуха на востоке Баренцева моря (TaE), ТПМ на юго-западе и юго-востоке моря (SSTSW, SSTSE), ледовитость Баренцева моря (IceBS), а также температура атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» (TwKS).

Для района 2 наиболее чувствительной к изменениям климата оказалась площадь распределения трески (Area2), R² составил 73,2%. Для долготы центроида распределения трески (Lon2) R² оказался значительно меньше (57,2%), а для широты центроида (Lat2) и доли вылова трески к северо-востоку от среднеголетнего центроида (Catch2) – не превысил 50%. Из климатических параметров в эти четыре уравнения

регрессии неоднократно входили ледовитость Арктики (IceAO), средняя по площади температура на 100 м (AAT), площадь атлантических вод (AW) и климатический индекс Баренцева моря (CI). По одному разу в них вошли зимний индекс Северо-Атлантического колебания (wNAO), температура воздуха на востоке Баренцева моря (TaE), ТПМ на юго-востоке моря (SSTSE) и ледовитость Баренцева моря (IceBS).

Для района 4 наиболее чувствительными к изменениям климата оказались широта центроида (Lat4) и площадь (Area4) распределения трески, значения R² составили 65,2 и 68,6% соответственно. Для доли вылова трески к северу от среднеголетнего центроида (Catch4) R² оказался меньше (61,9%), а для долготы

центроида распределения трески (Lon4) — не превысил 50%. Из климатических переменных в эти четыре уравнения регрессии всегда входили ледовитость Арктики (IceAO) и широта центроида термических фронтальных зон (LatC), дважды — протяжённость термических фронтальных зон (FrontsLI) и средний градиент температуры в них (Gradient), единожды — средняя по площади температура на 100 м (AAT).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На фоне климатических изменений, проявившихся в значительном потеплении воздушных и водных масс Баренцева моря и сокращении его ледовитости, в последние десятилетия треска совершала всё более протяжённые миграции в северном и восточном направлениях, более широко распределяясь на акватории районов нагула. Увеличение запаса трески, который был наименьшим в начале 1980-х гг. и достиг своего максимума в первой половине 2010-х гг., обусловило расширение площади промысла и, вероятно, повлияло на смещение центроидов распределения трески в северо-восточном направлении. Увеличение численности и биомассы запаса трески, по-видимому, вынуждало рыб совершать всё более протяжённые миграции и распределяться на всё более широкой акватории в поисках скоплений кормовых объектов, чему также способствовало увеличение площади моря с благоприятной для их обитания температурой. Увеличение площади промысла трески сопровождалось ростом доли её вылова к северу и востоку от среднемноголетнего центроида в районах 1 и 2 и к северу от него в районе 4.

В результате регрессионного анализа выявлено, что наиболее информативными предикторами при оценке влияния изменений климата и океанографических условий на распределение запасов трески в Баренцевом море и прилегающих водах оказались ледовитость Арктики, средняя по площади температура воды на глубине 100 м, площадь атлантических вод в слое 50–100 м и параметры термических фронтальных зон Баренцева моря.

Построены уравнения регрессии и оценена сила влияния климатических параметров на индексы распределения трески. Наилучшим образом с помощью набора океанографических предикторов объясняется изменчивость широты центроида распределения трески (72,6% объяснённой дисперсии) и доли её вылова к северо-востоку от среднемноголетнего центроида (69,8%) в районе 1, площади распределения трески (73,2%) в районе 2, широты центроида (65,2%) и площади распределения трески (68,6%) в районе 4.

Результаты выполненных исследований в дальнейшем будут использованы для анализа и прогноза

влияния изменений климата и океанографических условий на распределение запасов тресковых рыб в Баренцевом море.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича).

ЛИТЕРАТУРА

- Бойцов В.Д., Лебедь Н.И., Пономаренко В.П., Пономаренко И.Я., Терещенко В.В., Третьяк В.Л., Шевелев М.С., Ярагина Н.А. 1996. Треска Баренцева моря (биолого-промысловый очерк). Мурманск: Изд-во ПИНРО. 285 с.
- Боровков В.А., Карсаков А.Л., Ярагина Н.А., Анциферов М.Ю., Ившин В.А. 2014. Эффекты современных изменений климата в распределении промысловых скоплений северо-восточной арктической трески в период нагула // Вопросы промысловой океанологии. № 11. С. 61–76.
- Гершанович Д.Е., Муромцев А.М. 1983. Океанологические основы биологической продуктивности Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат. 320 с.
- Елисеева И.И., Юзбашев М.М. 2004. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика. 656 с.
- Ившин В.А., Трофимов А.Г., Титов О.В. 2020. Изменчивость термических фронтальных зон Баренцева моря за период 1960–2018 гг. // Труды ВНИРО. Т. 180. С. 60–71. doi: 10.36038/2307-3497-2020-180-60-71.
- Ижевский Г.К. 1961. Океанологические основы формирования промысловой продуктивности морей. М.: Пищепромиздат. 215 с.
- Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Анциферов М.Ю., Ившин В.А., Губанищев М.А. 2022. 120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан». Мурманск: «ПИНРО» им. Н.М. Книповича. 145 с.
- Маслов Н.А. 1944. Донные рыбы Баренцева моря и их промысел // Труды ПИНРО. Вып. 8. С. 3–186.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. 2016. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 260 с.
- Ожигин В.К., Третьяк В.Л., Ярагина Н.А., Ившин В.А. 1999. Океанографические условия Баренцева моря и их влияние на выживание и развитие молоди северо-восточной арктической трески. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 88 с.
- Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Ившин В.А. 2018. Изменения климата в Баренцевом море на протяжении последнего полувека // Труды ВНИРО. Т. 173. С. 79–91. doi:10.36038/2307-3497-2018-173-79-91.
- Шевченко А.В. 2000. Океанологические условия формирования промысловой продуктивности в морях Северо-Европейского бассейна. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 100 с.

- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833–840. doi:10.1093/icesjms/fss075.
- Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllo S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. 2014. Productivity in the Barents Sea – response to recent climate variability // PLoS ONE. V. 9. № 5. Art. e95273. doi:10.1371/journal.pone.0095273.
- Eriksen E., Skjoldal H.R., Gjøsæter H., Primicerio R. 2017. Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming // Progress in Oceanography. V. 151. P. 206–226. doi:10.1016/j.pocean.2016.12.009.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.). 2020. ICES Report on Ocean Climate 2019 // ICES Cooperative Research Report. № 350. 136 pp. doi:10.17895/ices.pub.7537.
- ICES. 2021. Arctic Fisheries Working Group (AFWG) // ICES Scientific Reports. V. 3. № 58. 817 pp. doi: 10.17895/ices.pub.8196.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Ådlandsvik B. 2003. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s // ICES Marine Science Symposia. V. 219. P. 160–168.
- Ingvaldsen R.B., Asplin L., Loeng H. 2004. The seasonal cycle in the Atlantic transport to the Barents Sea during the years 1997–2001 // Continental Shelf Research. V. 24. № 9. P. 1015–1032. doi:10.1016/j.csr.2004.02.011.
- Jakobsen T., Ozhigin V.K. (Eds.). 2011. The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. Trondheim: Tapir Academic Press. 825 pp.
- Johannesen E., Ingvaldsen R.B., Bogstad B., Dalpadado P., Eriksen E., Gjøsæter H., Knutsen T., Skern-Mauritzen M., Stiansen J.E. 2012. Changes in Barents Sea ecosystem state, 1970–2009: climate fluctuations, human impact, and trophic interactions // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 5. P. 880–889. doi:10.1093/icesjms/fss046.
- Loeng H., Drinkwater K. 2007. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability // Deep-Sea Res. II. V. 54. № 23–26. P. 2478–2500. doi:10.1016/j.dsr2.2007.08.013.
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J.L., Semtner A.J. 2004. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // Journal of Geophysical Research. V. 109. Art. C03032. doi:10.1029/2001JC001039.
- Gershanovich D.E., Muromtsev A.M. 1983. Oceanological bases of biological productivity of the World Ocean. Leningrad: Gydrometeoizdat Press. 320 pp. (In Russ.).
- Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. 2004. General theory of statistics. Moscow: Finansy i Statistika Press. 656 pp. (In Russ.).
- Ivshin V.A., Trofimov A.G., Titov O.V. 2020. Barents Sea thermal frontal zones variability in 1960–2018 // Trudy VNIRO. V. 180. P. 60–71. doi: 10.36038/2307-3497-2020-180-60-71. (In Russ.).
- Izhevsky G.K. 1961. Oceanological bases of forming commercial productivity of the seas. Moscow: Pishchepromizdat Press. 215 pp. (In Russ.).
- Karsakov A.L., Trofimov A.G., Antsiferov M.Yu., Ivshin V.A., Gubanishchev M.A. 2022. 120 years of oceanographic observations along the Kola Section. Murmansk: N.M. Knipovich PINRO Publish. 145 pp. (In Russ.).
- Maslov N.A. 1944. Demersal fishes of the Barents Sea and their fishing // Trudy PINRO. Iss. 8. P. 3–186. (In Russ.).
- Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M.Yu. 2016. The Barents Sea waters: structure, circulation, variability. Murmansk: PINRO Publish. 260 pp. (In Russ.).
- Ozhigin V.K., Tretyak V.L., Yaragina N.A., Ivshin V.A. 1999. The Barents Sea oceanographic conditions and their impact on the survival and development of juvenile Northeast Arctic cod. Murmansk: PINRO Publish. 88 pp. (In Russ.).
- Trofimov A.G., Karsakov A.L., Ivshin V.A. 2018. Climate changes in the Barents Sea over the last half century // Trudy VNIRO. V. 173. P. 79–91. doi:10.36038/2307-3497-2018-173-79-91. (In Russ.).
- Shevchenko A.V. 2000. Oceanological conditions for forming commercial productivity in the seas of the North European basin. Murmansk: PINRO Publish. 100 pp. (In Russ.).
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000–2009 // ICES J. of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833–840. doi:10.1093/icesjms/fss075.
- Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllo S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. 2014. Productivity in the Barents Sea – response to recent climate variability // PLoS ONE. V. 9. № 5. Art. e95273. doi:10.1371/journal.pone.0095273.
- Eriksen E., Skjoldal H.R., Gjøsæter H., Primicerio R. 2017. Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming // Progress in Oceanography. V. 151. P. 206–226. doi:10.1016/j.pocean.2016.12.009.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.). 2020. ICES Report on Ocean Climate 2019 // ICES Cooperative Research Report. № 350. 136 pp. doi:10.17895/ices.pub.7537.
- ICES. 2021. Arctic Fisheries Working Group (AFWG) // ICES Scientific Reports. V. 3. № 58. 817 pp. doi: 10.17895/ices.pub.8196.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Ottersen G., Ådlandsvik B. 2003. Climate variability in the Barents Sea during the 20th century with a focus on the 1990s // ICES Marine Science Symposia. V. 219. P. 160–168.
- Ingvaldsen R.B., Asplin L., Loeng H. 2004. The seasonal cycle in the Atlantic transport to the Barents Sea during the

REFERENCES

- Boitsov V.D., Lebed N.I., Ponomarenko V.P., Ponomarenko I.Ya., Tereshchenko V.V., Tretyak V.L., Shevelev M.S., Yaragina N.A. 1996. The Barents Sea cod (biological and fisheries outline). Murmansk: PINRO Press. 285 pp. (In Russ.).
- Borovkov V.A., Karsakov A.L., Yaragina N.A., Antsiferov M.Yu., Ivshin V.A. 2014. Effects of modern climate changes in the distribution of commercial aggregations of Northeast Arctic cod during the feeding period // Fisheries Oceanology Issues. № 11. P. 61–76. (In Russ.).

- years 1997–2001 // *Continental Shelf Research*. V. 24. № 9. P. 1015–1032. doi:10.1016/j.csr.2004.02.011.
- Jakobsen T., Ozhigin V.K.* (Eds.). 2011. *The Barents Sea: ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation*. Trondheim: Tapir Academic Press. 825 pp.
- Johannesen E., Ingvaldsen R.B., Bogstad B., Dalpadado P., Eriksen E., Gjørseter H., Knutsen T., Skern-Mauritzen M., Stiansen J.E.* 2012. Changes in Barents Sea ecosystem state, 1970–2009: climate fluctuations, human impact, and trophic interactions // *ICES J. of Marine Science*. V. 69. № 5. P. 880–889. doi:10.1093/icesjms/fss046.
- Loeng H., Drinkwater K.* 2007. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability // *Deep-Sea Res. II*. V. 54. № 23–26. P. 2478–2500. doi:10.1016/j.dsr2.2007.08.013.
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J.L., Semtner A.J.* 2004. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // *Journal of Geophysical Research*. V. 109. Art. C03032. doi:10.1029/2001JC001039.

Поступила в редакцию 24.12.2022 г.
Принята после рецензии 21.02.2023 г.