

УДК 551.46.09 (268.45)

Среда обитания водных биологических ресурсов

Влияние показателей климато-океанологических процессов на параметры состояния запаса трески в Баренцевом море и прилегающих водах

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

Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («PINRO» им. Н.М. Книповича), ул. Академика Книповича, 6, Мурманск, 183038, Россия
E-mail: sentyab@pinro.vniro.ru

SPIN-код: А.Г. Трофимов – 6762-9699; Е.В. Сентябов – 7620-8430; Н.А. Ярагина – 9026-3827; Ю.А. Ковалёв – 7984-4910; В.А. Ившин – 3102-7538; М.Ю. Анциферов – 4303-6593

Цель работы: оценка влияния крупномасштабных климато-океанологических процессов на численность пополнения и массу трески в возрасте 3 года в Баренцевом море и прилегающих водах.

Материал: океанологические данные, собранные в ходе экспедиций Полярного филиала ВНИРО, и другая доступная информация о гидрометеорологических условиях Баренцева моря и прилегающих районов, а также данные о биомассе нерестового запаса трески, численности её пополнения и средней массе рыб в возрасте 3 года за 1981-2023 гг.

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

Результаты: выполнен анализ условий формирования запаса северо-восточной арктической трески в Баренцевом море. Для оценки влияния изменений климата на состояние запаса в качестве его параметров выбраны численность пополнения и средняя масса рыб в возрасте 3 года. В качестве климатических факторов использованы зимний индекс Северо-Атлантического колебания, температура атлантических вод на разрезах «Гимсёй» и «Кольский меридиан», средняя по площади Баренцева моря ($71\text{--}79^\circ\text{ с. ш.}, 25\text{--}55^\circ\text{ в. д.}$) температура на горизонте 100 м и индекс протяжённости термических фронтальных зон в Баренцевом море. Для выбранных параметров запаса построены надёжные и адекватные уравнения регрессии, включающие в себя температуру атлантических вод и индекс протяжённости фронтальных зон в Баренцевом море, биомассу нерестового запаса трески и среднюю за два предыдущих года численность её пополнения в возрасте 3 года, которые позволяют составлять прогнозы с заблаговременностью до одного года.

Практическая значимость: полученные результаты позволяют лучше понимать процессы, происходящие в экосистеме Баренцева моря, и будут использованы для оценки влияния изменений климата и океанологических условий на состояние запаса трески в Баренцевом море и для прогноза численности её пополнения и средней массы рыб в возрасте 3 года.

Ключевые слова: Баренцево море, климат, океанологические условия, северо-восточная арктическая треска, нерестовый запас, пополнение, масса рыб.

The influence of climate-oceanological processes on parameters of the state of cod stock in the Barents Sea and adjacent waters

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

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

The aim of the paper is to assess the influence of large-scale climatic and oceanographic processes on recruitment abundance and mean weight of cod at age 3 in the Barents Sea and adjacent waters.

The material for the study was oceanographic data collected by Polar Branch of VNIRO and other available information on the hydrometeorological conditions of the Barents Sea and adjacent areas as well as data on the biomass of the cod spawning stock, the number of its recruits and the mean weight of fish at age 3 for 1981-2023.

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

Results: The analysis of the conditions for forming the Northeast Arctic (NEA) cod stock in the Barents Sea was carried out. To assess the impact of climate changes on state of the stock, the number of recruits and the mean weight of fish at age 3 were chosen as its parameters. The following climatic factors were used: the winter North Atlantic Oscillation index, the Atlantic water temperature in the Gimsøy and Kola sections, the area-averaged temperature in the Barents Sea ($71\text{--}79^\circ\text{ N } 25\text{--}55^\circ\text{ E}$) at 100 m depth, and the length index of thermal frontal zones in the Barents Sea. Reliable and adequate regression equations were constructed for the selected stock parameters, including the temperature of Atlantic waters and the length index of frontal zones

in the Barents Sea, the biomass of spawning cod stock, and the average number of its recruits at age 3 over the previous two years, which allow forecasts to be made with a lead time of up to one year.

Practical significance: The obtained results will allow a better understanding of the processes occurring in the Barents Sea ecosystem, and will be used to assess the impact of climate change and oceanographic conditions on the state of cod stock in the Barents Sea and to forecast its recruitment abundance and mean fish weight at age 3.

Keywords: Barents Sea, climate, oceanographic conditions, Northeast Arctic cod, spawning stock, recruitment, fish weight.

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море имеет очень высокую биологическую продуктивность, которая во многом зависит от условий окружающей среды [Ижевский, 1961; Гершанович, Муромцев, 1983; Шевченко, 2000; Jakobsen, Ozhigin, 2011; Dalpadado et al., 2014]. Северо-восточная арктическая (СВА) треска *Gadus morhua* L., 1758 – один из наиболее ценных объектов промысла в Баренцевом море, который формирует востребованный биологический ресурс, имеющий высокое значение на рынке. Её нагульные миграции начинаются в апреле-мае и проходят из районов нереста у северного побережья Норвегии и зимовки в западной части Баренцева моря в северном и восточном направлениях. Окрайн ареала она достигает в августе-октябре, широко распределяясь по акватории в поисках пищи [Маслов, 1944; Бойцов и др., 1996; Jakobsen, Ozhigin, 2011]. В последнее десятилетие биомасса нерестового запаса трески в Баренцевом море сократилась с 2,21 млн т в 2013 г. до 0,71 млн т в 2023 г. и 0,55 млн т в 2024 г., и в последующие годы она продолжит снижение до предосторожной величины B_{pa} (460 тыс. т).¹

Вопросы прогнозирования численности пополнения и темпа роста рыб от некоторых биотических и абиотических факторов (например, температуры и солёности воды, плотности популяции трески и т. д.) поднимались неоднократно [Nilssen et al., 1994; Ожигин и др., 1995; Ковалёв, Ярагина, 2009; Ottersen et al., 2006; Stige et al., 2010; Bogstad et al., 2013]. Однако, по прошествии некоторого времени и добавлении дополнительных лет во временные ряды найденные связи нарушались или становились незначимыми. Параметрами, оказывающими влияние на численность пополнения и темп роста рыб, признавались различные показатели. Отмечалась хорошая согласованность между средними размерами трески в отдельные годы

и суммой температур в сезоны нагула за период существования особей, что указывало на первостепенное влияние температурных условий на скорость роста трески [Dementyeva, Mankevich, 1965]. Но потепление в регионе Баренцева и сопредельных морей, которое наблюдается с начала 2000-х гг. [Карсаков и др., 2018], не способствовало увеличению средней массы рыб, поскольку это не единственный влияющий фактор, тем более что при увеличении температуры воды увеличиваются величины поддерживающего рациона, а в случае СВА трески и протяжённость нагульных миграций [Poloczanska et al., 2013; Morley et al., 2018; Little et al., 2021; Трофимов и др., 2023]. Численность пополнения, изменчивость которого весьма высока у СВА трески, может быть результатом многих причин [Houde, 2008], действующих в течение периода жизни пререкрута (три года у трески). Это может быть расположение мест нереста, температура на местах нерестилищ и её прямое влияние на время развития икры и выклев личинок, и косвенное – на темп роста и формирование кормовой базы для личинок [Кисляков, 1964; Терещенко, 1980; Ожигин и др., 1999; Opdal et al., 2011; Langangen et al., 2014]. Таким образом, влияние различных факторов на численность пополнения и среднюю массу пререкрутов может меняться при изменении климатических процессов, и целесообразно пересматривать их взаимосвязь при появлении новых данных или увеличении ряда наблюдений.

В последние десятилетия в Баренцевом море на фоне увеличения количества штормов наблюдалось существенное повышение температуры воздушных и водных масс, сопровождавшееся сокращением площади льдов [Гудкович и др., 2009; Алексеев и др., 2016; Трофимов и др., 2018; Лис, Егорова, 2022; González-Pola et al., 2023; Тимофеева и др., 2024]. Устойчивый тёплый период начался на рубеже XX и XXI веков [Boytssov et al., 2012; Mohamed et al., 2022], а с 2005 г. условия в море были рекордно тёплыми с пиком потепления в 2016 г., после чего наметилась тенденция на похолодание [Тимохов и др., 2019; Трофимов, 2021; Сентябов, Трофимов, 2024]. Это не могло не отразиться на состоянии запаса трески. Поскольку численность пополнения и масса трески

¹ Report of the Joint Russian-Norwegian Arctic Fisheries Working Group (JRN-AFWG). 2024. IMR-PINRO Joint Report Series. 2024. № 2024-7. 305 pp. https://hi.no/hi/netrapporter/imr-pinro-2024-7?_gl=1*39ehvj*up*MQ_*_ga*ODc3OD_kwODO4LjE3NTA2ODA0MDQ_*_ga_ST62YQW615*cE3NTA2ODA0MDMkbzEkZEkdkDE3NTA2ODA0MTAkajUzJGwwJGgw

в возрасте 3 года слабо подвержены влиянию промысла, они лучше других параметров запаса подходят для оценки влияния на него изменений климата. Так как вклад пополнения трески в динамику её запаса очевиден, выявление влияющих на него факторов с привлечением различных переменных является важной и актуальной задачей при прогнозировании динамики запаса, а также общего допустимого улова, в целях эффективного управления морским рыбным промыслом, особенно в условиях современных изменений климата.

Целью данной работы была оценка влияния изменений климата и океанологических условий на численность пополнения и массу трески в возрасте 3 года, как показателей состояния её запаса в Баренцевом море и прилегающих водах в 1981-2023 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки влияния изменений климата и океанологических условий на состояние запаса СВА трески в Баренцевом море использовались следующие параметры окружающей среды за 1981-2023 гг.: зимний индекс Северо-Атлантического колебания², температура атлантических вод в слое 50-200 м на разрезе «Гимсёй» (68,9° с. ш. 12,6° в. д. – 69,1° с. ш. 12° в. д.) в Норвежском море средняя за период март–май³, среднегодовая температура атлантических вод в слое 0-200 м на разрезе «Кольский меридиан» (70°30'–72°30' с. ш. 33°30' в. д.) в Баренцевом море [Карсаков и др., 2022, собственные данные], средняя по площади (71-79° с. ш. 25-55° в. д.) и за период август–сентябрь температура воды на глубине 100 м, вычисленная по данным океанографической базы Полярного филиала ВНИРО, и индекс протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря (73-78° с. ш. 15-30° в. д.) на 50 м средний за период август–сентябрь, рассчитанный согласно [Ившин и др., 2020].

Динамика нерестового запаса СВА трески, численность пополнения и средняя масса рыбы в возрасте 3 года в 1981-2023 гг. представлены по данным Совместной Рабочей группы учёных России и Норвегии¹.

В 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») и Statistica 13.

² Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) index (PC-based). NCAR. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based>. 20.12.2024.

³ ICES Report on Ocean Climate (IROC). ICES. <https://ocean.ices.dk/core/iroc#>. 20.12.2024.

Достоверность трендов оценивалась с помощью критерия Стьюдента и соответствующего ему уровня значимости p-value. Если p-value был меньше 0,05, тренд считался статистически значимым с вероятностью 95 %, а если меньше 0,01, то, соответственно, с вероятностью 99 % [Коросов, Горбач, 2007]. Аналогичный подход использовался при оценке значимости рассчитанных в работе коэффициентов корреляции.

Для регрессионного анализа с целью оценки влияния климата и океанологических условий на состояние запаса СВА трески в качестве зависимых переменных (функций отклика) выбраны численность пополнения (**R3**) и средняя масса (**W3**) трески в возрасте 3 года, а в качестве независимых переменных (предикторов, факторов), помимо биомассы нерестового запаса трески (**SSB**) и средней за два предыдущих года численности её пополнения в возрасте 3 года, использованы зимний индекс Северо-Атлантического колебания (**wNAO**), температура атлантических вод на разрезах «Гимсёй» в Норвежском море (**TwGS**) и «Кольский меридиан» в Баренцевом (**TwKS**), средняя по площади температура воды на 100 м (**AAT**) и индекс протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря (**FLI**). Независимые переменные использовались как без лага, так и с лагами от одного до трёх лет.

Для оценки связей климато-оceanологических процессов с состоянием запаса трески в Баренцевом море построены уравнения множественной линейной регрессии для численности пополнения и средней массы трески в возрасте 3 года. Для каждой зависимой переменной получен набор уравнений, включающих в себя все возможные комбинации предикторов в количестве от одного до шести, взятые с лагами от одного до трех лет для возможности использования в прогностических целях. Более шести факторов не включали, так как считается [Касьянов, 2008], что их максимальное количество должно быть в 6-7 раз меньше длины ряда (в нашем случае она составляет 43 года – период 1981-2023 гг., т. к. с 1981 г. проводятся регулярные тралово-акустические съёмки, значительно повлиявшие на точность оценок пополнения и средней массы рыб).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе проанализированы актуализированные климато-оceanологические параметры, выбранные для изучения связей климата и океанологических условий с состоянием запаса СВА трески (рис. 1). В изменениях температуры воды как в районе нерестилищ трески в Норвежском море, так и в местах её нагула в Баренцевом море присутствуют статисти-

чески значимые положительные тренды ($R^2 = 0,28$ - $0,57$, $p\text{-value} < 0,001$). Наблюдавшаяся после 2016 г. тенденция на похолодание прервалась достаточно тёплым 2023 г.: температура атлантических вод на разрезе «Гимсёй» в Норвежском море в марте-мае составила $7,3$ °C, достигнув исторического максимума, отмеченного в 2016 г., а на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море она достигла $5,0$ °C (наибольшее среднегодовое значение за последние пять лет), тогда как средняя по площади моря температура на 100 м в августе-сентябре повысилась до $2,1$ °C (максимальная с 2019 г.).

Индекс протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря после значительного уменьшения в 2000-е гг. и достижения в 2010 г. абсолютного минимума (111) продолжил в последние годы оставаться на низком уровне при общем (за 1981-2023 гг.) отрицательном тренде ($R^2 = 0,331$, $p\text{-value} < 0,001$). Средний за прошедшее десятилетие (2014-2023 гг.)

индекс составил 304, в 2023 г. – 303, при среднемноголетнем (1981-2023 гг.) значении 402 (см. рис. 1).

В рассматриваемый период преобладали положительные значения зимнего индекса Северо-Атлантического колебания: его средняя за 1981-2023 гг. величина составила 0,38 (см. рис. 1), что, согласно механизму действия этого атмосферного колебания, привело к повышению штормовой активности над Баренцевым морем и усилинию западного переноса в этот район тёплых и влажных воздушных масс из Северной Атлантики. Наибольшие значения этого индекса отмечались в 1989-1995 гг. (в среднем 1,50) и 2014-2020 гг. (1,00). В последние годы он колебался около нуля, составив в среднем за 2021-2023 гг. всего -0,08.

В условиях указанных климатических изменений в последние десятилетия происходили колебания запаса СВА трески, обусловленные появлением поколений различной урожайности и изменением

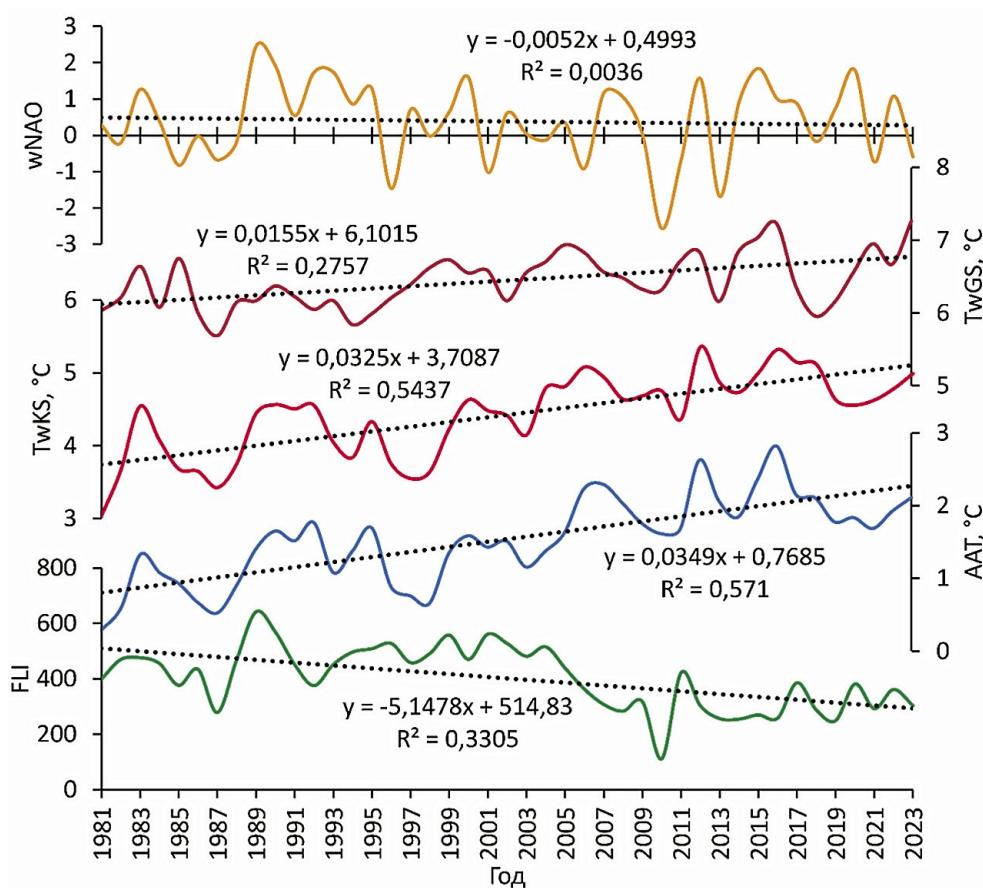


Рис. 1. Зимний индекс Северо-Атлантического колебания (wNAO), температура атлантических вод на разрезах «Гимсёй» (TwGS) и «Кольский меридиан» (TwKS), средняя по площади температура воды на 100 м (AAT) и индекс протяжённости термических фронтальных зон (FLI) в Баренцевом море в 1981-2023 гг.

Fig. 1. Winter North Atlantic Oscillation (wNAO) index, Atlantic water temperature in the Gimsøy (TwGS) and Kola (TwKS) sections, area-averaged temperature at 100 m (AAT) and the length index of thermal frontal zones (FLI) in the Barents Sea in 1981-2023

пресса промысла [Трофимов и др., 2023]. В изменениях нерестового запаса трески для периода с 1981 по 2023 г. также присутствует значимый положительный тренд ($R^2 = 0,473$, $p\text{-value} < 0,001$). В 1980-е годы нерестовый запас находился на низком уровне (115-321 тыс. т, рис. 2). Появление урожайного поколения 1983 г. на фоне высокой интенсивности промысла не привело к улучшению ситуации.

В конце 1980-х – начале 1990-х годов была существенно снижена величина общего допустимого улова, а промысловая смертность понизилась до 0,4-0,6, после чего начался рост запаса, который достиг локального максимума в 1992 г. Однако, промысловая смертность, начиная с 1994 г., вновь превысила значение критического ориентира (0,74), определяемого в рамках предосторожного подхода, и оставалась крайне высокой до начала 2000-х годов. В первой половине 2000-х годов состояние запаса оценивалось в пределах 255-664 тыс. т. С появлением двух богатых поколений 2004 и 2005 гг. и вступлением с 2003 г.

в действие Правила регулирования промысла, более строго ограничивающего уровни эксплуатации (установлена целевая смертность 0,4), рост запаса заметно ускорился. В 2009 г. нерестовый запас достиг 1000 тыс. т, превысив среднемноголетний уровень (751 тыс. т за 1981-2023 гг.). Запас трески достиг пика в 2012-2014 гг. (1996-2210 тыс. т). Однако затем он начал постепенно снижаться и в 2022-2023 гг. упал несколько ниже среднемноголетнего уровня (см. рис. 2).

Несомненно, что в исследуемый период наибольшее влияние на динамику запаса оказывал промысел. Для исследования зависимости состояния запаса СВА трески от климатических и океанологических процессов выбраны параметры популяции, в меньшей степени зависящие от промысла, – численность пополнения и средняя масса трески в возрасте 3 года (рис. 3).

Численность пополнения не связана с биомассой нерестового запаса ($r = 0,02-0,07$, $p\text{-value} = 0,64-0,89$) (табл. 1) и, следовательно, не подвержена косвенному влиянию промысла. Прямое влияние промысла на

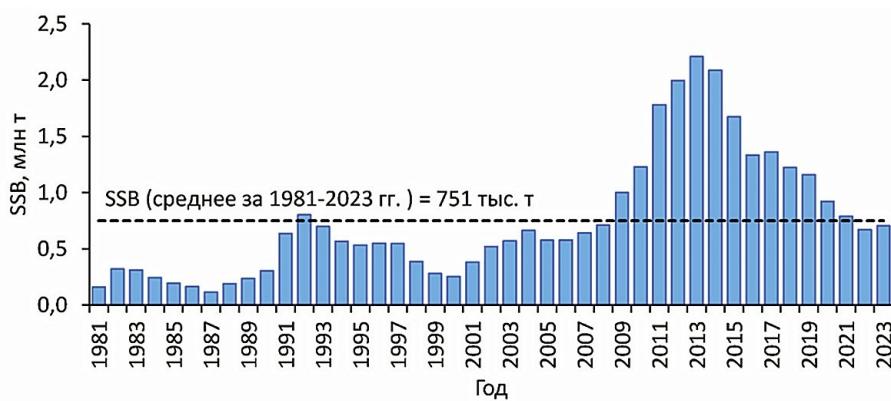


Рис. 2. Биомасса нерестового запаса СВА трески в 1981-2023 гг.

Fig. 2. Biomass of the spawning stock of NEA cod in 1981-2023

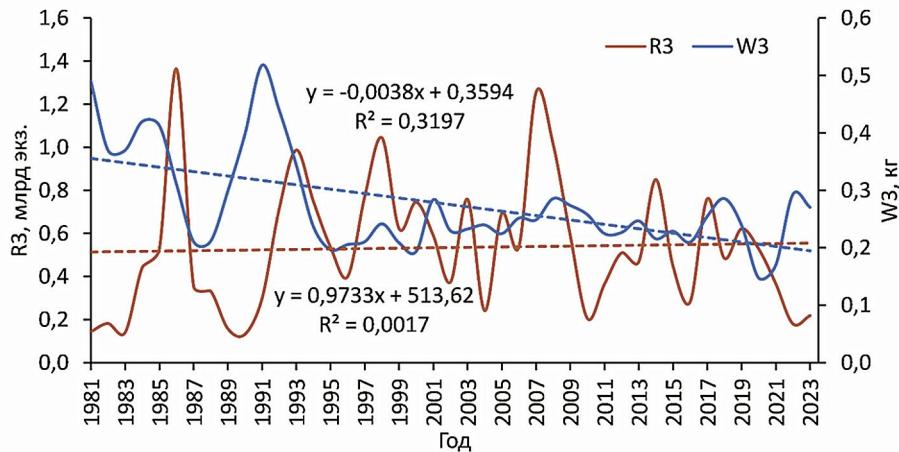


Рис. 3. Численность пополнения (R3) и средняя масса одного экземпляра (W3) СВА трески в возрасте 3 года в 1981-2023 гг.

Fig. 3. Recruitment abundance (R3) and mean weight of one specimen (W3) of NEA cod at age 3 in 1981-2023

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона (r) между зависимыми переменными (R_3 , W_3) и предикторами (wNAO, TwGS, TwKS, AAT, FLI, SSB). Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты (уровень значимости $p\text{-value} < 0,05$)

Table 1. Pearson correlation coefficients (r) between dependent variables (R_3 , W_3) and predictors (wNAO, TwGS, TwKS, AAT, FLI, SSB). Statistically significant coefficients (significance level $p\text{-value} < 0.05$) are highlighted in bold

Предиктор	Лаг, лет	Численность пополнения в возрасте 3 года (R_3)		Средняя масса рыбы в возрасте 3 года (W_3)	
		r	$p\text{-value}$	r	$p\text{-value}$
Зимний индекс Северо-Атлантического колебания (wNAO)	0	0,157	0,314	0,093	0,553
	1	-0,096	0,540	0,197	0,206
	2	0,045	0,777	0,092	0,557
	3	0,295	0,055	-0,068	0,667
Температура атлантических вод на разрезе «Гимсёй» в Норвежском море в марте–мае (TwGS)	0	-0,074	0,638	-0,285	0,064
	1	0,156	0,316	-0,107	0,495
	2	0,265	0,086	-0,270	0,080
	3	0,366	0,016	-0,378	0,012
Температура атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море в среднем за год (TwKS)	0	-0,071	0,650	-0,256	0,097
	1	0,140	0,371	-0,149	0,339
	2	0,306	0,046	-0,319	0,037
	3	0,295	0,055	-0,529	<0,001
Средняя по площади (71-79° с. ш. 25-55° в. д.) температура воды на 100 м в августе–сентябре (AAT)	0	-0,008	0,958	-0,292	0,057
	1	0,194	0,212	-0,214	0,168
	2	0,224	0,149	-0,309	0,043
	3	0,183	0,241	-0,529	<0,001
Индекс протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря в августе–сентябре (FLI)	0	-0,053	0,737	0,150	0,336
	1	-0,028	0,857	0,211	0,174
	2	0,228	0,142	0,312	0,042
	3	0,423	0,005	0,104	0,506
Биомасса нерестового запаса СВА трески (SSB)	0	0,022	0,889	-0,304	0,048
	1	0,073	0,643	-0,386	0,011
	2	0,066	0,675	-0,441	0,003
	3	0,052	0,739	-0,460	0,002
Средняя за два предыдущих года численность пополнения в возрасте 3 года ($R_{3,-1,-2}$)	1-2	0,272	0,078	-0,643	<0,001

молодь трески также ничтожно мало. При этом вклад пополнения в динамику запаса несомнен и выявление влияющих на него факторов является важной задачей при прогнозировании динамики запаса и общего допустимого улова.

Влияние на среднюю массу трески климатических и океанологических факторов может быть как прямым за счёт влияния температуры на темп роста рыб, так и опосредованным, например, за счёт возможного влияния условий среды на кормовую базу трески и обеспеченность её пищей.

Для 1981-2023 гг. в изменениях средней массы трески в возрасте 3 года отмечался значимый отрицательный тренд ($R^2 = 0,320$, $p\text{-value} < 0,001$), а в изме-

нениях численности пополнения (R_3) он отсутствовал ($R^2 = 0,002$, $p\text{-value} = 0,796$) (см. рис. 3).

В табл. 1 представлены коэффициенты корреляции Пирсона между зависимыми переменными (R_3 , W_3) и предикторами (wNAO, TwGS, TwKS, AAT, FLI, SSB), взятыми с лагами от одного до трёх лет и без лага. Видно, что численность пополнения трески в возрасте 3 года хуже коррелирует с влияющими факторами, чем её средняя масса в том же возрасте. Так, для численности пополнения значимая связь обнаружена только с температурой атлантических вод на разрезах «Гимсёй» ($r = 0,37$, лаг 3 года) и «Кольский меридиан» ($r = 0,31$, лаг 2 года), а также с индексом протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря ($r = 0,42$, лаг 3 года). Тогда как для средней массы тре-

ски связь была значима не только с температурой атлантических вод на разрезах «Гимсёй» ($r = -0,38$, лаг 3 года), «Кольский меридиан» ($r = -0,32 \dots -0,53$, лаги 2 и 3 года) и индексом протяжённости термических фронтальных зон ($r = 0,31$, лаг 2 года), но также со средней по площади температурой Баренцева моря на 100 м ($r = -0,31 \dots -0,53$, лаги 2 и 3 года), биомассой нерестового запаса ($r = -0,30 \dots -0,46$, без лага и с лагами от 1 до 3 лет), а наибольшей из рассмотренных оказалась связь со средней за два предыдущих года численностью пополнения в возрасте 3 года ($r = -0,64$).

С учётом значимости коэффициентов регрессии и количества предикторов, для каждой зависимой переменной выбрано по одной наилучшей модели (под термином «модель» здесь и далее понимаем именно уравнение регрессии). Они сформулированы следующим образом.

Регрессионная модель для численности пополнения трески в возрасте 3 года (подстрочный индекс указывает на лаг предиктора, выраженный в годах):

$$R3 = -203,068 + 200,556 \times TwGS_{-3} - 443,808 \times TwKS_{-1} + 527,619 \times AAT_{-1} + 1,544 \times FLI_{-3}, \quad (1)$$

имеет $R^2 = 0,437$ ($p\text{-value} < 0,001$), т. е. объясняет 43,7% изменчивости функции отклика.

Регрессионная модель для средней массы трески в возрасте 3 года (подстрочный индекс указывает на лаг предиктора, выраженный в годах):

$$W3 = 0,544 + 0,0280 \times wNAO_{0,1} + 0,0187 \times wNAO_{-2} - 0,000256 \times FLI_{-1} - 0,000092 \times SSB_{-3} - 0,000220 \times R3_{-1,2}, \quad (2)$$

имеет $R^2 = 0,720$ ($p\text{-value} < 0,001$), т. е. объясняет 72,0% изменчивости функции отклика.

Статистическая значимость коэффициентов регрессии в моделях и адекватность самих моделей оценивались с помощью критериев Стьюдента и Фишера [Елисеева, Юзбашев, 2004]. Значения t-крите-

рия Стьюдента, вычисленные для коэффициентов регрессии, превышали табличные значения, а уровень значимости был ниже 0,05. В выбранных моделях почти все коэффициенты регрессии являлись статистически значимыми за исключением только одного коэффициента при температуре атлантических вод на разрезе «Гимсёй» ($p\text{-value} = 0,061$). Об адекватности наших моделей свидетельствуют приемлемые значения критерия Фишера при соответствующим уровне значимости $p\text{-value}$, превышающие табличные. Уровень значимости моделей не превышал 0,001, что говорит о статистически значимой связи между переменными.

Для оценки оправдываемости моделей все ряды (1981-2023 гг.) были разбиты на две выборки: рабочую (1981-2010 гг.) и независимую (2011-2023 гг.). Рабочую выборку использовали для оценки коэффициентов регрессии в уравнениях 1 и 2, на основе которых для независимой выборки составляли прогнозы и проверяли их оправдываемость (табл. 2 и 3). После расчёта прогноза на первый год независимой выборки рабочая выборка увеличивалась на один год, а коэффициенты уравнений снова пересчитывались и составлялись прогнозы на второй год независимой выборки и т. д. Для проверки эффективности регрессионных моделей выполнялось сравнение их обеспеченности с обеспеченностью климатического (т. е. прогноза по норме, **A**) и инерционного (**I**) прогнозов (см. табл. 2 и 3). Дополнительно рассмотрены различные комбинации выбранных моделей с климатическим и инерционным прогнозами, взятые как их среднее значение. В качестве климатического прогноза использовалось среднее значение функции отклика за период, предшествующий году, на который составлялся прогноз, а при инерционном прогнозе в качестве прогнозируемого значения использовалось значение зависимой переменной за предыдущий год.

Таблица 2. Оценки качества множественного уравнения регрессии (**M**) для численности пополнения трески в возрасте 3 года

Table 2. Quality estimates of the multiple regression equation (**M**) for the recruitment abundance of cod at age 3

Параметр	Варианты и комбинации (среднее) моделей					
	A	I	M	A+M	I+M	A+I+M
Средняя абсолютная погрешность, млн экз.	234,5	266,7	164,2	187,4	197,4	198,4
Обеспеченность (%) при допустимой погрешности $0,8\sigma = 240,4$ млн экз.	63	58	77	74	70	70
Эффективность (в сравнении с климатическим прогнозом, A), %	-	-	14	12	7	7
Эффективность (в сравнении с инерционным прогнозом, I), %	-	-	19	16	12	12
Оправдываемость на независимом ряде 2011-2023 гг., %	69	69	85	85	85	85
Средняя абсолютная ошибка прогнозов на 2011-2023 гг., млн экз.	175,0	204,5	129,0	128,7	159,9	147,9

Таблица 3. Оценки качества множественного уравнения регрессии (**M**) для средней массы трески в возрасте 3 года
Table 3. Quality estimates of the multiple regression equation (**M**) for the mean weight of cod at age 3

Параметр	Варианты и комбинации (среднее) моделей					
	A	I	M	A+M	I+M	A+I+M
Средняя абсолютная погрешность, кг	0,065	0,048	0,035	0,043	0,034	0,038
Обеспеченность (%) при допустимой погрешности $0,8\sigma = 0,068$ кг	67	70	88	81	88	88
Эффективность (в сравнении с климатическим прогнозом, A), %	–	–	21	14	21	21
Эффективность (в сравнении с инерционным прогнозом, I), %	–	–	19	12	19	19
Оправдываемость на независимом ряде 2011-2023 гг., %	62	85	62	77	85	92
Средняя абсолютная ошибка прогнозов на 2011-2023 гг., кг	0,055	0,038	0,065	0,044	0,043	0,037

Считается⁴, что применение метода прогноза в практике морского гидрологического прогнозирования является целесообразным лишь когда для одной и той же допустимой погрешности обеспеченность метода превышает обеспеченность прогноза по норме: для краткосрочных и среднесрочных прогнозов (до 2 месяцев) не менее чем на 18% при допустимой погрешности $\pm 0,674\sigma$, для долгосрочных прогнозов (от 2 до 6 месяцев) не менее чем на 10% при допустимой погрешности $\pm 0,8\sigma$ и для сверхдолгосрочных прогнозов (более 6 месяцев) на любую величину при допустимой погрешности $\pm \sigma$ (чем больше превышение, тем эффективнее метод). К сожалению, для параметров запаса трески нет чётких критериев оценки качества их прогнозов, ранее экспертиза допускалась погрешность $\pm 20\%$. Поэтому, за неимением лучшего, авторы предлагают воспользоваться терминологией и подходами, разработанными для гидрологических прогнозов. Обеспеченность уравнений (1) и (2), отнесённых к долгосрочным, составила соответственно 77 и 88%, что на 14 и 21% больше обеспеченности по норме (63 и 67%) при той же допустимой погрешности $\pm 0,8\sigma$.

Также была выполнена проверка устойчивости коэффициентов детерминации этих уравнений регрессии при изменении длины рядов, когда они постепенно увеличивались с 30 до 43 членов, причём их начало оставалось неизменным, а год окончания на каждом шаге увеличивался на единицу с 2010 до 2023 г. (рис. 4). Для уравнения (1) при увеличении длины рядов коэффициент детерминации оставался достаточно стабильным, размах его колебаний составлял 0,04 или 9% от среднего значения R^2 (0,44). Для уравнения (2) отмечено плавное уменьшение коэффициента детерминации при удлинении рядов с 0,86 (1983-2010 гг.) до 0,72 (1983-2023 гг.), т. е. его размах составил 0,14 или 18% от среднего значения R^2 (0,80).

Модель для численности пополнения трески (уравнение 1), показала наилучшую эффективность в сравнении с вариантами, когда она объединялась с климатическим и/или инерционным прогнозами, при этом её средняя абсолютная погрешность оказалась минимальной – 164,2 млн экз. (см. табл. 2). Тогда как в случае модели для средней массы трески (уравнение 2) её обеспеченность и обеспеченность комбинаций этой модели с инерционным и климатическим прогнозами оказались одинаковыми (88%), а средние абсолютные погрешности были наименьшими и близкими по величине (0,034-0,038 кг) (см. табл. 3). Здесь под комбинацией имеется в виду использование модели совместно с климатическим и/или инерционным прогнозами (т. е. среднее арифметическое результатов расчёта по этим методам).

Для численности пополнения трески в возрасте 3 года наилучшую оправдываемость (85%) с наименьшей средней абсолютной ошибкой прогноза (~129 млн экз.) имеют модель 1 и её комбинация с климатическим прогнозом (рис. 5). Тогда как для средней массы трески в возрасте 3 года самую высокую оправдываемость (92%) с наименьшей средней ошибкой (0,037 кг) имеет комбинация модели 2 с климатическим и инерционным прогнозами (рис. 6).

Таким образом, наиболее эффективными из рассмотренных вариантов (см. табл. 2 и 3) в плане прогнозирования оказались: для численности пополнения трески в возрасте 3 года – модель 1, а для средней массы трески в том же возрасте – комбинация модели 2 с климатическим и инерционным прогнозами.

Регрессионная модель для численности пополнения трески в возрасте 3 года включает в себя лишь абиотические факторы: температуру атлантических вод на разрезах «Гимсёй» (с лагом 3 года) и «Кольский меридиан» (с лагом 1 год), среднюю по площади температуру на глубине 100 м (с лагом 1 год) и индекс протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря (с лагом 3 года), что указывает на важную

⁴ РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. 2011. 188 с.

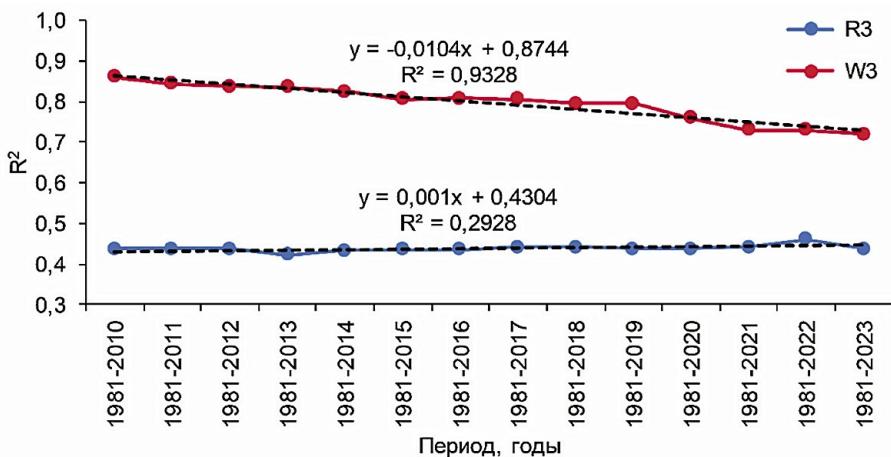


Рис. 4. Зависимость коэффициента детерминации (R^2) регрессионных моделей для численности пополнения (R3) и средней массы (W3) трески от длины ряда

Fig. 4. Dependence of the determination coefficient (R^2) of regression models for the recruitment abundance (R3) and mean weight (W3) of cod on the length of the series

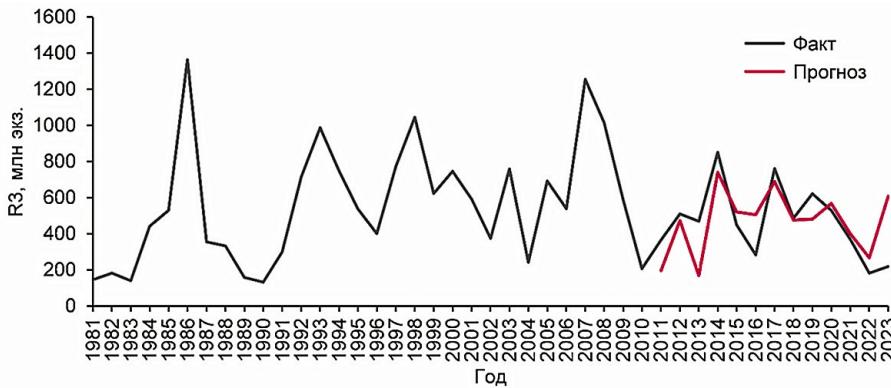


Рис. 5. Фактические (1981-2023 гг.) и рассчитанные по модели для независимой выборки (2011-2023 гг.) значения численности пополнения трески в возрасте 3 года

Fig. 5. Actual (1981-2023) and model-predicted (2011-2023) values of the recruitment abundance of cod at age 3

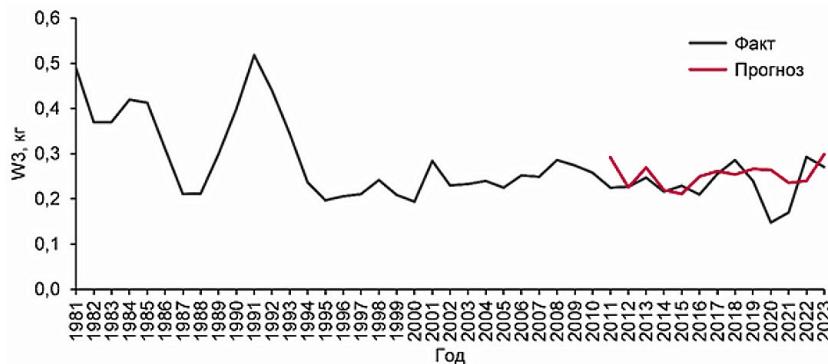


Рис. 6. Фактические (1981-2023 гг.) и рассчитанные по модели для независимой выборки (2011-2023 гг.) значения средней массы трески в возрасте 3 года (использована комбинация модели 2 с климатическим и инерционным прогнозами)

Fig. 6. Actual (1981-2023) and model-predicted (2011-2023) values of the mean weight of cod at age 3 (a combination of model 2 with climate and inertial forecasts was used)

роль в формировании численности пополнения трески в возрасте 3 года океанографических условий не только на ранних этапах её онтогенеза, но и на стадии молоди. Из уравнения 1 видно, что чем теплее вода и чем протяжённее фронтальные зоны в первые годы жизни трески, тем выше будет численность её пополнения в возрасте 3 года. Температура атлантических вод на разрезе «Кольский меридиан», вопреки ожиданиям, вошла в данное уравнение со знаком минус, что произошло из-за эффекта мультиколлинеарности, так как она очень тесно коррелирует со средней по площади температурой на 100 м ($r = 0,95$, $p\text{-value} < 0,001$). Тем не менее, мы не стали удалять этот параметр из уравнения, поскольку он объясняет часть остаточной дисперсии.

Регрессионная модель для средней массы трески в возрасте 3 года, помимо абиотических факторов (зимний индекс Северо-Атлантического колебания с лагами 1 и 2 года и протяжённость термических фронтальных зон с лагом 1 год), также включает в себя биологические предикторы: биомассу нерестового запаса (с лагом 3 года) и среднюю за два предыдущих года численности пополнения трески в возрасте 3 года. Зимний индекс Северо-Атлантического колебания, оказывающего влияние на океанографические условия как в Северной Атлантике, так и в европейских арктических морях, во второй и третий годы жизни трески положительно связан с её средней массой в возрасте 3 года, тогда как нерестовая биомасса с лагом 3 года и средняя численность пополнения за предыдущие два года, наоборот, отрицательно – чем выше эти показатели в период жизни молоди, тем меньше её средняя масса, что, вероятно, обусловлено пищевой конкуренцией однолеток между собой и с рыбой старших (на 1 и 2 года) возрастов. Кроме того, вероятно, влияют стартовые условия для роста поколения в год его рождения в связи с плотностью/численностью особей на ранних этапах (личинки, мальки, 0-группа), связанной с биомассой нерестового запаса [Bogstad et al., 2016]. Следует отметить, что индекс протяжённости фронтальных зон, входивший в уравнение для численности пополнения со знаком плюс, здесь поменял его на противоположный, что, скорее всего, также связано с мультиколлинеарностью, поскольку это предиктор тесно связан с нерестовым запасом ($r = -0,57$, $p\text{-value} < 0,001$).

Рыбы обычно развиваются в течение нескольких этапов на ранних стадиях жизни, и на любом этапе могут доминировать разные факторы, определяющие связь организмов со средой. Изменчивость пополнения может быть результатом многих причин [Houde, 2008], действующих в течение жизни пререкрута. Они

включают как климатические факторы (температура, солёность, содержание кислорода, скорость течений, турбулентность, свет), так и биотические (хищничество, приемлемая кормовая база, конкуренция за пищу с представителями своего и других видов и прочие).

Многие авторы указывали на роль температуры в пополнении СВА трески Баренцева моря [Ottersen et al., 2006; Stige et al., 2010; Bogstad et al., 2013], а также на то, что эта роль может меняться в зависимости от возрастной структуры запаса. Наши результаты ещё раз подчёркивают важность первых лет жизни особей для пополнения СВА трески. Новым значимым фактором в нашем исследовании для прогноза мощности пополнения оказался индекс протяжённости термических фронтальных зон Баренцева моря. Механизм его влияния ещё предстоит проанализировать, однако, по-видимому, фронтальные зоны могут быть связаны с формированием (или влиять на степень концентрации) кормового зоопланктона в первый год жизни поколения.

В отношении средней массы рыбы в возрасте 3 года очевидно влияние биотических факторов, т. е. конкуренции за кормовые ресурсы, а также видна роль условий первой зимовки, когда треска переходит к придонному образу жизни и встречается с новыми местами обитания, кормовыми объектами, хищниками, конкурентами, и последующих двух лет. Высокая температура может привести к ускорению темпов развития трески ранних стадий [Folkvord, 2005], что в свою очередь может увеличить выживаемость, позволяя малькам расти быстрее, выходя из диапазона размеров, наиболее уязвимых для хищников [Cushing, 1995]. Ранее было показано, что по индексам температуры поверхностного слоя моря можно предсказывать рост трески и пикши [Stige et al., 2010], предполагая, что более высокая температура приводит к повышению скорости обмена веществ и, при условии, что имеется достаточное количество пищи, к более быстрому росту. Быстрый рост может быть причиной повышения выживаемости, например, за счёт сокращения времени, когда рыбы уязвимы по отношению к хищникам [Ottersen, Loeng, 2000].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе в качестве параметров популяции, отражающих динамику запаса трески и наименее подверженных воздействию промысла, на которых возможно проследить влияние изменений условий среды, выбраны численность пополнения и средняя масса трески в возрасте 3 года. Для этих параметров построены надежные уравнения множественной линейной регрессии с хорошей информационной способностью

(R^2 составил 44 и 72% соответственно), которые могут быть использованы для прогнозирования с заблаговременностью до одного года.

Показано, что формирование численности пополнения трески в возрасте 3 года связано с условиями среды (температура воды и протяжённость термических фронтальных зон) как на ранних этапах онтогенеза, так и для молоди. Средняя масса рыбы в возрасте 3 года связана с биомассой нерестового запаса в год нереста и средней численностью пополнения трески в возрасте на 1 и 2 года старше, а также статистически связана с протяжённостью фронтальных зон и индексом Северо-Атлантического колебания во второй и третий годы жизни трески.

Результаты исследований планируется применить для анализа состояния запаса трески в Баренцевом море, характеристики условий среды её обитания и ориентировать на использование в рамках комплексного подхода при изучении процессов формирования запаса трески, а также применять для оценки влияния океанологических условий на состояние запаса трески в Баренцевом море и для прогноза численности её пополнения и средней массы в возрасте 3 года.

В дальнейшем планируется расширить набор предикторов, добавив в него данные по первичной продукции и кормовой базе, что позволит более полно учесть в статистической модели все влияющие факторы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

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

ЛИТЕРАТУРА

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

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 (биологический-промышленный очерк). Мурманск: Изд-во ПИНРО. 285 с.

Гершанович Д.Е., Муромцев А.М. 1983. Океанологические основы биологической продуктивности Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат. 320 с.

Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. 2009. О характере и причинах изменений климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. № 81. С. 15-23.

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.

Карсаков А.Л., Трофимов А.Г., Ившин В.А. 2018. Восстановление данных по температуре воды на разрезе «Кольский меридиан» в 2016-2017 гг. // Труды ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 193-206.

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

Кисляков А.Г. 1964. Колебания гидрологического режима северной части Норвежского моря и их влияние на формирование поколений аркто-норвежского стада трески // Материалы сессии Ученого совета ПИНРО по результатам исследований в 1962-1963 гг. Мурманск. Вып.3. С. 44-59.

Ковалев Ю.А., Ярагина Н.А. 2009. Влияние плотности популяции на скорость роста, созревания и продуктивность запаса северо-восточной арктической трески *Gadus morhua morhua* L. // Вопросы ихтиологии. Т. 49, № 1. С. 61-70.

Коросов А.В., Горбач В.В. 2007. Компьютерная обработка биологических данных. Петр заводск: Изд-во ПетрГУ. 76 с.

Лис Н.А., Егорова Е.С. 2022. Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 68. № 3. С. 234-247. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247.

Маслов Н.А. 1944. Донные рыбы Баренцева моря и их промысел // Труды ПИНРО. Вып. 8. С. 3-186.

Ожигин В.К., Третьяк В.Л., Ярагина Н.А., Ившин В.А. 1995. Зависимость роста аркто-норвежской трески *Gadus morhua morhua* от условий откорма майвой *Mallotus villosus villosus* и температуры воды // Вопросы ихтиологии. Т. 35, № 3. С. 334-342.

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.

Сентябов Е.В., Трофимов А.Г. 2024. Динамика гидрометеорологических условий в Северной Атлантике и Западной Арктике в эпоху глобальных климатических изменений

- // Труды ВНИРО. Т. 196. С. 179-192. DOI: 10.36038/2307-3497-2024-196-179-192.
- Терещенко В.В. 1980. Особенности гидрометеорологических условий дрейфа икры и личинок лофотенской трески // Физико-химические условия формирования биологической продуктивности Баренцева моря. Апатиты. С. 34-40.
- Тимофеева А.Б., Юлин А.В., Иванов В.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А. 2024. Ледовитость российских арктических морей трассы Северного морского пути в современный климатический период // Арктика: экология и экономика. Т. 14. № 1 (53). С. 135-146. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-135-146.
- Тимохов Л.А., Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Юлин А.В. 2019. Климатические изменения сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева морей // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 65. № 2. С. 148-168. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168.
- Трофимов А.Г. 2021. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря // Труды ВНИРО. Т. 186. С. 101-118. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-1-86-101-118.
- 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.
- Трофимов А.Г., Ярагина Н.А., Ившин В.А., Ковалев Ю.А., Анциферов М.Ю., Сентябов Е.В. 2023. Распределение трески в Баренцевом море в условиях изменяющегося климата // Труды ВНИРО. Т. 192. С. 68-84. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-192-68-84.
- Шевченко А.В. 2000. Океанологические условия формирования промысловой продуктивности в морях Северо-Европейского бассейна. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 100 с.
- Bogstad B., Dingsør G.E., Ingvaldsen R.B., Gjøsæter H. 2013. Changes in the relations between oceanographic conditions and recruitment of cod, haddock and herring in the Barents Sea // Marine Biology Research. V. 9. P. 895-907. DOI: 10.1080/17451000.2013.775451.
- Bogstad B., Yaragina N., Nash R. 2016. The early life-history dynamics of Northeast Arctic cod: levels of natural mortality and abundance during the first three years of life // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. V. 73, No. 2. P. 246-256. DOI: 10.1139/cjfas-2015-0093.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G. 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000-2009 // ICES Journal of Marine Science. V. 69. № 5. P. 833-840. DOI: 10.1093/icesjms/fss075.
- Cushing D.H. 1995. Population Production and Regulation in the Sea. A Fisheries Perspective. Cambridge: Cambridge University Press. 354 pp.
- 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.
- Dementyeva T.F., Mankevich E.M., 1965. Changes in the growth rate of the Barents Sea cod as affected by environmental factors // ICNAF. Spec. Publ. No. 6. P. 571-577.
- Folkvord A. 2005. Comparison of size-at-age of larval Atlantic cod (*Gadus morhua*) from different populations based on size- and temperature-dependent growth models // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. V. 62. P. 1037-1052. DOI: 10.1139/F05-008.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.) 2023. ICES Report on Ocean Climate 2021 // ICES Cooperative Research Report. V. 358. 123 pp. DOI: 10.17895/ices.pub.24755574.
- Houde E.D. 2008. Emerging from Hjort's Shadow // Journal of Northwest Atlantic Fishery Science. V. 41. P. 53-70. DOI: 10.2960/J.v41.m634.
- 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.
- Langangen Ø., Stige L., Yaragina N., Vikebø N., Bogstad B., Gusdal Y. 2014. Egg mortality of Northeast Arctic cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). ICES Journal of Marine Science. V. 71. Iss. 5. P. 1129-1136. DOI: 10.1093/icesjms/fst007.
- Little A.G., Loughland I., Seebacher F. 2021. What do warming waters mean for fish physiology and fisheries? // Journal of Fish Biology. No. 98. P. 1493. DOI: 10.1111/jfb.14803.
- Mohamed B., Nilsen F., Skogseth R. 2022. Interannual and decadal variability of sea surface temperature and sea ice concentration in the Barents Sea // Remote Sensing. V. 14. Iss. 17. Art. 4413. DOI: 10.3390/rs14174413.
- Morley J.W., Selden R.L., Latour R.J., Frölicher T.L., Seagraves R.J., Pinsky M.L. 2018. Projecting shifts in thermal habitat for 686 species on the North American continental shelf // PLoS One. V. 13. Iss. 5. Art. e0196127. DOI: 10.1371/journal.pone.0196127.
- Nilssen E.M., Pedersen T., Hopkins C.C.E., Thyholdt K., Pope J.G. 1994. Recruitment variability and growth of Northeast Arctic cod: influence of physical environment, demography, and predator – prey energetics // ICES marine Science Symposia. V. 198. P. 449-470.
- Opdal A.F., Vikebø F.B., Fiksen O. 2011. Parental migration, climate and thermal exposure of larvae: spawning in southern regions gives Northeast Arctic cod a warm start // Marine Ecology Progress Series, 439: 255-262.
- Ottersen G., Hjermann D., Stenseth N.C. 2006. Changes in spawning stock structure strengthens the link between climate and recruitment in a heavily fished cod stock // Fisheries Oceanography. V. 15. P. 230-243. DOI: 10.1111/j.1365-2419.2006.00404.x.
- Ottersen G., Loeng H. 2000. Covariability in early growth and yearclass strength of Barents Sea cod, haddock and herring: the environmental link // ICES Journal of Marine Science. V. 57. P. 339-348. DOI: 10.1006/jmsc.1999.0529.

- Poloczanska E.S., Brown C.J., Sydeman W.J. 2023. Global imprint of climate change on marine life // *Nature Climate Change*. V. 3. P. 919-925. DOI: 10.1038/nclimate1958.
- Stige L.C., Ottersen G., Dalpadado P., Chan K-S., Hjermann D., Lajus D., Yaragina N., Stenseth N. 2010. Direct and indirect climate forcing in a multi-species marine system. *Proc. of the Royal Society B // Biological Sciences*. V. 277. P. 3411-3420. DOI: 10.1006/jmsc.1999.0529.
- Sætersdal, G., Loeng, H. 1987. Ecological adaption of reproduction in Northeast Arctic Cod. *Fisheries Research*, 5: 253-270.
- REFERENCES**
- Alekseev G.V., Glock N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E. 2016. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability // *Meteorology and hydrology*. № 8. P. 38-56. (In Russ.).
- Boytssov 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 Publish. 285 pp. (In Russ.).
- Gershonovich D.E., Muromtsev A.M. 1983. Oceanological bases of biological productivity of the World Ocean. Leningrad: Gydrometeoizdat. 320 pp. (In Russ.).
- Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitsky V.M., Frolov I.E. 2009. On the character and causes of the Earth's climate changes // *Arctic and Antarctic Research*. № 81. P. 15-23. (In Russ.).
- Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. 2004. General theory of statistics. Moscow: Finance and Statistics. 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. (In Russ.). DOI: 10.36038/2307-3497-2020-180-60-71.
- Izhevskiy G.K. 1961. Oceanological bases of forming commercial productivity of the seas. Moscow: Pishchepromizdat. 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.).
- Karsakov A.L., Trofimov A.G., Ivshin V.A. 2018. Reconstruction of water temperature data on the Kola Meridian section in 2016-2017 // *Trudy VNIRO*. V. 173. P. 193-206. (In Russ.)
- Kasyanov V.A. 2008. Econometrics: educational electronic text publication. Ekaterinburg: UPI. 200 pp. (In Russ.).
- Kislyakov A.G. 1964. Fluctuations in the hydrological regime of the northern part of the Norwegian Sea and their influence on the formation of generations of the Arctic-Norwegian cod stock // Proceedings of the session of the Scientific Council of PINRO on the results of research in 1962-1963. Murmansk. Iss. 3. P. 44-59. (In Russ.)
- Kovalev Yu.A., Yaragina N.A. 2009. The influence of population density on the growth rate, maturation and productivity of the north-eastern Arctic cod *Gadus morhua morhua* L. stock // *Voprosy ichthyologii*. V. 49. № 1. P. 61-70. (In Russ.).
- Korosov A.V., Gorbach V.V. 2007. Computer processing of biological data. Petrozavodsk: PetrGU. 76 pp. (In Russ.).
- Lis N.A., Egorova E.S. 2022. Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual areas // *Arctic and Antarctic Research*. V. 68. № 3. P. 234-247. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247. (In Russ.).
- Maslov N.A. 1944. Demersal fishes of the Barents Sea and their fishing // *Trudy PINRO*. V. 8. P. 3-186. (In Russ.).
- Ozhigin V.K., Tretiak V.L., Yaragina N.A., Ivshin V.A. 1995. Dependence of the growth of arctic-Norwegian cod *Gadus morhua morhua* on the conditions of feeding capelin *Mallotus villosus villosus* and water temperature // *Voprosy ichthyologii*. V. 35, № 3. P. 334-342. (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 p. (In Russ.).
- Sentyabov E.V., Trofimov A.G. 2024. Dynamics of hydrometeorological conditions in the North Atlantic and West Arctic in the age of global climate changes // *Trudy VNIRO*. Vol. 196. P. 179-192. DOI: 10.36038/2307-3497-2024-179-192. (In Russ.).
- Tereshchenko V.V. 1980. Features of hydrometeorological conditions of drift of eggs and larvae of Lofoten cod // *Physicochemical conditions of formation of biological productivity of the Barents Sea*. Apatity. P. 34-40. (In Russ.).
- Timofeeva A.B., Yulin A.V., Ivanov V.V., Sharatunova M.V., Pavlova E.A. 2024. Ice cover of the Russian Arctic seas along the Northern Sea Route in the modern climatic period // *Arctica: ecologia i ekonomika*. Vol. 14. No/1 (53). P. 135-146. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-135-146. (In Russ.).
- Timokhov L.A., Vyazigina N.A., Mironov E.U., Yulin A.V. 2019. Climatic changes of seasonal and inter-annual variability of the ice cover of the Greenland and Barents Seas // *Arctic and Antarctic Research*. V. 65. № 2. P. 148-168. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-148-168. (In Russ.).
- Trofimov A.G. 2021. The current trends in oceanographic conditions of the Barents Sea // *Trudy VNIRO*. V. 186. P. 101-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-101-118>.
- 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.).
- Trofimov A.G., Yaragina N.A., Ivshin V.A., Kovalev Yu.A., Antsiferov M.Yu., Sentyabov E.V. 2023. Cod distribution in the Barents Sea under climate changes // *Trudy VNIRO*. V. 192. P. 68-84. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-192-68-84. (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.).
- Bogstad B., Dingsør G.E., Ingvaldsen R.B., Gjøsæter H. 2013. Changes in the relations between oceanographic conditions and recruitment of cod, haddock and herring

- in the Barents Sea // *Marine Biology Research*. V. 9. P. 895-907. DOI: 10.1080/17451000.2013.775451.
- Bogstad B., Yaragina N., Nash R.* 2016. The early life-history dynamics of Northeast Arctic cod: levels of natural mortality and abundance during the first three years of life // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. V. 73, No. 2. P. 246-256. DOI: 10.1139/cjfas-2015-0093.
- Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G.* 2012. Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea, 2000-2009 // *ICES Journal of Marine Science*. V. 69. № 5. P. 833-840. DOI: 10.1093/icesjms/fss075.
- Cushing D.H.* 1995. Population Production and Regulation in the Sea. A Fisheries Perspective. Cambridge: Cambridge University Press. 354 pp.
- 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.
- Dementyeva T.F., Mankevich E.M.*, 1965. Changes in the growth rate of the Barents Sea cod as affected by environmental factors // *ICNAF. Spec. Publ. No. 6*. P. 571-577.
- Folkvord A.* 2005. Comparison of size-at-age of larval Atlantic cod (*Gadus morhua*) from different populations based on size- and temperature-dependent growth models // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. V. 62. P. 1037-1052. DOI: 10.1139/F05-008.
- González-Pola C., Larsen K.M.H., Fratantoni P., Beszczynska-Möller A. (Eds.)* 2023. ICES Report on Ocean Climate 2021 // *ICES Cooperative Research Report*. V. 358. 123 pp. DOI: 10.17895/ices.pub.24755574.
- Houde E.D.* 2008. Emerging from Hjort's Shadow // *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*. V. 41. P. 53-70. DOI: 10.2960/J.v41.m634.
- 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.
- Langangen Ø., Stige L., Yaragina N., Vikebø N., Bogstad B., Gusdal Y.* 2014. Egg mortality of Northeast Arctic cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *ICES Journal of Marine Science*. V. 71. Iss. 5. P. 1129-1136. DOI: 10.1093/icesjms/fst007.
- Little A.G., Loughland I., Seebacher F.* 2021. What do warming waters mean for fish physiology and fisheries? // *Journal of Fish Biology*. No. 98. P. 1493. DOI: 10.1111/jfb.14803.
- Mohamed B., Nilsen F., Skogseth R.* 2022. Interannual and decadal variability of sea surface temperature and sea ice concentration in the Barents Sea // *Remote Sensing*. V. 14. Iss. 17. Art. 4413. DOI: 10.3390/rs14174413.
- Morley J.W., Selden R.L., Latour R.J., Frölicher T.L., Seagraves R.J., Pinsky M.L.* 2018. Projecting shifts in thermal habitat for 686 species on the North American continental shelf // *PLoS One*. V. 13. Iss. 5. Art. e0196127. DOI: 10.1371/journal.pone.0196127.
- Nilssen E.M., Pedersen T., Hopkins C.C.E., Thyholdt K., Pope J.G.* 1994. Recruitment variability and growth of Northeast Arctic cod: influence of physical environment, demography, and predator – prey energetics // *ICES marine Science Symposia*. V. 198. P. 449-470.
- Opdal A.F., Vikebø F.B., Fiksen O.* 2011. Parental migration, climate and thermal exposure of larvae: spawning in southern regions gives Northeast Arctic cod a warm start // *Marine Ecology Progress Series*, 439: 255-262.
- Ottersen G., Hjermann D., Stenseth N.C.* 2006. Changes in spawning stock structure strengthens the link between climate and recruitment in a heavily fished cod stock // *Fisheries Oceanography*. V. 15. P. 230-243. DOI: 10.1111/j.1365-2419.2006.00404.x.
- Ottersen G., Loeng H.* 2000. Covariability in early growth and yearclass strength of Barents Sea cod, haddock and herring: the environmental link // *ICES Journal of Marine Science*. V. 57. P. 339-348. DOI: 10.1006/jmsc.1999.0529.
- Poloczanska E.S., Brown C.J., Sydeman W.J.* 2023. Global imprint of climate change on marine life // *Nature Climate Change*. V. 3. P. 919-925. DOI: 10.1038/nclimate1958.
- Stige L.C., Ottersen G., Dalpadado P., Chan K-S., Hjermann D., Lajus D., Yaragina N., Stenseth N.* 2010. Direct and indirect climate forcing in a multi-species marine system. *Proc. of the Royal Society B // Biological Sciences*. V. 277. P. 3411-3420. DOI: 10.1006/jmsc.1999.0529.
- Sætersdal, G., Loeng, H.* 1987. Ecological adaption of reproduction in Northeast Arctic Cod. *Fisheries Research*, 5: 253-270.

Поступила в редакцию 19.02.2025 г.
Принята после рецензии 11.06.2025 г.