

**УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ
ENVIRONMENTS OF FISHERIES RESOURCES**

Научная статья

УДК [597.555.51:551.463.6](265.51)

DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-366-388

EDN: DHLHPL

**ПОСЛЕДСТВИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ 2016–2019 ГГ.
ДЛЯ ЗАПАСА ТИХООКЕАНСКОЙ ТРЕСКИ
GADUS MACROCEPHALUS (GADIDAE) В РОССИЙСКИХ ВОДАХ
СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ**

Ю.И. Зуенко, А.Б. Савин, Е.О. Басюк*
Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Рассмотрены последствия «волны тепла» 2016–2019 гг. для океанологических условий в Беринговом море и популяций тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus*. Запас трески в северо-западной части Берингова моря, в 1965–2012 гг. колебавшийся в пределах 25,0–654,0 тыс. т, в 2017 г. возрос до 1329,7 тыс. т. Особенности размерно-возрастного состава трески, нагуливавшейся в российских водах в эти годы, указывают на то, что основу запаса составили мигранты, подошедшие с юго-востока моря. Столь массовые миграции происходили в условиях экстремального роста температуры воды, особенно на поверхности моря, разрушения придонной холодной шельфовой водной массы, усиления теплых течений, в результате чего традиционные миграции трески с юго-востока на северо-запад моря активизировались, кроме того, возник новый миграционный маршрут — на север, через аляскинский шельф к берегам Чукотки и даже в Берингов пролив и Чукотское море. Оба пути миграций совпадают с потоками Берингоморского и Аляскинского течений, огибающих с двух сторон и разрушающих Лаврентийское пятно холодных шельфовых вод. Выдвинута гипотеза, что активизация миграций обусловлена усилением транспорта на север эвфаузиид *Thysanoessa inermis* из района их воспроизводства и сопутствующих миграций основного потребителя эвфаузиид — минтая. На основе полученных знаний о последствиях «волн тепла» в Беринговом море промысел трески может быть оптимизирован с целью более полного использования меняющегося промыслового ресурса.

Ключевые слова: «волна тепла», тихоокеанская треска, *Gadus macrocephalus*, нагульные скопления, нагульная миграция, циркуляция вод, транспорт зоопланктона течениями, Берингово море

Для цитирования: Зуенко Ю.И., Савин А.Б., Басюк Е.О. Последствия экстремально-го потепления 2016–2019 гг. для запаса тихоокеанской трески *Gadus macrocephalus* (Gadidae) в российских водах северо-западной части Берингова моря // Изв. ТИНРО. — 2025. — Т. 205, вып. 2. — С. 366–388. DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-366-388. EDN: DHLHPL.

* Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, ведущий специалист, zuenko_yury@hotmail.com, ORCID 0000-0003-1312-542X; Савин Андрей Борисович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, andrei.savin@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0003-5910-6512; Басюк Евгений Олегович, ведущий специалист, evgenii.basyuk@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0001-5132-1766.

Original article

Impacts of extreme warming in 2016–2019 on the stock of pacific cod *Gadus macrocephalus* (Gadidae) in the Russian waters of northwestern Bering Sea

Yury I. Zuenko*, Andrey B. Savin**, Eugene O. Basyuk***

*—*** Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

* D.Geogr., leading specialist, zuenko_yury@hotmail.com, ORCID 0000-0003-1312-542X

** Ph.D., leading researcher, andrei.savin@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0003-5910-6512

*** leading specialist, evgenii.basyuk@tinro.vniro.ru, ORCID 0009-0001-5132-1766

Abstract. “Heat wave” in the Bering Sea in 2016–2019 and its consequences for oceanographic conditions and local populations of pacific cod *Gadus macrocephalus* are considered. The feeding stock of cod in the northwestern part of the sea (Russian EEZ) had fluctuated previously (1965–2012) from $25 \cdot 10^3$ to $654 \cdot 10^3$ t, but increased up to $1329.7 \cdot 10^3$ t in 2017. Features of the size-age structure for the cod fed in this area in the years of “heat wave” showed a prevalence of migrants from the southeastern Bering Sea. Such active migrations of cod were conditioned by extreme heating of the water and destruction of the cold water pool at the shelf bottom caused by strengthening of warm currents that enforced the traditional migration from the south-east to the north-west and opened a new route — northward from the southeastern Bering Sea, across the shelf of Alaska to the coasts of Chukotka Peninsula or even to the Bering Strait and Chukchi Sea. Both routes coincided with the streams of the Bering Slope Current and Alaska Coastal Current, which encircled the cold water pool from two sides and destroyed this water mass. A hypothesis is proposed that the migrations were driven by northward transport of krill *Thysanoessa inermis* by these currents from the area of their reproduction at the continental slope accompanied by feeding migrations of their main grazer — walleye pollock. The study results allow to optimize the cod fishery in the Bering Sea for comprehensive utilization of this strongly fluctuating stock.

Keywords: “heat wave”, pacific cod, *Gadus macrocephalus*, feeding, feeding migration, water circulation, transport of zooplankton by currents, Bering Sea

For citation: Zuenko Yu.I., Savin A.B., Basyuk E.O. Impacts of extreme warming in 2016–2019 on the stock of pacific cod *Gadus macrocephalus* (Gadidae) in the Russian waters of northwestern Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2025, vol. 205, no. 2, pp. 366–388. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-366-388. EDN: DHLHPL.

Введение

На фоне современного глобального потепления, темпы которого оцениваются в десятки доли градуса за десятилетие, то в одном, то в другом регионе время от времени случаются резкие повышения температуры, продолжающиеся до нескольких лет, но потом все же заканчивающиеся, получившие у климатологов название «волны тепла» (heat waves). Раньше в Мировом океане такие феномены не наблюдались, за исключением квазипериодических резких повышений температуры у берегов Перу и Эквадора, известных как явление Эль-Ниньо. В отличие от Эль-Ниньо, которое случается относительно регулярно, «волны тепла» возникают неожиданно и столь же неожиданно заканчиваются, поэтому влекут катастрофические последствия для морских экосистем. Наиболее известна «волна тепла», наблюдавшаяся в северо-восточной части Тихого океана в конце 2013 г. и просуществовавшая до начала 2016 г., получившая собственное имя «The Blob» [Petersen et al., 2015]. Аномалии температуры поверхности океана во всей обширной области распространения этой массы теплой воды (порядка 1000 миль в диаметре) стабильно превышали +2 °C (тогда это казалось экстремальным, сейчас уже нет).

В последние годы несколько подобных «волн тепла», даже с более высокими аномалиями температуры, фиксировались и в дальневосточных морях России. В 2016–2019 гг. резкое и довольно продолжительное потепление произошло в северной части Берингова моря [Басюк, Зуенко, 2019; Stabeno, Bell, 2019; Basyuk, Zuenko, 2020]. В эти годы отклонения ледовитости моря, температуры воздуха и воды на поверхности

моря от среднемноголетних значений превышали 2σ , при этом уровень ледовитости не превышал половины нормы, аномалии температуры воздуха и воды достигали $+15$ и $+3$ °С, полностью разрушилось придонное пятно холодных шельфовых вод в пределах российской экономзоны, Наваринское течение было неустойчивым. Причины этих изменений — преобладание ветров южных румбов на всей акватории не только в летний, но и в зимний период из-за смещения к западу центра Алеутской депрессии, а также усиленная адвекция в Берингово море океанических вод из СВТО, которые и после завершения феномена «The Blob» все еще сохраняли повышенную температуру. Эта «волна тепла» вызвала кардинальные изменения в функционировании экосистемы северной части Берингова моря, в частности активизацию миграций сюда и далее в Чукотское море массовых видов рыб из юго-восточной части моря — минтая и трески.

Влияние экстремальных условий 2016–2019 гг. на состояние восточноберинговоморской популяции минтая, нагуливающейся отчасти в северо-западной части Берингова моря, рассмотрено в работе Айснер с соавторами [Eisner et al., 2020]. Цель настоящей статьи — определить такое влияние на более сложноорганизованный ресурс — беринговоморскую треску, имеющую несколько центров воспроизводства. Для этого, помимо характеристики происходящих в последние два десятилетия изменений условий среды в Беринговом море и динамики запасов трески в российских и американских водах, оценены величины подходов трески аллохтонного происхождения в районы российского промысла и выполнено сравнение межгодовой динамики подходов с вариациями условий среды.

Материалы и методы

Район исследований — северо-западная часть Берингова моря в пределах Западно-Беринговоморской промысловой зоны (рис. 1). На юго-востоке он граничит с экономической зоной США. В период с 1999 по 2021 г. в летние сезоны выполнены учетные донные траловые съемки этого района с дискретностью 1–3 года на следующих научно-исследовательских судах ТИНРО и рыболовных траулерах: НИС «ТИНРО» в августе–октябре 1999 г.; НИС «Профессор Кагановский» в сентябре–ноябре 2001 г.; НИС «ТИНРО» в июле–августе 2002 г.; СРТМ-К «КамчатНИРО-1» в октябре–ноябре 2004 г.; НИС «ТИНРО» в августе–октябре 2005 г.; в июле–августе 2008 г.; в июле–сентябре 2010 г.; НИС «Бухоро» в июле–августе 2010 г.; НИС «Профессор Кагановский» в июле–августе 2012 г.; НИС «ТИНРО» в июне–августе 2015 г.; СТР «Потапово» в мае–июне 2016 г.; НИС «Бухоро» в июне–июле 2017 г.; НИС «Профессор Леванидов» в июле–августе 2019 г.; НИС «Дмитрий Песков» в августе–сентябре 2020 г.; НИС «ТИНРО» в сентябре 2020 г.; НИС «Профессор Кагановский» в августе–сентябре 2021 г. Во всех съемках применялись исследовательский трал ДТ-27,1/24,4 с мешком 8 м и 10-миллиметровой мелкоячейной вставкой и стандартная методика облова и обработки данных [Савин, 2011].

Биомасса трески рассчитана для стандартного полигона, занимающего весь шельф и верхнюю часть континентального склона экономической зоны России к востоку от мыса Олюторского, в пределах которого нагуливается основная часть трески, по данным учетных тралений методом площадей по ячейкам Вороного–Дирихле [Борисовец и др., 2003], с переводом величин улова для каждого траления в плотность распределения с учетом коэффициента уловистости трала:

$$B = \frac{1}{10^6} \sum_{i=\min}^{\max} P_i S_i, \quad (1)$$

где B — биомасса трески, тыс. т; i — номер траления; S — площадь ячейки Вороного–Дирихле, км²; 10^{-6} — коэффициент перевода килограммов в тысячи тонн; P — плотность распределения трески, кг/км²: $P_i = \frac{m_i}{1,852 \cdot v_i \cdot t_i \cdot 0,001 \cdot a \cdot k}$, где m — улов, кг; v — средняя скорость траления, уз; t — время траления, ч; a — горизонтальное раскрытие

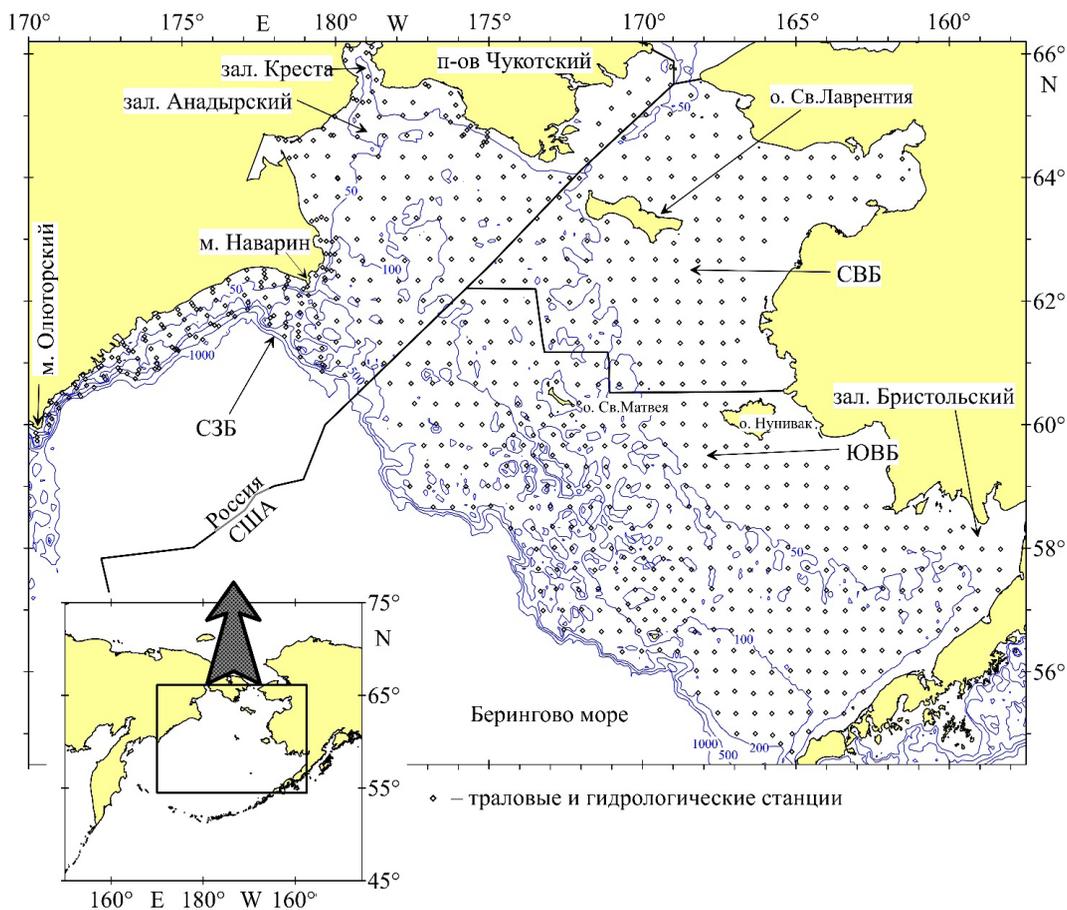


Рис. 1. Схема районов учета запаса трески в Беринговом море: СЗБ — северо-западная, СВБ — северо-восточная, ЮВБ — юго-восточная части Берингова моря

Fig. 1. Scheme of the areas for assessment the stock of pacific cod in the Bering Sea: СЗБ — northwestern Bering Sea, СВБ — northeastern Bering Sea, ЮВБ — southeastern Bering Sea

трала (16,26 м); k — коэффициент уловистости трала, принятый для трески равным 0,4; 1,852 — коэффициент перевода морских миль в километры; 0,001 — коэффициент перевода метров в километры.

Если учетной траловой съемкой был охвачен только олюторско-наваринский шельф, как это было в экспедициях на СРТМ-К «КамчатНИРО-1» в 2004 г., СТР «Потапово» в 2016 г. и НИС «Профессор Леванидов» в 2019 г., то значения учетного запаса были увеличены для приведения к запасу на стандартном полигоне по среднему-го-летнему соотношению биомассы трески в обследованном районе и на всей площади полигона.

Сведения о динамике биомассы трески и ее распределении в восточной части Берингова моря за 1999–2024 гг., полученные по данным ежегодных учетных донных траловых съемок, выполняемых Аляскинским центром рыбохозяйственных исследований Национального управления океанов и атмосферы США (NOAA), заимствованы из научной литературы [Stevenson, Lauth, 2019; Barbeaux et al., 2024].

В ходе учетных съемок ТИНРО на каждой станции выполняли вертикальные зондирования с океанологическими зондами-профилометрами Sea-Bird SBE-25 или SBE-19plus с определением температуры и солености воды. Эти данные были использованы, в частности, для определения площади придонных и подповерхностных вод с отрицательной температурой в пределах северо-западной части Берингова моря.

Рассчитывали площади, занятые водой с отрицательной температурой на глубине 50 м и у дна в пределах экономической зоны России, без учета зал. Креста и прилегающего к нему прибрежного участка. При расчете использована равноплощадная коническая проекция Альберса (Albers Equal Area Conic Projection) со стандартными параллелями 60–65° с.ш., центральной долготой 180° и широтой 63° с.ш.

Поскольку съемки выполнялись не каждый год и в разные сроки, основой для характеристики изменений условий среды послужили более регулярные данные спутникового мониторинга. Для характеристики термических условий использованы месячные данные о температуре поверхности моря с пространственным разрешением 1° (с 2023 г. — 0,25°) из массива Optimum Interpolation Sea-Surface Temperature V2 [Reynolds et al., 2002], доступного на сайте NOAA: <https://www.esrl.noaa.gov/>.

Ежедневные данные о концентрации морского льда получены с сайта <https://nsidc.org/data/nsidc-0081/versions/2>, где под концентрацией понимается доля покрытия морским льдом пикселя изображения, выраженная в процентах [Meier et al., 2021]. При расчетах ледовитости использовали пороговое значение концентрации в 15 %, обычно принимаемое для различения занятой льдом поверхности моря и чистой воды. Для каждого года данные о концентрации осреднены за январь–апрель и с учетом общей площади моря рассчитана среднезимняя ледовитость моря — средняя доля акватории, занятой льдом, относительно всей площади моря, равной 2315 тыс. км² [Фролов, 1971]. Исходя из допущения о сохранении в течение некоторого времени цикличности межгодовых изменений ледовых процессов, разработан прогноз динамики ледовитости с заблаговременностью до 5 лет с применением усовершенствованного преобразования Фурье EDFT (Extended Discrete Fourier Transform, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11020-extended-dft>) [Liepins, 1996]. Оптимальная длина ряда для преобразования Фурье выбрана путем сравнения ошибок прогнозов на 2018–2024 гг. при экстраполяции рядов разной длины: минимальные ошибки (СКО 3–5 % для прогнозов с заблаговременностью 1–3 года) получены для рядов длиной 40–45 лет. Поэтому параметры гармоник в преобразовании Фурье для прогнозирования на 2025–2029 гг. определены для ряда межгодовых вариаций среднезимней ледовитости за 1979–2024 гг. Ошибка такого прогноза на 2025 г. составила 2 % площади моря.

Схемы циркуляции вод для отдельных лет построены с помощью ре-анализа OSCAR (Ocean Surface Current Analysis, https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_NRT_V2). В ре-анализе по данным альтиметрии, а также о приповерхностном ветре и температуре поверхности моря рассчитываются приповерхностные (0–30 м) течения с пространственным разрешением 1/4° [Bonjean, Lagerloef, 2002].

Летом–осенью на северо-западном шельфе Берингова моря нагуливается как треска местных популяций, так и треска, мигрирующая сюда только для нагула, а нерестящаяся — на центральном и восточном шельфах моря. Для оценки вклада мигрантов в суммарную нагульную биомассу, оцениваемую по данным учетных съемок, рассмотрены особенности размерно-возрастного состава трески в уловах. В большинстве случаев он необычен для рыб и отличается повышенной долей крупноразмерных особей в возрасте 4+ и старше, причем это характерно как для численности возрастного состава в уловах конкретных лет, так и для изменений численности рыб конкретного поколения в уловах разных лет, по мере увеличения их возраста (рис. 2). Между тем для рыб типично постепенное убывание с возрастом численности крупных старшевозрастных особей вследствие естественной смертности, что хорошо аппроксимируется степенной функцией вида:

$$N_a = N_t \cdot (1 - M)^{a-t}, \quad (2)$$

где a — возраст; N_a — численность особей в возрасте a ; N_t — численность особей в возрасте t , начиная с которого они хорошо облавливаются тралом (обычно t — возраст наиболее массовой группы в уловах), в данном случае трехлеток; M — годовая смертность.

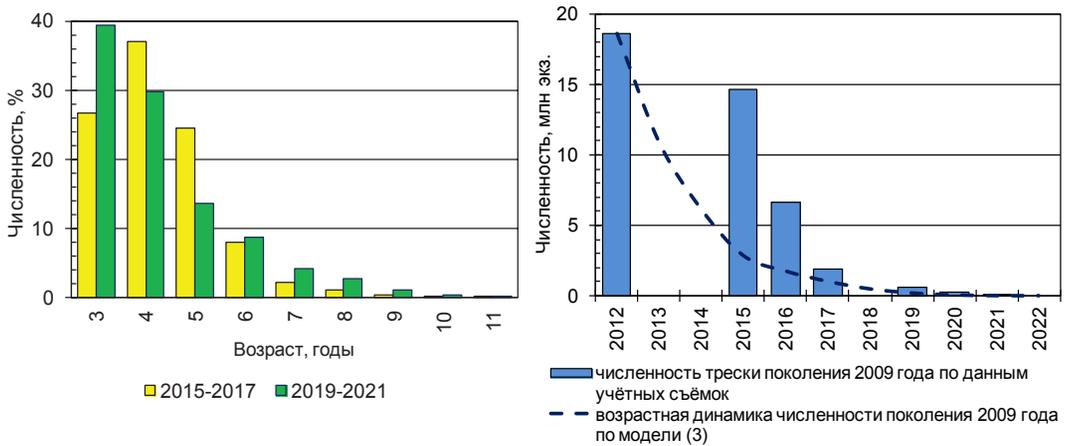


Рис. 2. Средний за 2015–2017 и 2019–2021 гг. возрастной состав трески в уловах траловых учетных съёмов в северо-западной части Берингова моря (слева) и пример возрастной динамики численности поколения трески 2009 г. в этом же районе по данным семи траловых съёмов и по расчетам по модели (3) (справа). Смертность в модели (3) принята по П.В. Тюрину [1972]

Fig. 2. Averaged for 2015–2017 and 2019–2021 age composition of pacific cod in the catches of counting surveys in the northwestern Bering Sea (left) and age dynamics for the year-class 2009 in the same area assessed on the data of seven trawl surveys and calculated with the model (3) (right), 10^6 ind. The coefficients of mortality m in the model (3) are assumed according to P.V. Tyurin [1972]

Для эксплуатируемых популяций, подверженных не только естественной, но и промысловой смертности, которая характеризуется величиной годового вылова C , при анализе годовых изменений численности поколений (когортном анализе) гладкая степенная функция обычно заменяется ступенчатой, используя приближение Поупа [Pore, 1972, цит. по: Бабаян и др., 1984]. В таком случае изменение численности поколения от года i к году $i+1$:

$$N_i = N_{i+1} \cdot e^m + C_i \cdot e^{(m/2)},$$

откуда

$$N_{i+1} = N_i \cdot e^{-m} - C_i \cdot e^{-(m/2)}, \quad (3)$$

где N_i, N_{i+1} — численность особей в годы i и $i+1$; C_i — годовой вылов в год i ; m — коэффициент смертности, находящийся с годовой смертностью M в соотношении $M = (1 - e^{-m})$.

Несоответствие реальной возрастной динамики численности поколений трески в уловах траловых съёмов в северо-западной части Берингова моря теоретической степенной кривой, тем более с учетом вылова, связано с включением в общий нагульный запас трески старших возрастов, не воспроизводящейся в этом районе, а массово мигрирующей сюда на нагул. Если учтенный запас трески определенного возраста представляет собой сумму трески местной популяции и мигрантов, то для каждого возраста численность «местной» трески может быть рассчитана когортным методом по уравнению (3), а вклад мигрантов определяется как остаток D в суммарной численности поколения:

$$S_{i+1} = N_i \cdot e^{-m} - C_{iN} \cdot e^{-(m/2)} + D_{i+1} - C_{iD} \cdot e^{-(m/2)}, \quad (4)$$

где S_{i+1} — суммарная численность поколения по данным учетной съёмки в год $i+1$; N_i, N_{i+1} — вклад в суммарную численность численности рыб местной популяции в году i ; D_{i+1} — вклад в суммарную численность в год $i+1$ мигрантов, численность которых не связана с их численностью в предыдущий год; C_{iN}, C_{iD} — вклады рыб местной популяции и мигрантов в вылов в год i .

В уравнении (4), помимо величины S_{i+1} , известна величина $C_i = C_{iN} + C_{iD}$ (вклады разных популяций в улов полагаем пропорциональными их вкладам в общую численность), а величина m задается параметрически (в данной работе использованы результаты определений смертности трески, выполненных по методике П.В. Тюрина [1972], согласно

которым m меняется в зависимости от возраста от 0,34 ($M = 0,29$) для 4–5-леток до 1,85 ($M = 0,84$) для 12-леток). В общем виде решение уравнения (4) не может быть найдено, так как оно содержит более одного неизвестного. Однако если объединить несколько таких уравнений за все годы жизни поколения в систему, то неопределенность решений сильно уменьшается, так как D ни в каком году не может иметь отрицательного значения, а все значения N находятся на одной квазиэкспоненциальной кривой (3).

Как правило, подстановка $D_3 = 0$ приводила к расчетным отрицательным значениям D (т.е. $N > S$) для какого-нибудь из старших возрастов, что означает, что даже у трехлеток трески не весь запас на полигоне формируется местной популяцией, но и среди них присутствуют мигранты, хотя и не в таком количестве, как среди более старших рыб. Поэтому в рядах возрастной динамики численности каждого поколения выбирали один из старших возрастов с относительно малой численностью (обычно это 8–9–10-летки) и задавали для него минимально возможное значение $D = 0$, что позволяло определить значение $N = S$ для этого возраста, и далее по уравнению (3) рассчитывали значения N для всех других возрастов и определяли значения D в остальные годы жизни поколения как остаточные члены уравнения $N + D = S$. Такому анализу были подвергнуты поколения трески начиная с 1995 и заканчивая 2015 годом выклева (для поколений более поздних годов рождения восстановить квазиэкспоненциальную динамику численности за все годы жизни пока невозможно). Полученные таким образом оценки D для разных лет являются минимальными оценками численности мигрантов, а оценки N — максимальными оценками численности автохтонной популяции.

Индекс относительной численности поколений трески местной популяции N_t определяли как численность трехлеток в пределах полигона за вычетом трехлеток-мигрантов. Такие оценки сделаны для поколений 1993–2015 годов выклева, для которых удалось восстановить возрастную динамику численности.

Вклад местной трески и мигрантов в учетную численность трески в пределах полигона определяли для всех лет съемок по 2019 г. включительно суммированием величин N и D всех поколений в возрасте от 3 лет, присутствовавших в уловах в эти годы. Отмечено, что возрастная структура трески, мигрирующей в северо-западную часть Берингова моря на нагул, сильно отличалась от возрастной структуры местной популяции: в отличие от местной трески, численность которой с возрастом убывала, среди мигрантов преобладали 4–5-летки. Соотношение этих групп трески в суммарном запасе оценивали путем пересчета численности в биомассу, используя среднесноголетние данные о массе особей трески в зависимости от возраста [Савин, 2023], без учета возможных межпопуляционных различий.

Статистическую значимость трендов и корреляционных связей оценивали методом «нулевой гипотезы».

Результаты и их обсуждение

Динамика запаса трески в российской зоне и его популяционного состава

Популяционная структура трески Берингова моря формируется изоляцией по расстоянию, при которой особи из ближайших районов нереста более генетически сходны, чем особи из отдаленных районов. В настоящее время в пределах моря выделяются две генетические группы трески: группа, обитающая на обширной акватории, включающей юго-восточную часть Берингова моря, воды у восточных Алеутских островов и западную часть зал. Аляска (при этом треска этой группы имеет существенные генетические отличия от трески с восточных нерестилищ зал. Аляска), и группа, обитающая на северо-западном шельфе моря, вплоть до подводного каньона Первенец [Cunningham et al., 2009; Spies, 2012; Drinan et al., 2018; Spies et al., 2020; Shotwell et al., 2023; Varbeaux et al., 2024]. Большая часть ареала второй группы находится в российских водах. При этом треска первой группы частично также нагуливается в российских водах, совершая для этого протяженные нагульные миграции. Следует отметить, что

представленная популяционная структура является предварительной и, возможно, с накоплением новых данных будет расширяться и усложняться. В частности, перспективны для выделения в обособленные популяции группировка трески, обитающей у о. Богослов в восточной части Алеутской гряды, и треска, нерестящаяся в районе мыса Олюторского, нагульные скопления которой удерживаются в этом же районе. В северо-восточной части Берингова моря, севернее о. Нунивак, крупных скоплений трески не обнаруживалось вплоть до последнего десятилетия. Произошедшее во второй половине 2010-х гг. потепление открыло для ее нагула обширные мелководья на севере моря, более того, треска начала мигрировать через них к берегам Чукотки, в Берингов пролив и даже в Чукотское море, где ранее никогда не отмечалась [Орлов и др., 2020].

В российских водах северо-западной части Берингова моря запас трески колеблется в весьма широких пределах. Согласно оценкам, сделанным по материалам траловых съемок, в конце 1960-х гг. запас увеличился с 66,46 (1966 г.) до 282,56 тыс. т (1970 г.), но значительная промысловая нагрузка на стадо в 1970–1974 гг. при малочисленном пополнении вызвала перелом и резкое снижение нерестового запаса до 24,50 тыс. т в 1977 г. с последующим восстановлением к 1980 г. до 108,13 тыс. т [Вершинин, 1987]. В 1980–1990-е гг. отмечены три волны роста, когда нерестовый запас трески достигал 344,04 тыс. т (1984 г.), 463,13 (1991 г.) и 561,58 тыс. т (1996 г.) при локальных минимумах 234,12 тыс. т в 1987 г. и 371,33 тыс. т в 1993 г. [Савин, 2023].

В последующие два десятилетия наблюдалась тенденция к росту биомассы трески в этом районе. Если в 1999–2002 гг. ее оценки по данным учетных съемок колебались в пределах 63–111 тыс. т, а в 2004–2012 гг. увеличились до 314–654 тыс. т, то с 2015 по 2017 г. произошел стремительный рост с 814 до 1227 тыс. т. Но в последние годы происходит снижение со 1107,77 тыс. т в 2019 г. и 598,66 тыс. т в 2020 г. до 270,35 тыс. т в 2021 г. (рис. 3).

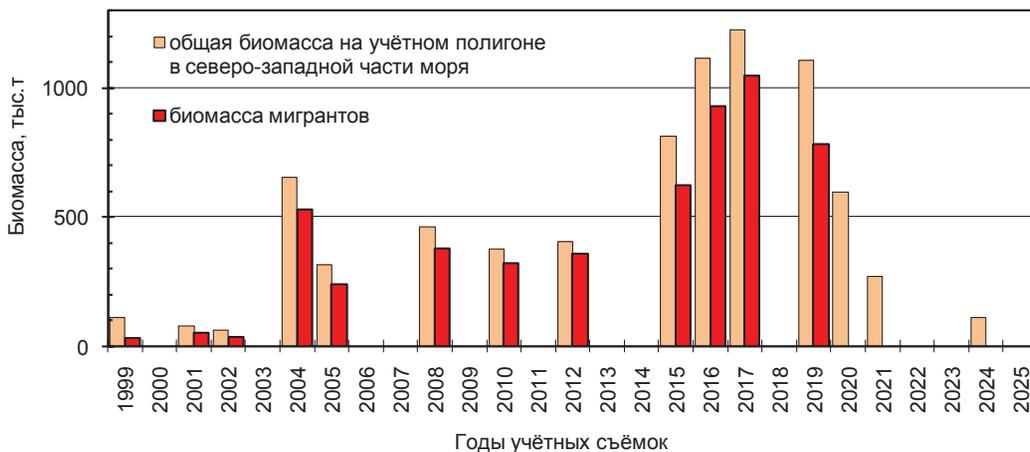


Рис. 3. Динамика общей биомассы трески в северо-западной части Берингова моря по данным донных траловых съемок. Для периода до 2019 г. оценен вклад мигрантов

Fig. 3. Dynamics of total biomass for feeding pacific cod in the northwestern Bering Sea, on the data of bottom trawl surveys, 10^3 t. The portion of migrants is estimated until 2019

Следует особо подчеркнуть, что столь значительного и быстрого увеличения биомассы трески на северо-западе моря, как в 2016–2019 гг., которое может быть обусловлено только массовыми миграциями вида в этот район из юго-восточной части моря, в предыдущие десятилетия не наблюдалось.

Доля трески, пришедшей на нагул в северо-западную часть Берингова моря из-за ее пределов, во все годы, для которых удалось это оценить, составляла большую часть нагульных скоплений (в 1999–2015 гг. в среднем 79 %, в 2016–2019 гг. до 91 % по биомассе). Поэтому динамика общей нагульной биомассы в этом районе повторяла динамику биомассы мигрантов ($r = 0,99$), т.е. напрямую зависела от нее (рис. 4). Столь

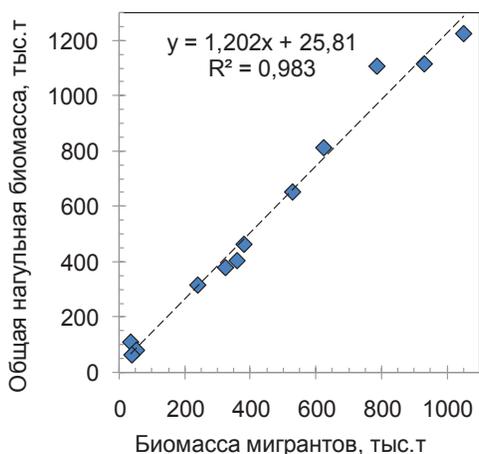


Рис. 4. Зависимость общей биомассы трески в возрасте от 3 лет в северо-западной части Берингова моря от биомассы мигрантов по данным донных траловых съемок 1999–2019 гг.

Fig. 4. Dependence of the total biomass for pacific cod of age 3 years and more in the northwestern Bering Sea on the biomass of migrants, on the data of bottom trawl surveys in 1999–2019, 10^3 t

тесная зависимость дает основание полагать, что рост биомассы во второй половине 2010-х гг. был обусловлен усилением миграций трески в северо-западную часть моря с восточноберингоморского шельфа.

Значительные различия пространственных распределений трески в зависимости от условий среды можно видеть на примере «холодного» 2010 и «теплого» 2017 гг. (рис. 5). Летом 2010 г. придонный слой почти всей средней области шельфа от п-ова Аляска до Анадырского залива и вся северо-восточная часть моря были заняты холодной водой с температурой < 2 °С. В этих условиях треска восточноберингоморской популяции нагуливалась в основном в Бристольском заливе и на внешнем шельфе южнее о-вов Прибылова, а севернее 60° с.ш. ее концентрации были очень низкими. В 2017 г., напротив, биомасса трески была пониженной на среднем и внешнем шельфах в юго-восточной части моря, но высокой на северном шельфе, особенно в бассейне Чирикова и к югу от о. Святого Лаврентия. Условный «центр биомассы» трески в теплые годы, как правило, находился севернее, чем в холодные, а в 2010 и 2017 гг. такой центр занимал соответственно наиболее южное и наиболее северное положение. При этом плотные скопления трески, обнаруженные в 2017 г. на крайнем севере Берингова моря, состояли из зрелых взрослых особей, что является дополнительным признаком того, что они были сформированы мигрантами, потому что дальние миграции свойственны взрослой треске.

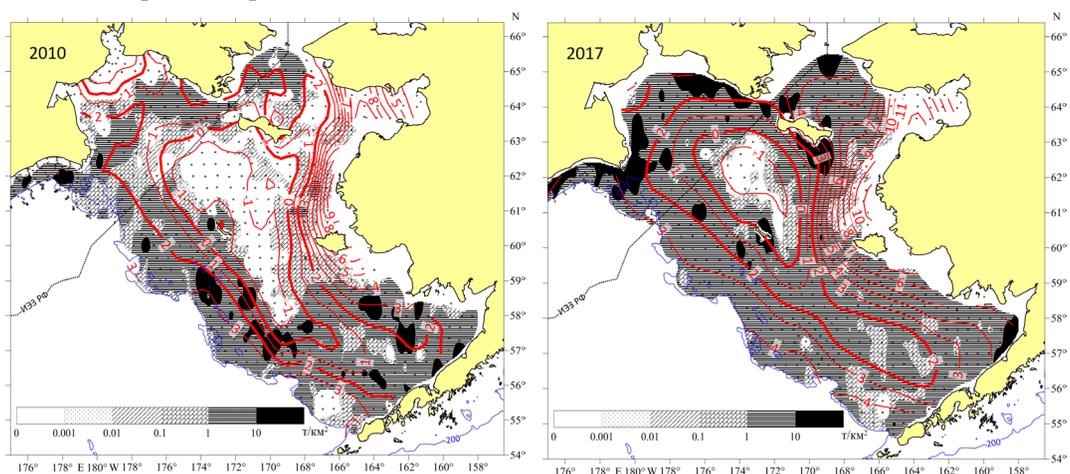


Рис. 5. Примеры распределения трески в Беринговом море по результатам летних съемок 2010 и 2017 гг. Точками показаны траления, изолиниями — температура воды у дна, °С

Fig. 5. Examples of pacific cod distribution in the Bering Sea on the data of summer surveys in 2010 and 2017, t/km². Dots — sites of trawling; isolines — water temperature at the sea bottom, °С

Решающий вклад мигрантов в динамику нагульных скоплений в районе совместного нагула двух популяций трески не исключает того, что запас трески местной популяции имеет собственную динамику, обусловленную вступлением в него и соматическим ростом рыб малочисленных либо высокочисленных поколений. За 1995–2012 гг. отмечены три периода улучшения воспроизводства западноберингоморской популяции и три периода его ухудшения (рис. 6). Однако даже наиболее многочисленные поколения 2010 и 2015 гг. (индексы численности 32,6 и 35,5 млн экз.), в массе представленные в уловах учетных съемок 2015–2019 гг., на фоне усиления дальних миграций значительно уступали по численности ровесникам-мигрантам, составляя не более 20 % численности 4–5-леток в уловах этих лет. Можно сделать вывод, что динамика автохтонного запаса не оказывала существенного влияния на тенденции в изменениях общих нагульных скоплений трески в северо-западной части Берингова моря. Вместе с тем колебания численности местной трески могли сглаживать или, наоборот, обострять флюктуации численности мигрантов. Так, в условиях резкого ослабления миграций в начале 2020-х гг. ресурс трески северо-западной части Берингова моря сохранил свое промысловое значение благодаря высокой численности автохтонного поколения 2015 г. и, возможно, нескольких последующих лет (для которых индексы численности поколений пока не определены).

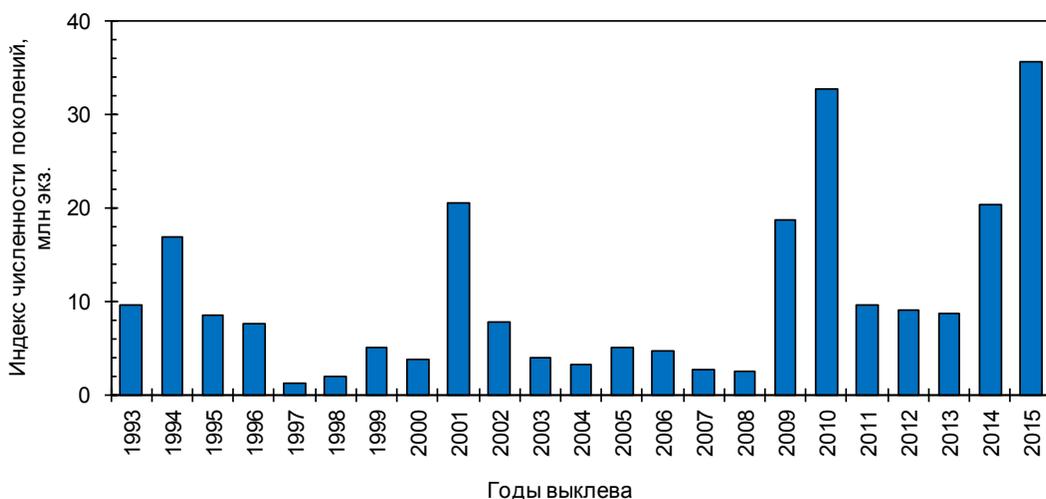


Рис. 6. Динамика индекса численности поколений местной популяции трески северо-западной части Берингова моря

Fig. 6. Dynamics of year-class strength for the local population of Pacific cod in the north-western Bering Sea, 10⁶ ind.

Динамика океанологических условий в северо-западной части Берингова моря

Ежегодное образование морского льда является важным фактором, влияющим на физическую и биологическую среду на севере Берингова моря [Stabeno et al., 2012a, b]. В условиях высокой/низкой ледовитости в деятельном слое моря формируются устойчивые отрицательные/положительные температурные аномалии, влияющие на распределение плотности морской воды, а следовательно, и на стратификацию, циркуляцию и перемешивание вод. При этом ледовитость весьма изменчива, периоды малой ледовитости чередуются с холодными, ледовитыми периодами, что связано с колебаниями положения центра Алеутского минимума таким образом, что смещение центра на запад приводит к росту повторяемости над акваторией моря южных ветров, а на восток — северных ветров. Баланс этой колебательной системы сильно нарушился во второй половине 2010-х гг. из-за усиления Гавайского антициклона вследствие общего разогрева тропосферы и интенсификации макромасштабной циркуляционной ячейки, транспортирующей воздух из экваториальной зоны в субтропическую. Гребень антициклона распространился на Аляску и оттеснил Алеутскую депрессию к западу

настолько, что в некоторые годы ее центр смещался на Камчатку [Басюк, Зуенко, 2019]. Эти макропроцессы обусловили резкое потепление среды в Беринговом море. Так, в зимы 2017–2018 гг., когда центр Алеутского минимума располагался над Камчаткой, западная половина Берингова моря была занята ложбиной низкого давления, по которой происходила мощная адвекция теплого воздуха на север моря и Чукотский полуостров, что привело к формированию аномалий температуры воздуха до +10...+15 °С в среднем за месяц и радикально изменило теплообмен между морем и атмосферой: поверхностный слой моря зимой менее выхолаживался, лед не образовывался, зимняя конвекция не развивалась. В последние годы наблюдаются релаксация климатической системы, возврат ее к обычному состоянию и, соответственно, похолодание в Беринговом море. Поэтому после резкого уменьшения ледовитости до экстремально низкого, ранее никогда в современной эпохе не наблюдавшегося среднезимнего значения около 10 % площади моря в 2018 г. с 2020 г. ледовитость вновь приблизилась к среднемноголетней норме (рис. 7).

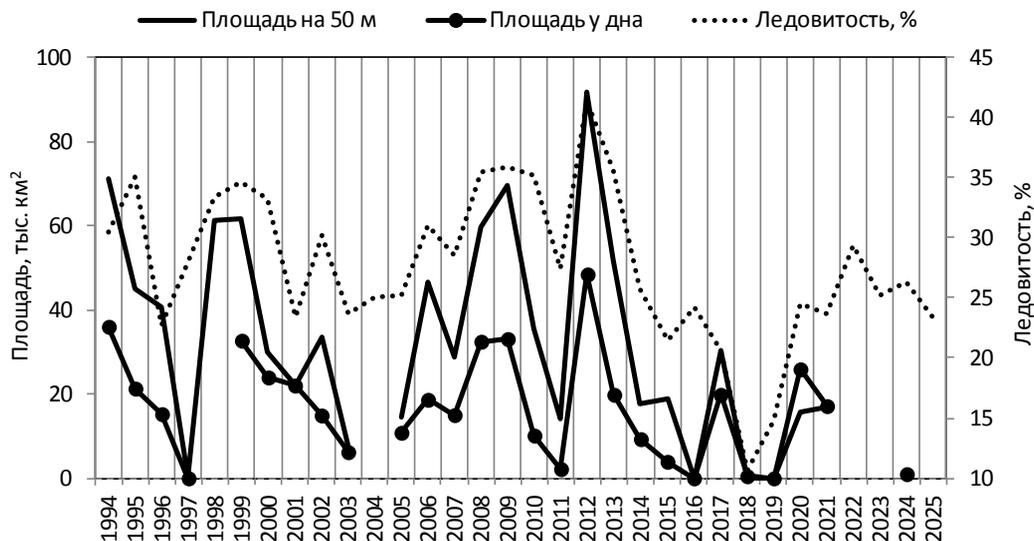


Рис. 7. Межгодовая динамика средней за январь-апрель ледовитости Берингова моря и площади холодного (< 0 °С) пятна на горизонте 50 м и у дна в пределах исключительной экономической зоны России по данным океанологических съемок в августе-сентябре

Fig. 7. Interannual dynamics of the ice cover in the Bering Sea averaged for January-April (%) and the area of cold water pool (10³ km² with temperature < 0 °С) at the sea bottom and at the 50 m depth within EEZ of Russia on the data of oceanographic surveys in August-September

Другие океанологические характеристики на северо-западе Берингова моря, в том числе и в теплую часть года, в значительной мере определяются последствиями процесса льдообразования. Одним из важнейших элементов летней структуры вод является область с холодной придонной водой (Лаврентийское холодное пятно (ЛХП)), которая простирается с севера на юг посередине восточоберингоморского шельфа (между изобатами 50–100 м, с ядром на 60–80 м), заходя и в Анадырский залив [Kinder, Shumacher, 1981; Зуенко и др., 1998; Wyllie-Echeverria, Wooster, 1998]. В теплые, малоледовитые годы ЛХП с температурой ниже 2 °С ограничивается северной частью шельфа, распространяясь на юг лишь примерно до о. Св. Матвея, в то время как в холодные годы оно может простираться почти до п-ова Аляска [Stevenson, Lauth, 2012]. Меняется от года к году, причем в строгой корреляции с ледовитостью в предшествующие зимы, и площадь западного выступа ЛХП, находящаяся в пределах экономзоны России (рис. 7).

В северо-западной части Берингова моря имеется собственное, локальное ядро холодной придонной воды, располагающееся в окрестностях зал. Креста, которое, в отличие от ЛХП, имеет высокую соленость [Зуенко и др., 1998; Гладышев, Хен, 1999]. Формируемый им градиент плотности обеспечивает развитие потока относительно

«теплой» воды от мыса Наварин на север поперек шельфа и далее вдоль побережья Чукотского полуострова в направлении Берингова пролива — Наваринского течения, которое огибает ЛХП с запада и может разрушать его [Kinder et al., 1986; Хен, 1999]. Сила и направление потока Наваринского течения меняются в зависимости от распределения плотности воды на шельфе, а также под действием преобладающих ветров (рис. 8). В условиях, складывающихся после малоледовитых зим (см. пример для 2017 г.), интенсифицировались потоки северных, северо-западных направлений вдоль шельфа, склона и в центральной части моря: теплые океанические воды активно вторгались на акваторию моря через Алеутские проливы и распространялись далее на север, усилились Берингоморское склоновое течение и перенос вод на север вдоль берегов Аляски, Наваринское течение формировалось на большем удалении от мыса Наварин. Но при этом слабое развитие высокоплотной водной массы в северной части Анадырского залива в такие годы не способствовало устойчивости Наваринского течения, и при прекращении действия южных ветров оно быстро слабело и могло даже повернуть вспять [Basyuk, Zuenko, 2020].

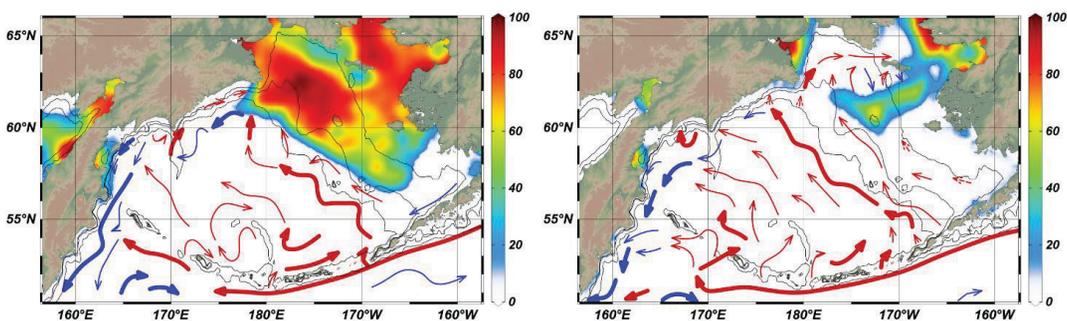


Рис. 8. Примеры циркуляции вод Берингова моря в апреле-июне 2010 г. (слева) и 2017 г. (справа): *жирные линии* — струи течений со скоростью выше 10 см/с; *тонкие линии* — со скоростью 5–10 см/с; *пунктир* — преобладающие направления слабых течений. Относительно теплые потоки окрашены в *красный цвет*, относительно холодные — в *синий*. Цветовая шкала показывает концентрацию льда (%) на 30 апреля. Проведены изобаты 50, 100 и 1000 м

Fig. 8. Examples of water circulation in the Bering Sea in April-June of 2010 (**left panel**) and 2017 (**right panel**). The currents with velocity > 10 cm/s are shown by *bold lines*, with velocity 5–10 cm/s — by *thin lines*, weak currents — by *dotted lines*; warm currents are colored in *red*, cold currents — in *blue*; the sea ice percent concentration on April 30 is shown by color scale; the isobaths of 50, 100 and 1000 m are drawn

Поскольку все показатели океанологических условий в северо-западной части моря прямо или косвенно связаны с интенсивностью льдообразования в предшествующую зиму, они не являются независимыми и влияние условий среды на динамику запасов трески можно рассмотреть на примере любого из них. Лучшее обеспечение данными наблюдений такой показатель, как температура поверхности моря, за которой ведется постоянный спутниковый мониторинг. Предварительно был определен наиболее информативный по отношению к запасу трески сезон и район измерений температуры. Район локализован на бровке шельфа к юго-востоку от мыса Наварин (63–65° с.ш. 178° в.д. — 177° з.д.), где и находятся основные нагульные скопления трески (рис. 9). Самый высокий коэффициент линейной корреляции между межгодовыми изменениями температуры и запаса трески ($r = 0,83$) получен для средней по этому району температуры поверхности моря в августе. При ближайшем рассмотрении связь оказалась нелинейной: в условиях низких летних температур численность и биомасса нагульной трески в пределах северо-западной части моря относительно стабильны и слабо реагируют на их межгодовые флюктуации, а при повышении температуры свыше 10 °C ее рост сопровождается быстрым увеличением запаса трески (рис. 10). Аппроксимация связи полиномом второй степени увеличивает оценку ее тесноты до $r = 0,88$.

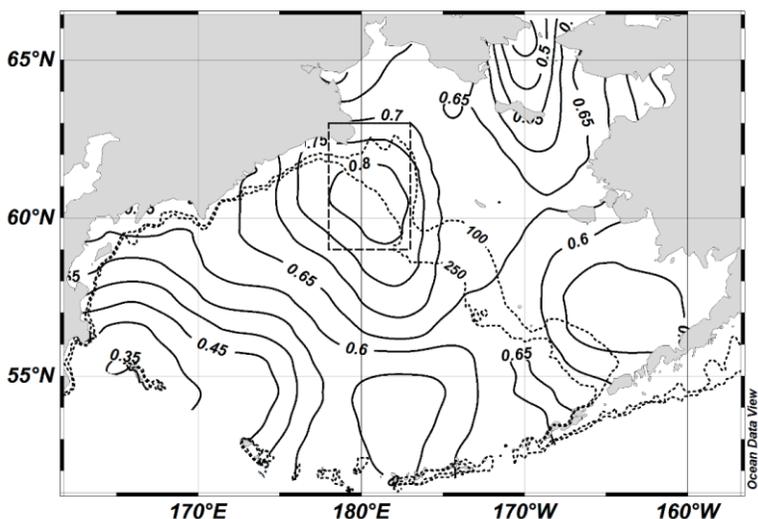


Рис. 9. Величины коэффициентов линейной корреляции между межгодовыми изменениями температуры поверхности моря в узлах одноградусной сетки в августе и общей биомассой нагульной трески в северо-западной части моря по данным донных траловых съемок. Нанесены изобаты 100 и 250 м. Пунктиром выделен выбранный для анализа полигон осреднения температуры с наибольшей корреляцией

Fig. 9. Coefficients of linear correlation between interannual variations of SST in knots of 1-degree grid in August and total stock of feeding pacific cod in the northwestern Bering Sea by the data of bottom trawl surveys. The isobaths of 100 and 250 m are shown. The area with the highest correlation is outlined and SST averaged within this area is used for the dependence analysis

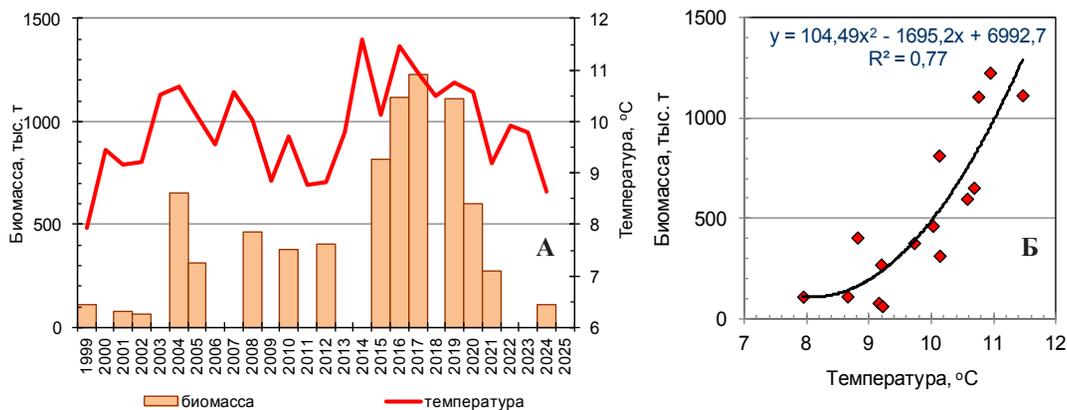


Рис. 10. Межгодовая динамика средней по информативному району температуры поверхности моря в августе и биомассы трески в северо-западной части Берингова моря по данным донных траловых съемок (А) и аппроксимация зависимости биомассы от температуры поверхности моря полиномом второй степени (Б)

Fig. 10. Interannual dynamics of SST in August averaged within the area outlined at Fig. 9 (°C) and the total biomass of pacific cod in the northwestern Bering Sea by the data of bottom trawl surveys (10^3 t) (А) and the biomass dependence on SST approximated by a second degree polynomial (Б)

Статистические связи динамики запаса трески с межгодовыми изменениями других показателей океанологических условий (ледовитости, площади ЛХП, придонной температуры и т.п.) также статистически значимы, но менее тесные, вероятно, из-за более низкого качества исходных данных.

Как можно видеть на графике изменений температуры поверхности моря на рис. 10, потепление до максимальных значений произошло в северо-западной части Берингова моря еще в 2014 г., однако в том году учетная съемка не проводилась. Но съемки 2016, 2017 и 2019 гг. прошли в условиях продолжающейся «волны тепла» и в полной

мере отразили ее последствия для распределения трески: во все эти годы нагульные скопления трески на северо-западе моря оценены рекордными величинами — свыше 1,1 млн т. На основании тесных и значимых статистических связей, представленных выше, можно уверенно полагать, что основу этих скоплений составили мигранты из восточной части моря и активизация дальних нагульных миграций трески связана с потеплением северо-западной части моря.

Анализ связи динамики запаса трески в северо-западной части Берингова моря с состоянием восточноберингоморской популяции и океанологическими условиями

Притом что нагульные скопления в северо-западной части Берингова моря в значительной части формируются мигрантами восточноберингоморского происхождения и изменения запаса трески в юго-восточной части моря и биомассы мигрантов в российских водах происходят сходным образом (рис. 11), связь межгодовых изменений этих величин статистически незначима ($r^2 = 0,29, p > 0,05$). Резко ухудшают качество связи случаи усиления миграций, что положительно сказывается на обилии трески в пределах экономзоны России, но имеет негативные последствия для запаса на американском шельфе. Наиболее яркий пример такого перераспределения наблюдался в 2017–2018 гг., когда запас в юго-восточной части моря снизился примерно вдвое из-за того, что половина трески нагуливалась на северо-западе и севере Берингова моря [Stevenson, Lauth, 2019]. Это означает, что динамика биомассы смешанных скоплений трески в районе совместного нагула не определяется полностью состоянием местной популяции или более крупной восточноберингоморской, откуда приходят мигранты, а зависит от характера перераспределения ресурса под влиянием условий среды. Вместе с тем в годы, когда миграции особей восточноберингоморской популяции на северо-запад не столь активны, как это было в 2005–2012 гг., миграция части трески на нагул в северо-западные и северные районы моря не оказывает существенного влияния

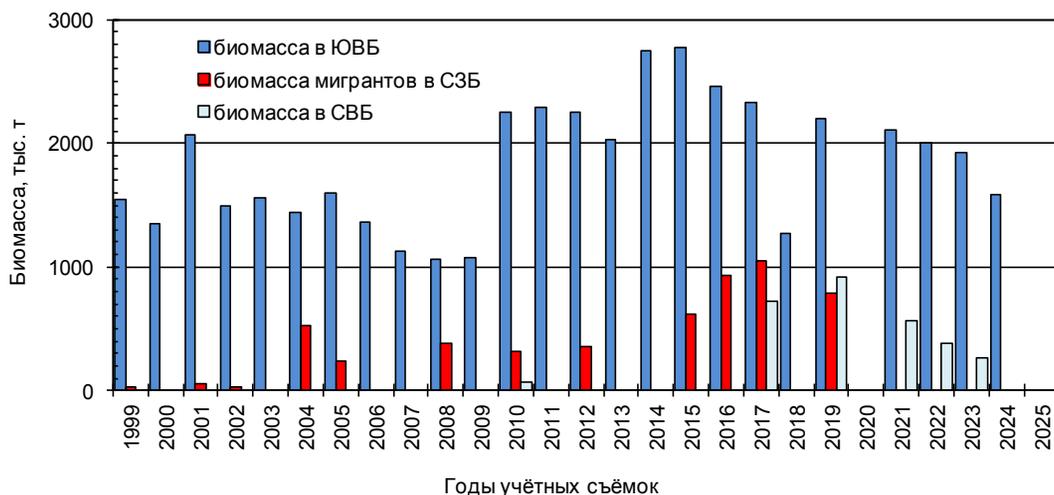


Рис. 11. Динамика запаса трески в юго-восточной части Берингова моря (ЮВБ, по данным траловых съёмки NOAA) и биомассы мигрантов в северо-западную (СЗБ, по данным траловых съёмки ТИНРО до 2019 г. с исключением из учтенной биомассы доли местной популяции) и северо-восточную часть моря (СВБ, по данным эпизодических траловых съёмки NOAA). Запасы рассчитаны с применением к данным российских и американских съёмки единого коэффициента уловистости $k = 0,4$. Схема районирования приведена на рис. 1

Fig. 11. Dynamics of the pacific cod stock in southeastern Bering Sea (IUBB, on the data of NOAA trawl surveys) and the biomass of migrants to the northwestern Bering Sea (C3B, on the data of TINRO trawl surveys until 2019, excluding the biomass of local population from the total assessed stock) and to the northeastern Bering Sea (CBB, on the data of sporadic NOAA trawl surveys). All stocks are assessed using a common coefficient of catchability $k = 0.4$. See the zoning at Fig. 1

на оценки запаса восточноберинговоморской популяции, поскольку «в норме» лишь 10–15 % нагульной трески покидает юго-восточную часть моря.

Явление усиления северных миграций рыб в условиях потепления моря хорошо известно, в современный период потепления этот эффект, называемый иногда «бореализацией», зарегистрирован для многих видов [Fosshem et al., 2015; Baker, 2021; Husson et al., 2024; и др.]. В Беринговом море «бореализация» в условиях «волны тепла» 2016–2019 гг. затронула доминирующий вид ихтиофауны — минтай, причем значительная часть его запаса, обычно нагуливающегося вблизи районов воспроизводства — в южной части восточноберинговоморского шельфа, мигрировала не только на северо-запад, но и на северо-восток моря, а частично даже в Чукотское море [Eisner et al., 2020; Буслов, Овсянников, 2022]. Как и для минтая, и ряда других видов рыб, фактором среды, влияющим на пути и пределы миграций нагульной трески в Беринговом море, обычно считаются конфигурация и общая площадь Лаврентийского холодного пятна [Johnson et al., 2022; Савин, 2023; DeFilippo et al., 2023]. Действительно, избегание треской этой водной массы вполне очевидно (см. рис. 5). В годы наиболее активных миграций (2017–2019) ЛХП занимало минимальную площадь, а в последние годы оно вновь увеличилось [Keagney, 2022], что совпало с ослаблением подходов трески в северо-западную часть моря. Однако каков механизм избегания? Сомнительно, что эти холодные воды создают физическое «препятствие» для миграций трески с юго-востока моря на северо-запад, ведь разница в температуре между участками с плотными скоплениями и участками отсутствия трески ничтожна. Кроме того, такого препятствия с восточной стороны от ЛХП вообще нет, но треска с юго-восточных нерестилищ более активно мигрирует на северо-запад моря, чем на северо-восток. Поскольку рассматриваемые миграции трески — нагульные, их целью является доступ к кормовым ресурсам, основу которых для этого хищника составляют крупный зоопланктон и его потребитель — минтай. По-видимому, из-за суровых условий популяции неритического зоопланктона на северном беринговоморском шельфе немногочисленны, и основу кормовой базы рыб в летне-осенний сезон, на которой нагуливаются виды-мигранты, составляют глубоководные копеподы *Eucalanus bungii* и *Neocalanus cristatus*, а прежде всего эвфаузииды *Thysanoessa inermis*, выносимые на шельф с юго-восточного континентального склона Беринговоморским течением [Gibson et al., 2013; Зуенко, Басюк, 2017]. При усилении этого течения повышается вынос эвфаузиид в Наваринский район: соответственно, нагул минтая и трески отчасти сдвигается на северо-запад. Заметим, что одновременно развивается поток на север вдоль побережья Аляски, что позволяет минтаю и треске нагуливаться и там. Предполагая такой механизм нагульных миграций, можно ожидать, что факторы среды, влияющие на активность миграций, должны отражать особенности циркуляции вод.

Почему же тогда распределение нагульной трески в разные годы стремится соответствовать особенностям конфигурации Лаврентийского холодного пятна? Как выяснилось, в статистическом смысле численность мигрантов, нагуливающих летом в северо-западной части моря, значимо и тесно зависит не только от площади ЛХП, но и от температуры воды на придонных, подповерхностных и поверхностных горизонтах (см. рис. 10) и даже от ледовитости моря в зимний сезон. Однако, если рассмотреть причинно-следственные связи между этими факторами, можно увидеть, что режимформирующие процессы на этой акватории происходят зимой (их индикатором является ледовитость), а все летние процессы — их последствия, поэтому летние показатели среды не являются независимыми. В частности, размер и форма ЛХП летом определяются степенью охлаждения вод на шельфе предыдущей зимой и степенью размывания образовавшегося зимой холодного пятна струями относительно теплых вод, вторгающихся на шельф с юга. Эти вторжения могут иметь бароклинную либо баротропную природу. И Наваринское течение, размывающее западную периферию ЛХП, и Аляскинское, огибающее его с востока, в основном бароклинные. Первое обусловлено градиентом плотности между холодными и солеными донными шельфовыми

ми водами на севере Анадырского залива и менее плотными (особенно после теплых зим) водами ЛХП, но в некоторые годы с необычной атмосферной циркуляцией (как в 2017–2018 гг.) ему содействуют преобладающие южные ветра [Basyuk, Zuenko, 2020]. Второе развивается на градиенте плотности между распресненными прибрежными и более солеными морскими водами, но оно менее устойчивое и обычно становится заметным только близ Берингова пролива за счет сильного распреснения прибрежной зоны стоком р. Юкон. В 2017–2018 гг. это течение также значительно усилилось под действием южных ветров и прослеживалось на всем протяжении аляскинского шельфа. Иными словами, течения на шельфе Берингова моря летом одновременно формируются неоднородностями поля плотности зимнего происхождения (их бароклинные компоненты) и сами формируют конфигурацию таких неоднородностей, как ЛХП (благодаря вкладу баротропных компонент), но главное — переносят зоопланктон из глубоководной части моря на шельф. Потому границы ЛХП повторяют очертания течений, вторгающихся на шельф, а треска в своих нагульных миграциях следует путями переноса на шельф крупного зоопланктона, прежде всего эвфаузиид, т.е. трекам тех же течений. Общая активность нагульных миграций, по-видимому, регулируется главным потоком, выносящим эвфаузиид из района их воспроизводства у восточно-берингоморского континентального склона, — Берингоморским течением, мерой интенсивности которого может служить температура поверхности моря к юго-востоку от мыса Наварин. Этим объясняется показанная выше тесная связь межгодовой динамики этого показателя с динамикой нагульного запаса трески, притом что треска является не эпипелагическим, а придонным видом.

Массовые миграции трески в российскую исключительную экономическую зону на северо-запад Берингова моря в периоды потепления заметно увеличивают численность летних нагульных скоплений, что позволяет существенно нарастить годовой вылов. Напротив, похолодание вызывает необычно быстрое для долгоживущих видов рыб снижение запаса трески в северо-западной части моря, что требует резкого уменьшения квот на вылов этого вида для добывающих предприятий и вносит определенную дезорганизацию в работу флота. Аналогичная динамика запаса в северо-западной части Берингова моря со снижением в периоды похолоданий и ростом в теплые годы отмечена и для минтая [Глубоков, Норвилло, 2002; Поляничко, Кузнецов, 2022]. Таким образом, для двух важнейших промысловых видов динамика доступного российскому промыслу запаса обусловлена не столько процессами их воспроизводства и смертности, в том числе промысловой, сколько условиями трансграничных миграций.

В последние годы в Беринговом море происходит процесс релаксации климатической системы с некоторым похолоданием, что проявилось в росте ледовитости, снижении температуры воды, увеличении площади ЛХП. Однако процесс глобального потепления продолжается, и в ближайшие годы ожидается смена тенденции на потепление (рис. 12), а в недалеком будущем может произойти и повторение аномальных условий «волны тепла», с новым усилением массовых миграций трески на север моря [Overland, Wang, 2025]. Выявленные закономерности реакции трески на такие изменения условий среды позволяют более оптимально использовать меняющийся промысловый ресурс, а именно своевременно увеличивать квоту вылова в российской экономической зоне, осваивая растущий трансграничный приток мигрантов, и столь же своевременно и быстро уменьшать ее при ослаблении миграций.

Потепление в Беринговом море обусловило не только перераспределение запаса восточнберингоморской трески в пределах ее традиционного ареала, но и освоение этим видом новых районов нагула. Молодь трески получила доступ к обширному мелководному шельфу к северу от о. Нунивак, что в перспективе может способствовать улучшению воспроизводства и росту запаса восточнберингоморской популяции. Взрослые особи трески, способные к дальним нагульным миграциям, освоили новый маршрут — через аляскинский шельф к берегам Чукотки (на север Анадырского залива, в бассейн Чирикова и даже в Чукотское море), где в условиях «волны тепла»

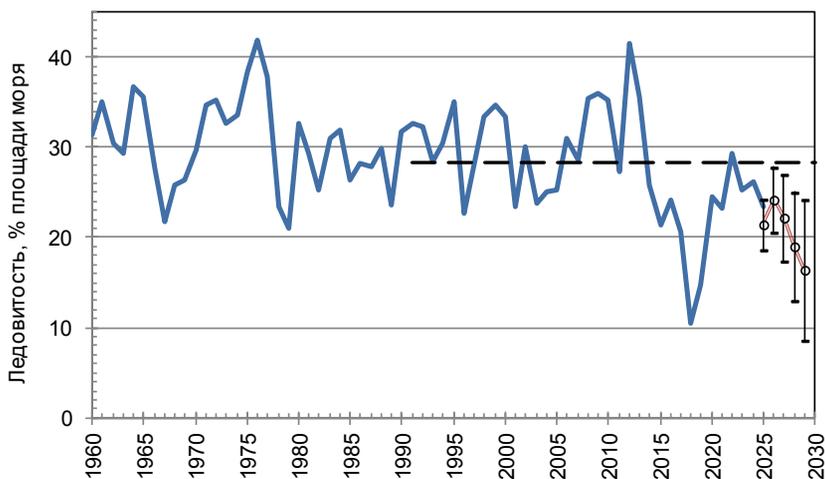


Рис. 12. Межгодовые изменения средней за январь-апрель ледовитости Берингова моря в 1960–2025 гг. и прогноз этого показателя компонентно-гармоническим методом на 2025–2029 гг., выполненный по данным за 1979–2024 гг.: пунктиром показана современная климатическая норма (среднее значение за 1991–2020 гг.). «Усы» обозначают среднеквадратическую ошибку прогноза при заблаговременности от 1 до 5 лет

Fig. 12. Interannual dynamics of the ice cover in the Bering Sea averaged for January-April in 1960–2025 and its Fourier forecasting for 2025–2029 on the base of interannual variability in 1979–2024. The modern climatic mean value for 1991–2020 is shown by dotted line. Whiskers denote the mean squared error for the forecasts of 1–5 years in advance

наблюдались плотные промысловые скопления. По-видимому, появление этого нового пути миграции трески, также как рост численности мигрантов в Наваринском районе, связано с усилением теплого течения, в этом случае Аляскинского, транспортирующего на северный шельф крупный зоопланктон, воспроизводящийся в глубоководных районах у континентального склона.

Выводы

«Волна тепла» 2016–2019 гг. в Беринговом море, сформировавшаяся в результате радикального изменения атмосферной циркуляции при смещении на запад центра Алеутской депрессии, сопровождалась ростом повторяемости южных ветров, рекордным уменьшением ледовитости, резким ростом температуры воздуха, ростом температуры воды в деятельном слое моря, сокращением площади холодного Лаврентийского пятна донных шельфовых вод (вплоть до полного его исчезновения в пределах Анадырского залива), усилением Берингоморского и Аляскинского течений, ослаблением Наваринского течения.

Биомасса нагульной трески в северо-западной части Берингова моря колеблется в весьма широких пределах, которые до последнего времени оценивались величинами от 24,5 (в 1977 г.) до 608,8 тыс. т (в 2011 г.). В годы «волны тепла» верхний предел был превышен более чем вдвое — до 1329,7 тыс. т в 2017 г. Особенности размерно-возрастного состава трески, нагуливавшейся в российских водах в эти годы, указывают на то, что основу нагульных скоплений составили мигранты, подошедшие с юго-востока моря.

В условиях «волны тепла» миграции трески с юго-востока на северо-запад моря усилились, кроме того, возник новый миграционный маршрут — на север, через аляскинский шельф к берегам Чукотки и даже в Берингов пролив и Чукотское море. В результате плотные нагульные скопления этого вида, доступные российскому добывающему флоту, формировались не только в Наваринском промрайоне, но и у берегов Чукотского полуострова. Миграции трески совпадали с потоками теплых течений, обгибающих и разрушающих Лаврентийское холодное пятно. Выдвинута гипотеза, что

их активизация обусловлена усилением транспорта этими течениями на север эвфаузиид *Thysanoessa inermis* из района воспроизводства и сопутствующих миграций основного потребителя эвфаузиид — минтая.

На основе полученных знаний о причинах и последствиях «волн тепла» в Беринговом море промысел трески может быть оптимизирован с целью более полного использования меняющегося промыслового ресурса, а именно: с развитием «волны тепла» следует своевременно увеличивать квоту вылова в российской экономической зоне, осваивая растущий трансграничный приток мигрантов, и столь же своевременно и быстро уменьшать ее при релаксации климатической системы и ослаблении миграций. Величины изменений могут быть оценены с заблаговременностью в несколько месяцев с использованием выявленных качественных и количественных статистических связей активности миграций с динамикой атмосферы (в частности, положения Алеутского минимума) и океанологических показателей (ледовитости, температуры воды на поверхности моря).

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы искренне благодарны всем коллегам, океанологам и ихтиологам, принимавшим участие в сборе материалов, использованных в статье.

The authors are sincerely grateful to those colleagues, oceanographers and ichthyologists, who collected the data used in this study through many years.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study has no sponsor funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных соблюдены. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional principles for the care and use of animals have been observed. The authors declare that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Ю.И. Зуенко — концепция исследования, разработка нового метода анализа данных, анализ данных, обсуждение и интерпретация результатов; А.Б. Савин — сбор биологических и промысловых данных (в том числе в морских экспедициях), обработка и анализ этих данных, обсуждение результатов; Е.О. Басюк — сбор океанологических данных, обработка и анализ, прогнозирование динамики ледовитости; текст написан и проиллюстрирован совместно всеми авторами.

Yu.I. Zuenko — concept of the study, elaboration of new methods for data processing, data analysis, the results of analysis discussing and interpretation; A.B. Savin — biological and fishery data providing (including observations in marine expeditions), the data processing and analysis, the results of analysis discussing; E.O. Basyuk — oceanographic data providing, the data processing and analysis, the ice dynamics forecasting; the text is written and illustrated by all authors jointly.

Список литературы

Бабаян В.К., Булгакова Т.И., Бородин Р.Г., Ефимов Ю.Н. Методические рекомендации. Применение математических методов и моделей для оценки запасов рыб. — М.: ВНИРО, 1984. — 156 с.

Басюк Е.О., Зуенко Ю.И. Берингово море 2018 — экстремально малоледовитый и теплый год // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 198. — С. 119–142. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142.

Борисовец Е.Э., Вдовин А.Н., Панченко В.В. Оценки запасов керчаков по данным учетных траловых съемок залива Петра Великого // *Вопр. рыб-ва.* — 2003. — Т. 4, № 1(13). — С. 157–170.

Буслов А.В., Овсянников Е.Е. Некоторые аспекты биологии и промысла минтая *Theragra chalcogramma* юго-западной части Чукотского моря в связи с его размерно-возрастной структурой // *Изв. ТИНРО.* — 2022. — Т. 202, вып. 2. — С. 316–328. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-316-328. EDN: BVFDZK.

Вершинин В.Г. О биологии и современном состоянии запасов трески северной части Берингова моря // *Биологические ресурсы Арктики и Антарктики.* — М.: Наука, 1987. — С. 207–224.

Гладышев С.В., Хен Г.В. Трансформация высокосоленых донных вод в Анадырском заливе летом-осенью 1995 г. // *Метеорол. и гидрол.* — 1999. — № 6. — С. 66–74.

Глубоков А.И., Норвилло Г.В. Воспроизводство минтая в северо-западной части Берингова моря // *Вопр. рыб-ва.* — 2002. — Т. 3, № 3(11). — С. 474–485.

Зуенко Ю.И., Басюк Е.О. Влияние изменений океанологических условий на состав и обилие зоопланктона в наваринском промысловом районе Берингова моря и их значение для российского минтаевого промысла // *Изв. ТИНРО.* — 2017. — Т. 189. — С. 103–120. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-189-103-120.

Зуенко Ю.И., Хен Г.В., Юрасов Г.И. Водные массы и типы вертикальной структуры вод шельфа Берингова моря // *Метеорол. и гидрол.* — 1998. — № 10. — С. 81–91.

Орлов А.М., Савин А.Б., Горбатенко К.М. и др. Биологические исследования в российских дальневосточных и арктических морях в трансарктической экспедиции ВНИРО // *Тр. ВНИРО.* — 2020. — Т. 181. — С. 102–143. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-102-143.

Поляничко В.И., Кузнецов М.Ю. Распределение и обилие минтая *Theragra chalcogramma* в северо-западной части Берингова моря в летне-осенний период 2020 г. и их межгодовая изменчивость // *Изв. ТИНРО.* — 2022. — Т. 202, вып. 4. — С. 793–809. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-793-809. EDN: ПАЗЕХ.

Савин А.Б. Запасы и промысел трески (*Gadus macrocephalus*, Gadidae) северо-западной части Берингова моря в 1965–2022 гг. // *Изв. ТИНРО.* — 2023. — Т. 203, вып. 3. — С. 465–489. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-465-489. EDN: YZFXBY.

Савин А.Б. Методические рекомендации по планированию и проведению учетных донных траловых съемок в Дальневосточном бассейне // *Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана.* — 2011. — Вып. 22. — С. 68–78.

Тюрин П.В. «Нормальные» кривые переживания и темпов естественной смертности рыб как основа регулирования рыболовства // *Изв. ГосНИОРХ.* — 1972. — Т. 71. — С. 71–127.

Фролов Ю.С. Новые фундаментальные данные по морфометрии Мирового океана // *Вестн. ЛГУ.* — 1971. — № 6. — С. 85–90.

Хен Г.В. Пространственно-временная характеристика вод Анадырского залива и прилегающей области шельфа в летне-осенний период // *Изв. ТИНРО.* — 1999. — Т. 126. — С. 587–602.

Baker M.R. Contrast of warm and cold phases in the Bering Sea to understand spatial distributions of Arctic and sub-Arctic gadids // *Polar Biol.* — 2021. — Vol. 44, Iss. 6. — P. 1083–1105. DOI: 10.1007/s00300-021-02856-x.

Barbeaux S.J., Barnett L., Hulson P. et al. Assessment of the Pacific cod stock in the eastern Bering Sea // *Stock assessment and fishery evaluation report for the groundfish resources of the Bering Sea/Aleutian Islands regions.* — Anchorage: North Pacific Fishery Management Council, 2024. — P. 1–150.

Basyuk E., Zuenko Y. Extreme oceanographic conditions in the northwestern Bering Sea in 2017–2018 // *Deep-Sea Res. II.* — 2020. — Vol. 181–182. 104909. DOI: 10.1016/j.dsr2.2020.104909.

Bonjean F., Lagerloef G.S.E. Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* — 2002. — Vol. 32, Iss. 10. — P. 2938–2954. DOI: 10.1175/15200485(2002)032%3C2938:DMAAOT%3E2.0.CO;2.

Cunningham K.M., Canino M.F., Spies I.B., Hauser L. Genetic isolation by distance and localized fjord population structure in Pacific cod (*Gadus macrocephalus*): limited effective dispersal in the northeastern Pacific Ocean // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* — 2009. — Vol. 66, № 1. — P. 153–166. DOI: 10.1139/F08-199.

DeFilippo L.B., Thorson J.T., O’Leary C.A. et al. Characterizing dominant patterns of spatiotemporal variation for a transboundary groundfish assemblage // *Fish. Oceanogr.* — 2023. — Vol. 32. — P. 541–558. DOI: 10.1111/fog.12651.

Drinan D.P., Gruenthal K.M., Canino M.F. et al. Population assignment and local adaptation along an isolation by distance gradient in Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) // *Evolutionary Applications.* — 2018. — Vol. 11, № 8. — P. 1448–1464. DOI: 10.1111/eva.12639.

- Eisner L.B., Zuenko Yu.I., Basyuk E.O. et al.** Environmental impacts on walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) distribution across the Bering Sea shelf // *Deep-Sea Res. II.* — 2020. — Vol. 181–182. 104881. DOI: 10.1016/j.dsr2.2020.104881.
- Fosshem M., Primicerio R., Johannesen E. et al.** Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic // *Nat. Clim. Change.* — 2015. — Vol. 5. — P. 673–677. DOI: 10.1038/nclimate2647.
- Gibson G.A., Coyle K.O., Hedstrom K., Curchister E.N.** A modeling study to explore on-shelf transport of oceanic zooplankton in the eastern Bering Sea // *J. Mar. Syst.* — 2013. — Vol. 121. — P. 47–64. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2013.03.010.
- Husson B., Bluhm B.A., Cyr F. et al.** Borealization impacts shelf ecosystems across the Arctic // *Front. Environ. Sci.* — 2024. — Vol. 12. — P. 1481420. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1481420.
- Johnson J.J., Miksis-Olds J.L., Lippmann T.C. et al.** Decadal community structure shifts with cold pool variability in the eastern Bering Sea shelf // *J. Acoust. Soc. of America.* — 2022. — Vol. 152(1). — P. 201–213. DOI: 10.1121/10.0012193.
- Kearney K.** Cold Pool // *Ecosystem Status Report 2022: Eastern Bering Sea.* — Anchorage : North Pacific Fishery Management Council, 2022. — P. 60–63.
- Kinder T.H., Chapman D.C., Whitehead J.A.** Westward intensification of the mean circulation on the Bering Sea Shelf // *J. Phys. Oceanogr.* — 1986. — Vol. 16. — P. 1217–1229.
- Kinder T.H., Shumacher J.D.** Hydrographic structure over the continental shelf of the south-eastern Bering Sea // *J. Phys. Oceanogr.* — 1981. — Vol. 1. — P. 31–52.
- Liepins V.** An algorithm for evaluation a discrete Fourier transform for incomplete data // *Automatic control and computer sciences.* — 1996. — Vol. 30, № 3. — P. 20–29.
- Meier W.N., Stewart J.S., Wilcox Y. et al.** Near-Real-Time DMSP SSMIS daily polar gridded sea ice concentrations, Version 2. — Boulder : NASA National Snow and Ice Data Center, 2021. DOI: 10.5067/YTTHO2FJQ97K.
- Overland J.E., Wang M.** Future Climate Change in the Northern Bering Sea // *Int. J. Climatology.* — 2025. — Vol. 45, Iss. 1. — P. 1–6. DOI: 10.1002/joc.8697.
- Petersen W., Robert M., Bond N.** The warm Blob — conditions in the northeastern Pacific Ocean // *PICES Press.* — 2015. — Vol. 23, № 1. — P. 36–38.
- Pope J.G.** An investigation of the accuracy of Virtual Population Analysis using cohort analysis // *ICNAF Res. Bull.* — 1972. — № 9. — P. 65–74.
- Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M. et al.** An improved in situ and satellite SST analysis for climate // *J. Clim.* — 2002. — Vol. 15. — P. 1609–1625. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AI-ISAS>2.0.CO;2.
- Shotwell K., Barbeaux S.J., Hurst T. et al.** Ecosystem and socioeconomic profile of the pacific cod stock in the eastern Bering Sea. — Anchorage : North Pacific Fishery Management Council, 2023. — 26 p.
- Spies I.** Landscape genetics reveals population subdivision in Bering Sea and Aleutian Islands pacific cod // *Transactions of the American Fisheries Society.* — 2012. — Vol. 141, № 6. — P. 1557–1573. DOI: 10.1080/00028487.2012.711265.
- Spies I., Gruenthal K.M., Drinan D.P. et al.** Genetic evidence of a northward range expansion in the eastern Bering Sea stock of pacific cod // *Evolutionary Applications.* — 2020. — Vol. 13, № 2. — P. 362–375. DOI: 10.1111/eva.12874.
- Stabeno P.J., Bell S.W.** Extreme conditions in the Bering Sea (2017–2018): Record-breaking low sea-ice extent // *Geophys. Res. Lett.* — 2019. — Vol. 46, Iss. 15. — P. 8952–8959. DOI: 10.1029/2019GL083816.
- Stabeno P.J., Farley E.V., Kachel N.B. et al.** A comparison of the physics of the northern and southern shelves of the eastern Bering Sea and some implications for the ecosystem // *Deep-Sea Res. II.* — 2012a. — Vol. 65–70. — P. 14–30.
- Stabeno P.J., Kachel N.B., Moore S.E. et al.** Comparison of warm and cold years on the southeastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem // *Deep-Sea Res. II.* — 2012b. — Vol. 65–70. — P. 31–45. DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.02.020.
- Stevenson D.E., Lauth R.R.** Bottom trawl surveys in the northern Bering Sea indicate recent shifts in the distribution of marine species // *Polar Biol.* — 2019. — Vol. 42. — P. 407–421. DOI: 10.1007/s00300-018-2431-1.
- Stevenson D.E., Lauth R.R.** Latitudinal trends and temporal shifts in the catch composition of bottom trawls conducted on the eastern Bering Sea shelf // *Deep-Sea Res. II.* — 2012. — Vol. 65–70. — P. 251–259. DOI: 10.1016/J.DSR2.2012.02.021.

Wyllie-Echeverria T., Wooster W.S. Year-to-year variations in Bering Sea ice cover and some consequences for fish distributions // *Fish. Oceanogr.* — 1998. — Vol. 7, № 2. — P. 159–170. DOI: 10.1046/J.1365-2419.1998.00058.X.

References

Babayan, V.K., Bulgakova, T.I., Borodin, R.G., and Yefimov, Yu.N., *Metodicheskiye rekomendatsii. Primeneniye matematicheskikh metodov i modeley dlya otsenki zapasov ryby* (Methodical recommendations. Application of mathematical methods and models for fish stock assessment), Moscow: VNIRO, 1984.

Basyuk, E.O. and Zuenko, Yu.I., Bering Sea: 2018 as the extreme low-ice and warm year, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 198, pp. 119–142. doi 10.26428/1606-9919-2019-198-119-142

Borisovets, E.E., Vdovin, A.N., and Panchenko, V.V., Estimates of sculpin stocks based on the data of trawl surveys in Peter the Great Bay, *Vopr. Rybolov.*, 2003, vol. 4, no. 1(13), pp. 157–170.

Buslov, A.V. and Ovsyannikov, E.E., Some aspects of the walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) biology and fishery related to the size and age structure in the southwestern Chukchi Sea, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2022, vol. 48, no. 7, pp. 623–633. doi 10.1134/s1063074022070021

Vershinin, V.G., On the biology and current state of cod stocks in the northern part of the Bering Sea, in *Biologicheskkiye resursy Arktiki i Antarktiki* (Biological resources of the Arctic and Antarctic), Moscow: Nauka, 1987, pp. 207–224.

Gladyshev, S.V. and Khen, G.V., Transformation of brackish bottom waters of the Gulf of Anadyr in summer-fall 1995, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 1999, no. 6, pp. 33–43.

Glubokov, A.I. and Norvillo, G.V., Reproduction of walleye pollock in the northwestern part of the Bering Sea, *Vopr. Rybolov.*, 2002, vol. 3, no. 3(11), pp. 474–485.

Zuenko, Yu.I. and Basyuk, E.O., Impact of changing oceanographic conditions on species composition and abundance of zooplankton on the fishing grounds at Cape Navarin and their importance for the Russian pollock fishery in the Bering Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2017, vol. 189, pp. 103–120. doi 10.26428/1606-9919-2017-189-103-120

Zuenko, Yu.I., Khen, G.V., and Yurasov, G.I., Water masses and types of vertical water structure of the Bering Sea shelf, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 1998, no. 10, pp. 59–67.

Orlov, A.M., Savin, A.B., Gorbatenko, K.M., Benzik, A.N., Morozov, T.B., Rybakov, M.O., Terent'ev, D.A., Vedishcheva, E.V., Kurbanov, Yu.K., Nosov M.A., and Orlova S.Yu., Biological research in the Russian Far Eastern and Arctic seas during the VNIRO transarctic expedition, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 181, pp. 102–143. doi 10.36038/2307-3497-2020-181-102-143

Polyanichko, V.I. and Kuznetsov, M.Yu., Distribution and abundance of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the northwestern Bering Sea in the summer-fall period of 2020 and their interannual variability, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 4, pp. 793–809. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-793-809. EDN: IIAZEX.

Savin, A.B., Stocks and fishery of cod (*Gadus macrocephalus*, Gadidae) in the northwestern Bering Sea in 1965–2022, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2023, vol. 49, no. 7, pp. 692–708. doi 10.1134/s1063074023070155

Savin, A.B., Methodological recommendations to planning and carrying out the bottom trawl surveys in the Far East basin, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2011, vol. 22, pp. 68–78.

Tyurin, P.V., “Normal” curves of the experience and rate of natural mortality of fish as a basis for fisheries regulation, *Izv. Gos. Nauchno-Issled. Inst. Ozern. Rechn. Rybn. Khoz.*, 1972, vol. 71, pp. 71–127.

Frolov, Yu.S., New fundamental data on the morphometry of the World Ocean, *Vestn. Leningr. Gos. Univ.*, 1971, no. 6, pp. 85–90.

Khen, G.V., Spatial and temporal characteristics of the waters masses in the Gulf of Anadyr and adjacent shelf area in summer-autumn, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1999, vol. 126, pp. 587–602.

Baker, M.R., Contrast of warm and cold phases in the Bering Sea to understand spatial distributions of Arctic and sub-Arctic gadids, *Polar Biol.*, 2021, vol. 44, no. 6, pp. 1083–1105. doi 10.1007/s00300-021-02856-x

Barbeaux, S.J., Barnett, L., Hulson, P., Nielsen, J., Shotwel, S.K., Siddon, E., and Spies, I., Assessment of the Pacific cod stock in the eastern Bering Sea, in *Stock assessment and fishery evalua-*

tion report for the groundfish resources of the Bering Sea/Aleutian Islands regions, Anchorage: North Pacific Fishery Management Council, 2024, pp. 1–150.

Basuyk, E. and Zuenko, Y., Extreme oceanographic conditions in the northwestern Bering Sea in 2017–2018, *Deep Sea Res. Part II*, 2020, vol. 181–182, 104909. doi 10.1016/j.dsr2.2020.104909

Bonjean, F. and Lagerloef, G.S.E., Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 2002, vol. 32, no. 10, pp. 2938–2954. doi 10.1175/15200485(2002)032%3C2938:DMAAOT%3E2.0.CO;2

Cunningham, K.M., Canino, M.F., Spies, I.B., and Hauser, L., Genetic isolation by distance and localized fjord population structure in pacific cod (*Gadus macrocephalus*): limited effective dispersal in the northeastern Pacific Ocean, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2009, vol. 66, no. 1, pp. 153–166. doi 10.1139/F08-199

DeFilippo, L.B., Thorson, J.T., O’Leary, C.A., Kotwicki, S., Hoff, J., Ianelli, J.N., Kulik, V.V., and Punt, A.E., Characterizing dominant patterns of spatiotemporal variation for a transboundary groundfish assemblage, *Fish. Oceanogr.*, 2023, vol. 32, pp. 541–558. doi 10.1111/fog.12651

Drinan, D.P., Gruenthal, K.M., Canino, M.F., Lowry, D., Fisher, M.C., and Hauser, L., Population assignment and local adaptation along an isolation by distance gradient in pacific cod (*Gadus macrocephalus*), *Evolutionary Applications*, 2018, vol. 11, no. 8, pp. 1448–1464. doi 10.1111/eva.12639

Eisner, L.B., Zuenko, Yu.I., Basuyk, E.O., Britt, L.L., Duffy-Anderson, J.T., Kotwicki, S., Ladd, C., and Cheng, W., Environmental impacts on walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) distribution across the Bering Sea shelf, *Deep Sea Res., Part II*, 2020, vol. 181–182, 104881. doi 10.1016/j.dsr2.2020.104881

Fosheim, M., Primicerio, R., Johannesen, E., Ingvaldsen, R.B., Aschan, M.M., Dolgov, A.V., Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic, *Nat. Clim. Change*, 2015, vol. 5, pp. 673–677. doi 10.1038/nclimate2647

Gibson, G.A., Coyle, K.O., Hedstrom, K., and Curchister E.N., A modeling study to explore on-shelf transport of oceanic zooplankton in the eastern Bering Sea, *J. Mar. Syst.*, 2013, vol. 121, pp. 47–64. doi 10.1016/j.jmarsys.2013.03.010

Husson, B., Bluhm, B.A., Cyr, F., Danielson, S.L., Eriksen, E., Fosheim, M., Geoffroy, M., Hopcroft, R.R., Ingvaldsen, R.B., Jørgensen, L.L., Lovejoy, C., Meire, L., Mueter, F., Primicerio, R., and Winding, M., Borealization impacts shelf ecosystems across the Arctic, *Front. Environ. Sci.*, 2024, vol. 12, 1481420. doi 10.3389/fenvs.2024.1481420

Johnson, J.J., Miksis-Olds, J.L., Lippmann, T.C., Jech, J.M., Seger, K.D., Pringle, J.M., and Linder, E., Decadal community structure shifts with cold pool variability in the eastern Bering Sea shelf, *J. Acoust. Soc. of America*, 2022, vol. 152(1), pp. 201–213. doi 10.1121/10.0012193

Kearney, K., Cold Pool, in *Ecosystem Status Report 2022: Eastern Bering Sea*, Anchorage: North Pacific Fishery Management Council, 2022, pp. 60–63.

Kinder, T.H., Chapman, D.C., and Whitehead, J.A., Westward intensification of the mean circulation on the Bering Sea Shelf, *J. Phys. Oceanogr.*, 1986, vol. 16, pp. 1217–1229.

Kinder, T.H., and Shumacher, J.D., Hydrographic structure over the continental shelf of the southeastern Bering Sea, *J. Phys. Oceanogr.*, 1981, vol. 1, pp. 31–52.

Liepins, V., An algorithm for evaluation a discrete Fourier transform for incomplete data, *Automatic control and computer sciences*, 1996, vol. 30, no. 3, pp. 20–29.

Meier, W.N., Stewart, J.S., Wilcox, Y., Hardman, M.A., and Scott, D.J., *Near-Real-Time DMSP SSMIS daily polar gridded sea ice concentrations, Version 2*, Boulder: NASA National Snow and Ice Data Center, 2021. doi 10.5067/YTTHO2FJQ97K

Overland, J.E. and Wang, M., Future Climate Change in the Northern Bering Sea, *Int. J. Climatology*, 2025, vol. 45, no. 1, pp. 1–6. doi 10.1002/joc.8697

Petersen, W., Robert, M., and Bond, N., The warm Blob — conditions in the northeastern Pacific Ocean, *PICES Press*, 2015, vol. 23, no. 1, pp. 36–38.

Pope, J.G., An investigation of the accuracy of Virtual Population Analysis using cohort analysis, *ICNAF Res. Bull.*, 1972, no. 9, pp. 65–74.

Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., and Wang, W., An improved in situ and satellite SST analysis for climate, *J. Clim.*, 2002, vol. 15, pp. 1609–1625. doi 10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AISAS>2.0.CO;2

Shotwell, K., Barbeaux, S.J., Hurst, T., Laurel, B., Oke, K., Rogers, L., Siddon, E., Ableman, A., Adams, G., Aydin, K., Callahan, M., Cunningham, C., Ferriss, B., Garber-Yonts, B., Hall, M., Holsman, K., Kearney, K., Lee, J., Matta, B., Neidetcher, S., Nielsen, J., Ressler, P., Renner, H., Rohan, S., Shotwell, K., Sweeney, K., and Wang, M., *Ecosystem and socioeconomic*

profile of the pacific cod stock in the eastern Bering Sea, Anchorage: North Pacific Fishery Management Council, 2023.

Spies, I., Landscape genetics reveals population subdivision in Bering Sea and Aleutian Islands pacific cod, *Transactions of the American Fisheries Society*, 2012, vol. 141, no. 6, pp. 1557–1573. doi 10.1080/00028487.2012.711265

Spies, I., Gruenthal, K.M., Drinan, D.P., Hollowed, A.B., Stevenson, D.E., Tarpey, C.M., Hauser, L., Genetic evidence of a northward range expansion in the eastern Bering Sea stock of pacific cod, *Evolutionary Applications*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 362–375. doi 10.1111/eva.12874

Stabeno, P.J. and Bell, S.W., Extreme conditions in the Bering Sea (2017–2018): Record-breaking low sea-ice extent, *Geophys. Res. Lett.*, 2019, vol. 46, no. 15, pp. 8952–8959. doi 10.1029/2019GL083816

Stabeno, P.J., Farley, E.V., Kachel, N.B., Moore, S., Mordy, C.W., Napp, J.M., Overland, J.E., Pinchuk, A.I., and Sigler, M.F., A comparison of the physics of the northern and southern shelves of the eastern Bering Sea and some implications for the ecosystem, *Deep Sea Res., Part II*, 2012, vol. 65–70, pp. 14–30.

Stabeno, P.J., Kachel, N.B., Moore, S.E., Napp, J.M., Sigler, M., Yamaguchi, A., and Zerbini, A.N., Comparison of warm and cold years on the southeastern Bering Sea shelf and some implications for the ecosystem, *Deep Sea Res., Part II*, 2012, vol. 65–70, pp. 31–45. doi 10.1016/j.dsr2.2012.02.020

Stevenson, D.E. and Lauth, R.R., Bottom trawl surveys in the northern Bering Sea indicate recent shifts in the distribution of marine species, *Polar Biol.*, 2019, vol. 42, pp. 407–421. doi 10.1007/s00300-018-2431-1

Stevenson, D.E. and Lauth, R.R., Latitudinal trends and temporal shifts in the catch composition of bottom trawls conducted on the eastern Bering Sea shelf, *Deep Sea Res., Part II*, 2012, vol. 65–70, pp. 251–259. doi 10.1016/J.DSR2.2012.02.021

Wyllie-Echeverria, T. and Wooster, W.S., Year-to-year variations in Bering Sea ice cover and some consequences for fish distributions, *Fish. Oceanogr.*, 1998, vol. 7, no. 2, pp. 159–170. doi 10.1046/J.1365-2419.1998.00058.X

Earth System Research Laboratories. <https://www.esrl.noaa.gov/>. Cited May 12, 2025.

<https://nsidc.org/data/nsidc-0081/versions/2>. Cited May 12, 2025.

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11020-extended-dft>. Cited May 12, 2025.

Ocean Surface Current Analyses Real-time (OSCAR) Surface Currents — Near Real Time 0.25 Degree (Version 2.0). https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_NRT_V2. Cited May 12, 2025.

Поступила в редакцию 15.04.2025 г.

После доработки 13.05.2025 г.

Принята к публикации 16.06.2025 г.

The article was submitted 15.04.2025; approved after reviewing 13.05.2025; accepted for publication 16.06.2025