

Научная статья / Original article

УДК 597.552.511:591.54

doi:10.15853/2072-8212.2025.76.21-40

EDN: BPWUIY



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛИМАТО-ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЗИМНЕ-ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД НА ЧИСЛЕННОСТЬ ВОЗВРАТОВ ГОРБУШИ *ONCORHYNCHUS GORBUSCHA* СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ С ЦЕЛЬЮ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЕЕ ЗАПАСОВ

Бугаев Александр Викторович^{1✉}, Тепнин Олег Борисович¹, Кровнин Андрей Сергеевич²

¹Камчатский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (КамчатНИРО), Петропавловск-Камчатский, Россия, a.bugaev@kamniro.vniro.ru[✉]

²Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), Москва, Россия

Аннотация. В работе рассмотрен комплекс климато-океанологических факторов, влияющих на формирование численности возвратов (подходов) горбуши Северо-Восточной Камчатки во время зимне-весеннего нагула в Беринговом море и сопредельных водах северной части Тихого океана. В анализ включены показатели аномалии температуры поверхности моря/океана (*SSTa*) в акватории зимовальных и ранних преднерестовых миграций исследуемой группировки стад вида, а также ряд региональных климатических индексов — *WP* (Западно-Тихоокеанский циклонический), *PDO* (Тихоокеанской декадной осцилляции), *AO* (Арктической осцилляции) и *NPGO* (Северо-Тихоокеанского колебания). В качестве наиболее значимых предикторов определены *SSTa*, *WP* и *PDO*. Результатом исследований стало построение многомерных прогностических моделей типа «запас – пополнение» и «учет в море – возврат» с учетом климато-океанологических факторов. На их основе возможна оперативная корректировка долгосрочных прогнозов динамики численности возвратов горбуши Северо-Восточной Камчатки непосредственно перед началом лососевых путин.

Ключевые слова: горбуша, Северо-Восточная Камчатка, динамика численности возвратов (подходов), климато-океанологические условия, климатические индексы, аномалии температуры воды, прогностические модели.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Бугаев А.В., Тепнин О.Б., Кровнин А.С. Оценка влияния климато-океанологических условий в зимне-весенний период на численность возвратов горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Северо-Восточной Камчатки с целью оперативного прогнозирования динамики ее запасов // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2025. Вып. 76. С. 21–40. EDN: BPWUIY. doi:10.15853/2072-8212.2025.76.21-40

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF WINTER AND SPRING CLIMATE- OCEANOLOGICAL CONDITIONS ON THE ABUNDANCE OF PINK SALMON *ONCORHYNCHUS GORBUSCHA* RETURNS IN NORTH-EAST KAMCHATKA FOR THE USE IN OPERATIONAL FORECASTING THE STOCK DYNAMICS

Alexandr V. Bugaev^{1✉}, Oleg B. Tepnin¹, Andrey S. Krovnin²

¹Kamchatka Branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (KamchatNIRO), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, a.bugaev@kamniro.vniro.ru[✉]

²Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Moscow, Russia

Abstract. The article represent analysis of the influence of a complex of climate and oceanological factors during winter and spring feeding of pink salmon in the Bering Sea and adjacent waters of Northern Pacific Ocean on formation of the abundance of pink salmon returns (runs) in North-East Kamchatka. The factors analyzed included sea/ocean surface temperature anomalies (*SSTa*) in the areas of wintering and early prespawning migrations of examined group of stocks of the species and several regional climate indices: *WP* (the West-Pacific oscillation), *PDO* (the Pacific decade oscillation), *AO* (the Arctic oscillation) and *NPGO* (North-Pacific gyre oscillation). The *SSTa*, *WP* and *PDO* were estimated as the most significant predictors. As a result of the research there were multivariate prognostic models of the type “stock-recruitment” or “ocean accounts – return” made taking into account the climate and oceanological factors. Operational improvement based on these models get applicable to correct long-term forecasts of the abundance of pink salmon returns in North-East Kamchatka right before salmon fishing campaign.

Keywords: pink salmon, North-East Kamchatka, abundance of returns (runs), climate-oceanological conditions, climate indices, water temperature anomalies, predictive models.

Funding. The study was not sponsored.

For citation: Bugaev A.V., Tepnin O.B., Krovnin A.S. Assessment of the influence of winter and spring climate-oceanological conditions on the abundance of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* returns in North-East Kamchatka for the use in operational forecasting the stock dynamics // The researchers of the aquatic biological resources of Kamchatka and the north-west part of the Pacific Ocean. 2025. Vol. 76. P. 21–40. (In Russ.) EDN: BPWUIY. doi:10.15853/2072-8212.2025.76.21-40

Глобальные климатические изменения, наблюдаемые на рубеже XX и XXI веков, оказывают прямое влияние на формирование численности и биологическое состояние тихоокеанских лососей Северной Пацифики (Кляшторин, Любушин, 2005; Кровнин, 2020; Бугаев, Тепнин, 2024). Подобное воздействие имеет многофакторный характер. Однако результаты многолетних исследований представленных авторов показывают, что на лососевые запасы наиболее заметно воздействует повышение температуры воздуха и воды на планетарном уровне. Например, по индексу глобальной температурной аномалии (ГТа) Северного полушария Земли прослеживается положительная взаимосвязь роста ГТа с численностью подходов массовых видов тихоокеанских лососей. По сути, данный индекс отождествляет понятие «глобальное потепление», которое характеризует длительное повышение средней температуры климатической системы Земли.

Тем не менее очень высока вероятность, что лишь на определенном временном этапе глобальное потепление будет иметь позитивное влияние на лососевые запасы. Дело в том, что с начала XXI века наблюдается критическое снижение размерно-массовых показателей тихоокеанских лососей во всех регионах бассейна Северной Пацифики (Карпенко и др., 2013; Бугаев, 2017; Бугаев, Тепнин, 2024). В 2010–2020-х гг., по сравнению с 1960–1990 гг., снижение длины и массы тела у большинства долгоцикловых видов (кета, нерка, кижуч) достигло порядка 30%, а в отдельных случаях (чавыча) — до 50–60%. Это критично для выживания и успешного воспроизводства тихоокеанских лососей. Механизм этого явления досконально неизвестен. Однако процесс соматического роста рыб всегда напрямую связан с доступностью и качеством кормовой базы. Последнее зависит от усиления роли плотностного фактора (повышение численности рыб), приводящего к росту пищевой конкуренции. Это особенно проявляется при снижении численности и видового разнообразия потребляемого рыбами зоопланктона и nekтона.

Таким образом, положительное влияние глобального потепления на увеличение численности

тихоокеанских лососей постепенно сменилось негативным воздействием на их биологическое состояние. Наиболее очевидно, что наблюдается обострение пищевой конкуренции из-за роста численности. Особенно сильно это начало проявляться в 2010-е гг. Причем в последние годы (2023–2025) ГТа продолжает увеличиваться. Поэтому высока вероятность, что в ближайшие годы будет достигнут некий «потолок», когда дальнейший рост ГТа станет негативно влиять на формирование численности лососевых запасов.

Помимо глобального потепления, определяющего общий тренд динамики численности тихоокеанских лососей, большое значение для морского/океанического нагула конкретных поколений рыб имеют ежегодно складывающиеся климато-океанологические условия. В данном случае значимыми факторами, влияющими на динамику численности рыб, являются климатические параметры, которые оказывают воздействие на формирование температурного режима вод в местах массового нагула тихоокеанских лососей в конкретный период наблюдений. Как известно, температурный фактор может иметь значение для создания кормовой обеспеченности и индивидуального роста рыб (Никольский, 1974; Смирнов, 1975).

В представленной статье рассматриваются некоторые климато-океанологические факторы, которые определяют температурный режим вод в районах зимне-весеннего нагула горбуши Северо-Восточной Камчатки. Оценивается степень их влияния на ее запасы. По результатам оценки производится отбор климатических параметров, которые наиболее пригодны для прогнозирования величины возвратов восточнокамчатской горбуши. На основе имеющихся рядов наблюдений численности (нерестовые запасы, подходы (возвраты), учет в море) и отобранных климатических предикторов строятся многомерные прогностические модели, позволяющие с учетом климато-океанологических условий в период зимне-весеннего нагула выполнять оперативную корректировку долгосрочных прогнозов численности возвратов горбуши Северо-Восточной Камчатки непосредственно перед началом путин.

Целью работы является отбор климатических предикторов наиболее значимых для выживания горбуши Северо-Восточной Камчатки во время зимне-весеннего нагула и разработка методов оперативного прогнозирования численности ее возвратов (подходов) к побережью.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе использованы ряды наблюдений, характеризующие численность запасов (возврат, подход) горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Северо-Восточной Камчатки, а также климатические индексы, потенциально влияющие на условия нагула вида в зимне-весенний период в Беринговом море и прилегающих водах северной части Тихого океана. Ряды наблюдений численности включают ежегодные данные о количестве рыб на нерестилищах (нерестовый запас) (S) (1990–2022 гг.) и возвратах (подходах) производителей к побережью (R) (1992–2024 гг.). Определение «возврат (подход)» соответствует сумме количества выловленной (прибрежный и речной промысел) и пропущенной на нерест рыбы. Уточним, что двухгодичное расхождение (лаг) рядов численности нерестовых запасов и подходов связано с 2-летним жизненным циклом вида. Например, горбуша, которая отнерестилась в 1990 г., возвратится к нерестовому водоему в 1992 г.

Базовой прогностической моделью для горбуши является зависимость «родители – потомство» (Ricker, 1954, 1975), где «родители» —

S, а «потомство» — R. Однако при наличии дополнительных предикторов подобное определение взаимосвязи будет некорректным. Многомерные прогностические модели правильнее обозначить общеупотребительным термином «зависимость типа “запас – пополнение”» (Бабаян и др., 2018). В данном случае понятие «запас» соответствует S, а «пополнение» — R.

Помимо оценок численности производителей горбуши, в работе использованы данные учетных траловых съемок ТИНРО (Тихоокеанский филиал Государственного научного центра ФГБНУ «ВНИРО») во время осенней откочевки молоди от побережья в открытые воды Берингова моря в 2012–2023 гг. Все оценки численности сеголетков горбуши выполнены специалистами ТИНРО. Информация официально представлена в КамчатНИРО в рамках подготовки материалов, обосновывающих ежегодные прогнозы вылова горбуши Северо-Восточной Камчатки (Карагинская подзона). В данном случае временной лаг от проведения учетной съемки молоди до возврата производителей составляет 1 год. Например, данные оценок численности съемки 2012 г. сопоставляются с величиной возврата производителей в 2013 г. Это позволяет анализировать зависимость «учет в море – возврат». Как правило, съемки ежегодно выполняются в сентябре–октябре в пределах одного полигона со стандартной сеткой станций (рис. 1). Уточним, что рассматриваемый ряд наблюдений не полный, так как в 2015 и 2016 гг. учетные съемки не проводили.

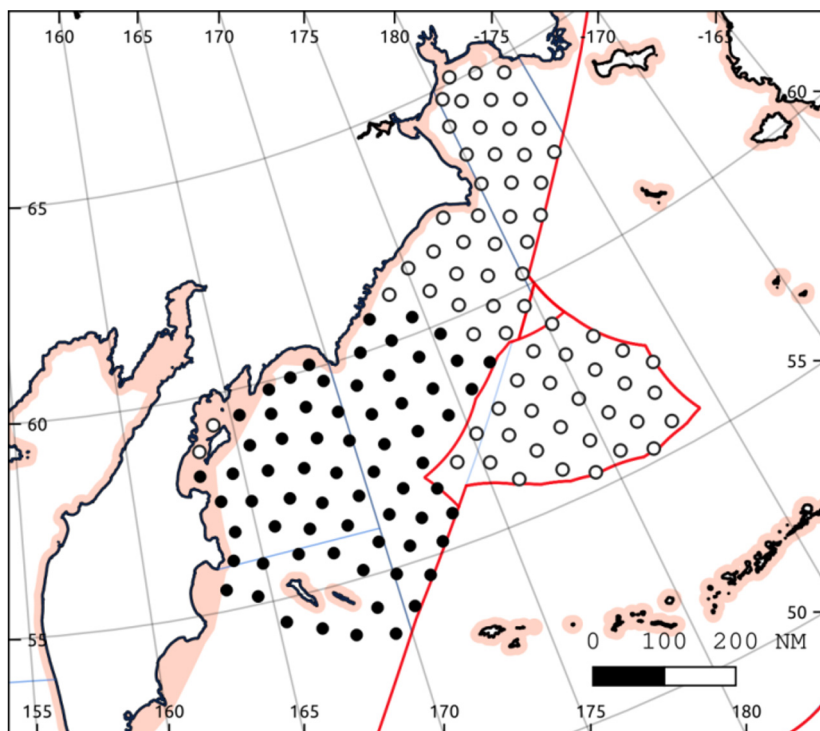


Рис. 1. Карта-схема траловых станций комплексных лососевых съемок, проводимых в эпипелагиали Берингова моря: красная линия — граница ИЭЗ РФ, розовая заливка — 12-мильная зона внутренних вод, черные точки — приоритетные станции, белые точки — дополнительные станции. Рис. выполнен А.А. Сомовым (ТИНРО)

Fig. 1. Schematic map of the trawl stations of complex salmon epipelagic surveys in the Bering Sea: red line marks the boundary of the EEZ of RF, pink fill — the 12-mile zone of inland waters, black dots — priority stations, white dots — additional stations. The figure by A.A. Somov (TINRO)

В качестве климато-океанологических параметров использованы следующие климатические индексы (данные 1992–2024 гг.):

1) *WP* (West Pacific Pattern) — Западно-Тихоокеанский циклонический индекс (Barnston, Livezey, 1987) — характеризует атмосферную циркуляцию в западной части Тихого океана (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>);

2) *PDO* (Pacific Decadal Oscillation) — индекс Тихоокеанской декадной осцилляции (Mantua et al., 1997) — характеризует среднемесячную аномалию температуры поверхности воды северной части Тихого океана (до 20° с. ш.), отражая долгосрочные колебания температуры с периодичностью примерно каждые 20–30 лет (<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pdo>);

3) *AO* (Arctic Oscillation) — индекс Арктической осцилляции (Thompson, Wallace, 1998) — характеризует степень проникновения арктических воздушных масс в субарктический регион (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/monthly.ao.index.b50.current.ascii);

4) *NPGO* (North Pacific Gyre Oscillation) — индекс Северо-Тихоокеанского колебания (Di Lorenzo et al., 2008) — характеризует изменения температуры поверхности воды в северной части Тихого океана, а также оказывает комплексное влияние на атмосферу и региональные крупномасштабные океанические течения (<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/month/DS/NPGO>).

Для оценки состояния термических условий вод в районах зимне-весеннего нагула горбуши Северо-Восточной Камчатки в работе использо-

ваны данные аномалий температуры поверхности воды (*SSTa* — Sea Surface Temperature Anomalies). Ряды наблюдений *SSTa* включают средние зональные значения показателя для периода 1992–2024 гг. согласно представленной схеме районирования (рис. 2). Указанные районы входят в нагульный ареал горбуши Северо-Восточной Камчатки во время зимовальных (зима) и ранних преднерестовых (весна) миграций.

Использованные в работе данные *SSTa* получены из системы ассимиляции климатических данных JMA (Японское метеорологическое агентство) и японских реанализов (JRA-25 и JRA-55) (<https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/elnino/cobesst/cobe-sst.html>). Подробная характеристика этого материала ранее была опубликована различными авторами (Folland, Parker, 1995; Ishii et al., 2005; Japan Meteorological Agency, 2006). Исходные данные представляются в независимом формате обмена первичной научной информацией NetCDF (Network Common Data Form) на регулярной географической сетке с шагом $1 \times 1^\circ$ по широте и долоте. В дальнейшем исходные материалы, с использованием пакета программ CDO (Climate Data Operators, <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>), осреднялись для 9 представленных картографических трапеций ($5 \times 10^\circ$). Полученные ряды среднемесячных отклонений от нормы температуры поверхности океана (*SSTa*) для всего района исследований использовали для расчета средних сезонных показателей зимы и весны. Визуализацию результатов выполняли в специализированной программе ODV (Ocean Data View) (<https://odv.awi.de>). Для характери-

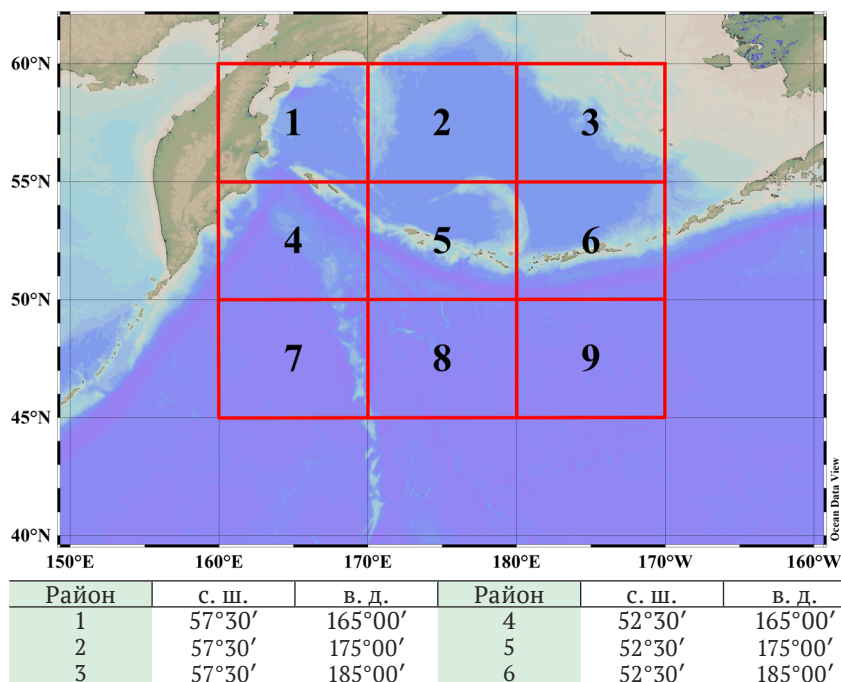


Рис. 2. Карта-схема основной зоны нагула горбуши Северо-Восточной Камчатки в зимне-весенний период в Беринговом море и прилегающих водах северной части Тихого океана: красные квадраты — картографические трапеции ($5 \times 10^\circ$), для которых рассчитывались среднемесячные значения аномалий температуры поверхностного слоя вод; цифры — их порядковые номера; координаты в таблице — средние координаты картографических трапеций

Fig. 2. Schematic map of the main zone of feeding of pink salmon of North-East Kamchatka in winter and spring in the Bering Sea and adjacent waters of Northern Pacific Ocean: red squares are cartographic trapezoids ($5 \times 10^\circ$) for which the average monthly values of the sea surface temperature anomalies were calculated; the numbers are the trapezoid ordinal numbers; the coordinates in the table are average coordinates of the cartographic trapezoids

стики межгодовой изменчивости площади ледового покрова Берингова моря нами рассмотрены материалы National Snow and Ice Data Center (НСИД, National Snow and Ice Data Center, <http://nsidc.org>).

Обращаем внимание, что использованные в работе климатические индексы и $SSTa$, которые характеризуют зимний период, включают данные за январь–февраль текущего года и декабрь предыдущего года. Следовательно, для зимнего периода 1992 г. применяются данные за декабрь 1991 г. и т. д.

Построение графиков, расчеты корреляционных и регрессионных зависимостей, а также анализ главных компонент выполнены по стандартным методикам, принятым для компьютерной обработки статистических данных (Халафян, 2008; Курзаева, 2016; Кеткина, 2020). В качестве базовых программ использовали MS Excel и Statistica.

В работе применяются следующие сокращения для обозначения статистических параметров:

- r — коэффициент корреляции;
- R — коэффициент множественной корреляции;
- R^2 — коэффициент детерминации;
- SE — стандартная ошибка;
- F — критерий Фишера;
- p — уровень статистической значимости;
- B — стандартизированные коэффициенты регрессии;
- b — нестандартизированные коэффициенты регрессии (коэффициенты уравнения);
- t — критерий Стьюдента;
- df — число степеней свободы;
- SS — сумма квадратов отклонений значений признака Y ;
- MS — дисперсия на одну степень свободы;
- $CI \pm 95\%$ — доверительный интервал параметра.

Общий вид использованной для создания прогностических моделей формулы множественной линейной регрессии:

$$R = b_1 S(SRV) + b_2 F_1 + \dots + b_n F_n + b_0,$$

где R — численность пополнения запаса (возврат, подход);

- S — численность нерестового запаса;
- SRV — численность рыб, учтенных в море;
- b_0 — свободный член уравнения регрессии;
- $b_1, b_2, \dots, b_n$ — коэффициенты уравнения регрессии;
- $F_1, F_2, \dots, F_n$ — используемые климатические предикторы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика численности горбуши

Из представленных графиков видно, что численность горбуши Северо-Восточной Камчатки претерпела значительные изменения в 1990–2020-е гг. (рис. 3). Начиная с середины 2000-х гг. заметны тренды ее роста как для нерестовых запасов, так и для подходов. Отметим, что доминирующими по численности в регионе являются поколения возвратов производителей нечетных лет воспроизводства. Среднемноголетняя (1990–2022 гг.) численность нерестового регионального запаса горбуши составляла 32,3 (1,3–104,9) млн рыб (перед скобками — среднее, в скобках — минимум–максимум), а уровень подходов соответствующих поколений (1992–2024 гг.) — 83,7 (2,0–301,0) млн рыб. Длина полных рядов наблюдений численности производителей составляет 33 года.

Динамика численности молоди горбуши, учтенной на осенних траловых съемках в юго-западной части Берингова моря (2012–2023 гг.), представлена на рисунке 4. Среднемноголетняя численность сеголетков горбуши составляла 433 (95–996) млн рыб. Общая продолжительность ряда наблюдений — 10 лет. В работу включены только последние современные данные, так как в этот период климато-океанологические параметры отражают условия нагула вида на историческом пике численности. Аналогичный ряд используется и в практике долгосрочного прогнозирования динамики численности горбуши Северо-Восточной Камчатки с помощью зависимости «учет в море – возврат» (Бугаев и др., 2024).

Краткая характеристика океанологических условий в Беринговом море и сопредельных водах северной части Тихого океана в зимне-весенний период

Океанологические условия в северной части Тихого океана (включая Берингово море) в зимний и весенний периоды года определяются многими факторами. Основными из них являются обменные процессы с атмосферой (отдача/приход тепла и массы), а также адвекция и динамические процессы водных масс (вертикальные и горизонтальные течения, конвекция, апвеллинги и т. п.). Отсутствие прямых наблюдений за этими процессами заставляет нас обращаться к материалам дистанционного (спутникового) мониторинга. В частности, межгодовую изменчивость термических условий на большей части рассматриваемой акватории хорошо отражают

данные о степени развития ледового покрова в Беринговом море в 1992–2024 гг. (рис. 5).

Из представленного графика видно, что многолетняя динамика формирования площади льдов в Беринговом море в зимне-весенний период подвержена значительной изменчивости. Например, в 1990–2000-е гг. площадь льда в среднем составляла зимой около 370 тыс. км², а весной — 380 км². В 2010-е гг. наблюдалось значительное сокращение площади льдов: зима — 270 км², весна — 295 км². В 2020-е гг. снова наметилось увели-

чение площади льдов: зима — 290 км², весна — 320 км². Следует отметить, что снижение площади ледяного покрова в Беринговом море в 2010–2020-е гг. согласуется с увеличением численности горбуши Северо-Восточной Камчатки.

Наиболее вероятной причиной сокращения площади льдов может быть увеличение температуры поверхности в бассейне Берингова моря и прилегающих водах северной части Тихого океана. Это видно на примере роста SSTa с начала 2010-х гг. (рис. 6).

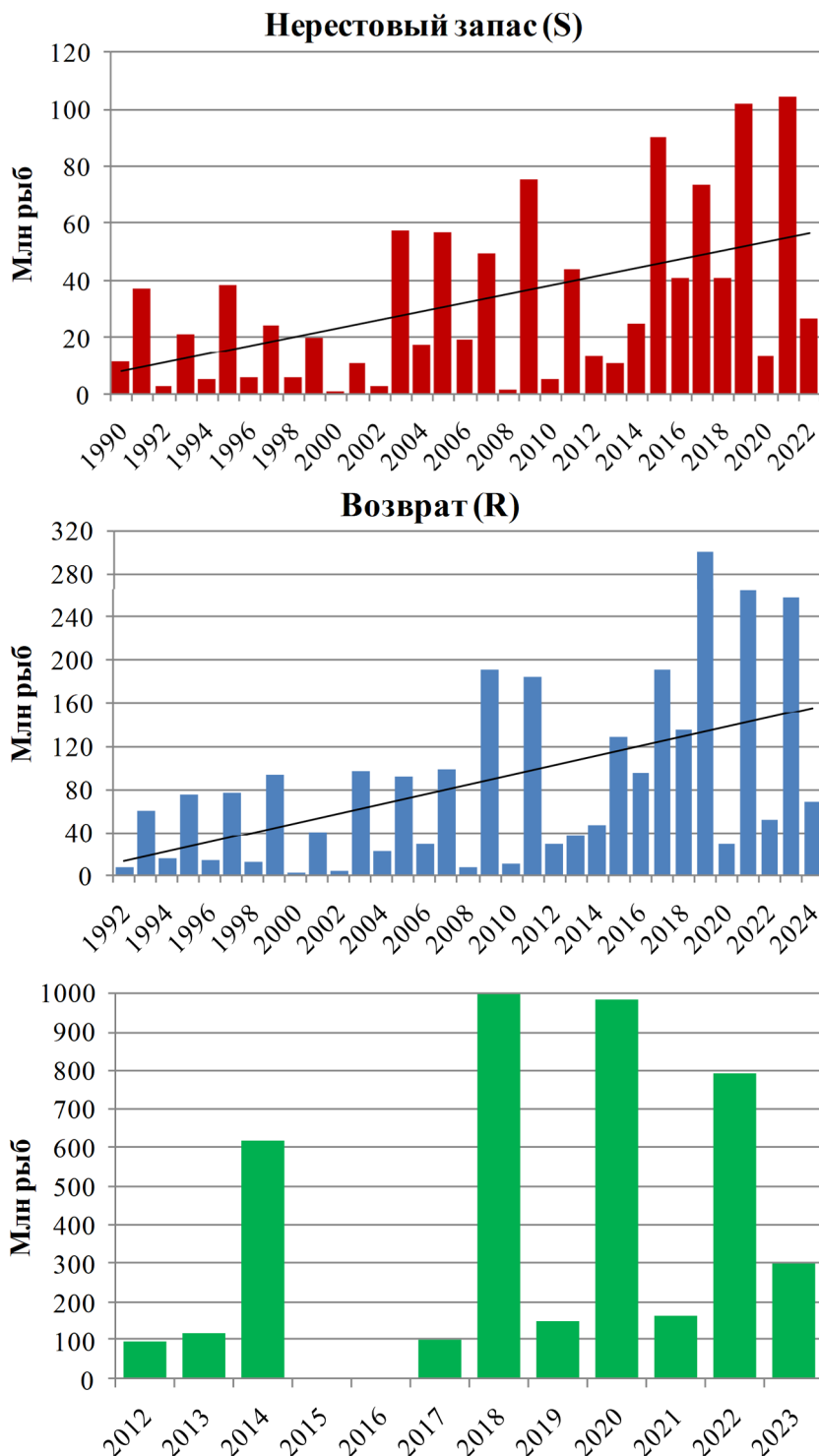


Рис. 3. Динамика численности нерестовых запасов (S) и возвратов (подходов) (R) горбуши Северо-Восточной Камчатки в 1990–2024 гг.
Fig. 3. Dynamics of the abundance of pink salmon spawning stock (S) and returns (runs) (R) in North-East Kamchatka in 1990–2024

Рис. 4. Динамика численности учетной молоди горбуши в период осенней откочевки по данным трапеловых съемок в юго-западной части Берингова моря в 2012–2023 гг. (по данным специалистов ТИНРО)
Fig. 4. Abundance dynamics of recorded juvenile pink salmon during autumn migration based on data of trawl surveys in the southwestern part of the Bering Sea in 2012–2023 (according to TINRO specialists)

Таким образом, очевидно, что рост температурных показателей поверхностных вод в Беринговом море и прилегающих водах северной части Тихого океана в зимне-весенний период привел к смене условий нагула горбуши Северо-Восточной Камчатки в 2010–2020-е гг. В настоящее время невозможно однозначно определить характер произошедших экосистемных изменений. Главной причиной этого

является отсутствие в регионе мониторинговых ихтиологических, гидробиологических и гидрологических исследований в зимне-весенний период. Поэтому в работе необходимо определить доступные климатические показатели, которые могут отражать влияние среды на биологическое состояние и формирование численности запасов горбуши Северо-Восточной Камчатки.

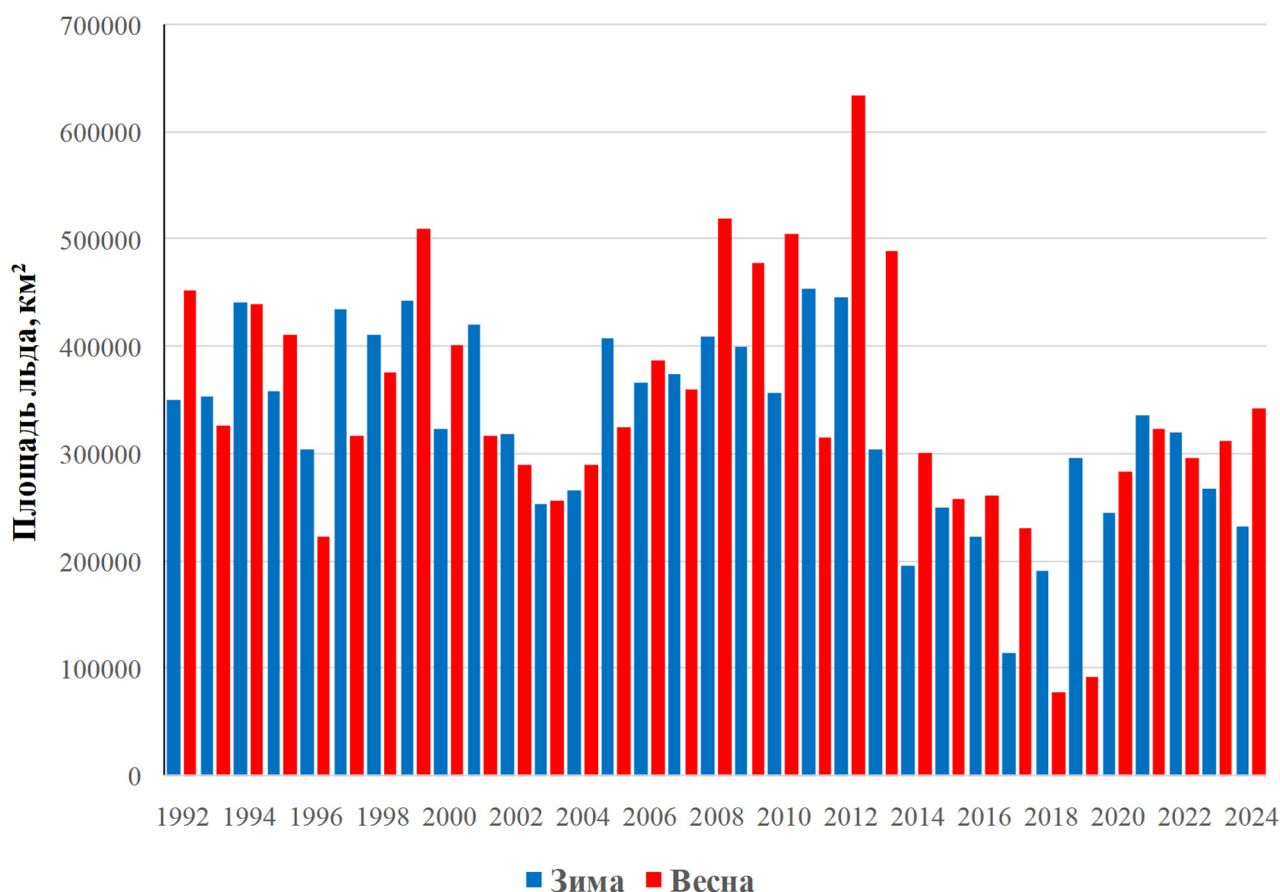


Рис. 5. Межгодовое изменение площади льдов (км²) в зимний и весенний периоды 1992–2024 гг. на акватории Берингова моря

Fig. 5. Interannual change in the ice area (km²) in winter and spring for the period 1992–2024 in the Bering Sea

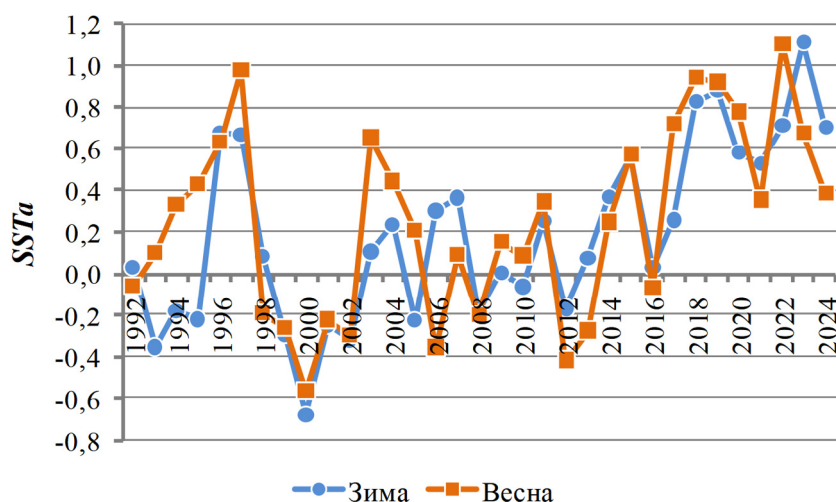


Рис. 6. Межгодовое изменение аномалий температуры поверхности моря/океана (SSTa) в зоне зимне-весеннего нагула горбуши Северо-Восточной Камчатки в западной части Берингова моря и сопредельных водах северной части Тихого океана в 1992–2024 гг.

Fig. 6. Interannual change in the sea/ocean surface temperature anomalies (SSTa) in the winter-spring feeding area of pink salmon of North-East Kamchatka in the western part of the Bering Sea and adjacent waters of the North Pacific Ocean in 1992–2024

Климато-океанологические предикторы

Выживаемость горбуши во время морского/океанического нагула значительно отличается на различных этапах ее жизненного цикла. Первый этап включает скат мальков в мае–июне из нерестовых рек в эстуарно-прибрежные воды. В этот период смертность горбуши может достигать 90% (Грачев и др., 1982). Второй этап жизненного цикла вида можно обозначить как время осенней откочевки из прибрежья в открытые морские/океанские воды. Это происходит в период с августа до ноября, но, как правило, в сентябре–октябре практически вся молодежь уже находится в открытых водах. На данном этапе смертность откочевывающей молодежи в среднем может варьировать в пределах 30–70% (Карпенко, 1998; Бугаев, Герлиц, 2023). Следующий период нагула горбуши включает зимовальные и преднерестовые миграции. На данном этапе ее смертность составляет около 20–30% (Шунтов, Темных, 2011).

В представленной работе рассматривается именно третий этап жизненного цикла горбуши Северо-Восточной Камчатки. Несмотря на относительно низкую потенциальную смертность, по сравнению с ранним морским периодом жизни, в период зимовальных и ранних преднерестовых миграций формируется зрелая часть стада, то есть тех рыб, которые вернутся к нерестовым рекам и, соответственно, будут составлять основу прибрежно-речного промысла. Причем даже незначительные изменения условий нагула на данном этапе жизненного цикла могут серьезно отразиться на фактических подходах горбуши. К примеру, разница при уровне смертности на заключительном этапе морского нагула в 20% или 30% (от учтенного количества молодежи во время осенней откочевки) может привести к увеличению или сокращению численности подхода горбуши в урожайные годы до 100 млн рыб.

Обращаем внимание, что горбуша относится к короткоцикловым видам тихоокеанских лососей. Продолжительность ее жизненного цикла составляет всего два года. Из них приблизительно один год она проводит в море/океане. Поэтому использование климато-океанологических данных во время зимне-весеннего нагула горбуши для прогнозирования ее численности возможно только на заключительном этапе ее жизни. Следовательно, корректировка оценок численности возвратов горбуши в зависимости от условий ее нагула зимой и весной будет иметь характер краткосрочного

или оперативного прогнозирования. Аналогичные работы ранее проводились на дрейтерных судах, которые осуществляли контрольные обловы в районах массовых преднерестовых миграций горбуши Северо-Восточной Камчатки (Бугаев, 2015). Отметим, что для получения долгосрочных прогнозов необходимо привлекать климато-океанологические данные, полученные в осенний период, когда в открытых морских водах формируется основная численность запасов вида (Бугаев и др., 2024).

Оценка степени воздействия климатических факторов на условия зимне-весеннего нагула горбуши возможна путем нахождения зависимости их влияния на численность возвратов. Подобную закономерность можно обозначить как взаимосвязь «климатические индексы – возврат». Эта зависимость не рассматривается в качестве прогностической модели, так как в числе предикторов отсутствует показатель, характеризующий численность исходного запаса (нерестовый, учет в море). Правильнее эту зависимость рассматривать как реакцию влияния изменчивости климато-океанологических условий на численность подходов горбуши. Наличие подобной зависимости вполне подтверждается умеренным коэффициентом корреляции/регрессии ($r/R = 0,4–0,7$). Это обусловлено тем, что климато-океанологические условия могут влиять на численность нагуливающих рыб только опосредованно, через изменение состояния кормовой базы и темпов роста. Поэтому показатели подобных взаимосвязей в большинстве случаев априори не могут иметь высокую статистическую значимость.

Принимая во внимание, что температурный режим вод в местах нагула рыб потенциально является важнейшим фактором, характеризующим условия нагула, нами был проведен корреляционный анализ зависимости « $SSTa$ – возврат» в зоне массовых зимне-весенних миграций горбуши Северо-Восточной Камчатки в Беринговом море и прилегающих водах северной части Тихого океана (рис. 7). Полученные данные позволили четко обозначить зоны влияния температуры на выживаемость рыб. В зимний период во время нагульных миграций наибольшее значение для формирования численности производителей горбуши имеет терморегим вод западной и центральной частей Берингова моря: $r = 0,4–0,5$. В весенний период на начальном этапе преднерестовых миграций наблюдается смещение поля схожих значений корреляции ближе к побережью Северо-Восточной Камчатки. Кроме того, возрас-

тает влияние температурного фактора ближе к центральной части севера Тихого океана в районе Алеутских островов. Все это согласуется известными закономерностями зимовальных и преднерестовых миграций горбуши в морской/океанический период жизни (Бирман, 1985; Шунтов, Темных, 2011; Бугаев, 2015).

Таким образом, в качестве потенциальных предикторов можно выделить показатели *SSTa* из следующих обозначенных районов: зимний период — районы 2, 5 и 6; весенний период — районы 1, 2 и 5. Средние значения *SSTa* по указанным районам дадут нам два четких предиктора с учетом сезонной принадлежности. В работе мы их обозначаем как *SSTa_W* (2, 5, 6) и *SSTa_S* (1, 2, 5).

Помимо температурного фактора, на численность подходов горбуши оказывают опосредованное воздействие и другие климатические факторы, которые описываются индекса-

ми *WP*, *PDO* и *AO*. Ранее в практике прогнозирования динамики численности горбуши Северо-Восточной Камчатки данные индексы применялись при использовании в различных многомерных прогностических моделях (Фельдман, Шевляков, 2015; Фельдман, 2020; Фельдман, Бугаев, 2021; Бугаев и др., 2024). Поэтому представленные климатические индексы предлагаются в настоящей работе в качестве предикторов. Кроме того, нами в работу был дополнительно включен новый индекс — *NPGO*, который успешно использовался для характеристики влияния температурного режима вод Северной Пацифики на региональную продуктивность рыбных ресурсов (Кровнин, 2020). На рисунке 8 показана динамика межгодовой изменчивости всех вышеперечисленных предикторов в зимний и весенний периоды.

Оценку классификации взаимосвязи (воспроизведение в системе факторных координат)

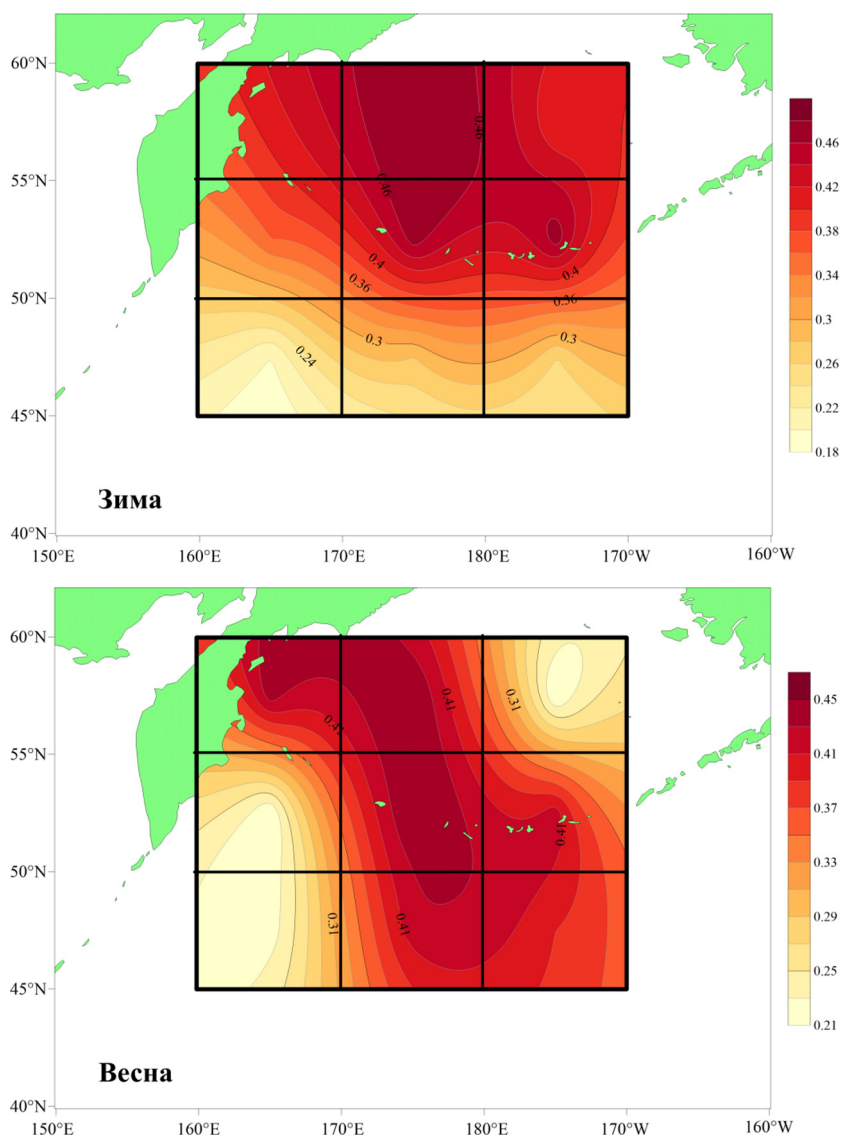


Рис. 7. Распределение значений коэффициентов корреляций взаимосвязи «*SSTa* – возврат» в зоне зимне-весеннего нагула горбуши Северо-Восточной Камчатки в Беринговом море и сопредельных водах северной части Тихого океана по данным 1992–2024 гг.

Fig. 7. Distribution of the values of the correlation coefficients of the “*SSTa* – return” relationship in the winter-spring feeding area of pink salmon in North-East Kamchatka in the Bering Sea and adjacent waters of the northern part of the Pacific Ocean according to data for the period 1992–2024

между значениями $SSTa$ и различных климатических индексов производили с помощью анализа главных компонент. На графике факторных координат показано распределение переменных на единичном круге, так как ко-

эффициенты корреляции (координаты точек) наблюдений с факторными осями принимают значения в интервале от 0 до 1 (рис. 9). В данном случае из пяти факторов задействованы только первый и второй (табл. 1). Их суммарный

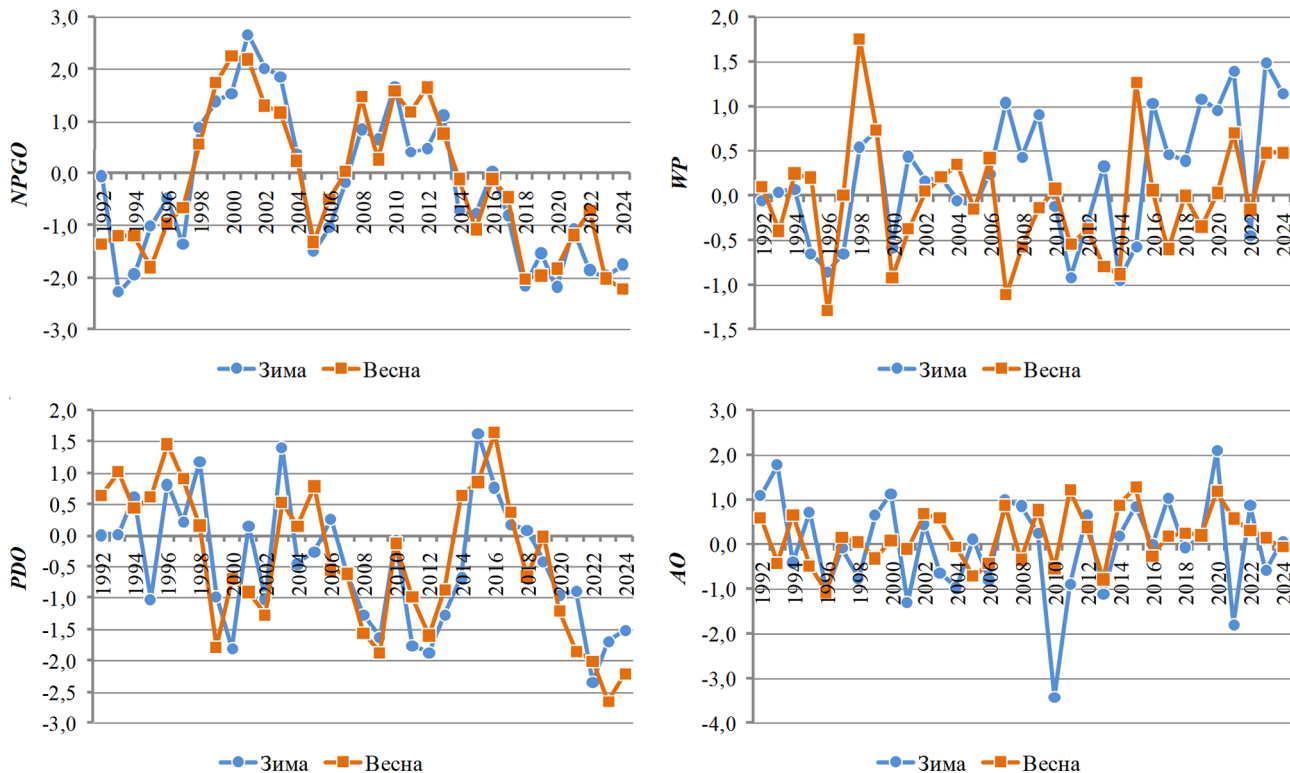


Рис. 8. Многолетняя динамика изменчивости климатических индексов (факторов), характеризующих климато-океанологические условия в западной части Северной Пацифики в 1992–2024 гг.
Fig. 8. Long-term dynamics of variability of climate indices (factors) characterizing climate and oceanographic conditions in the western part of the North Pacific in 1992–2024

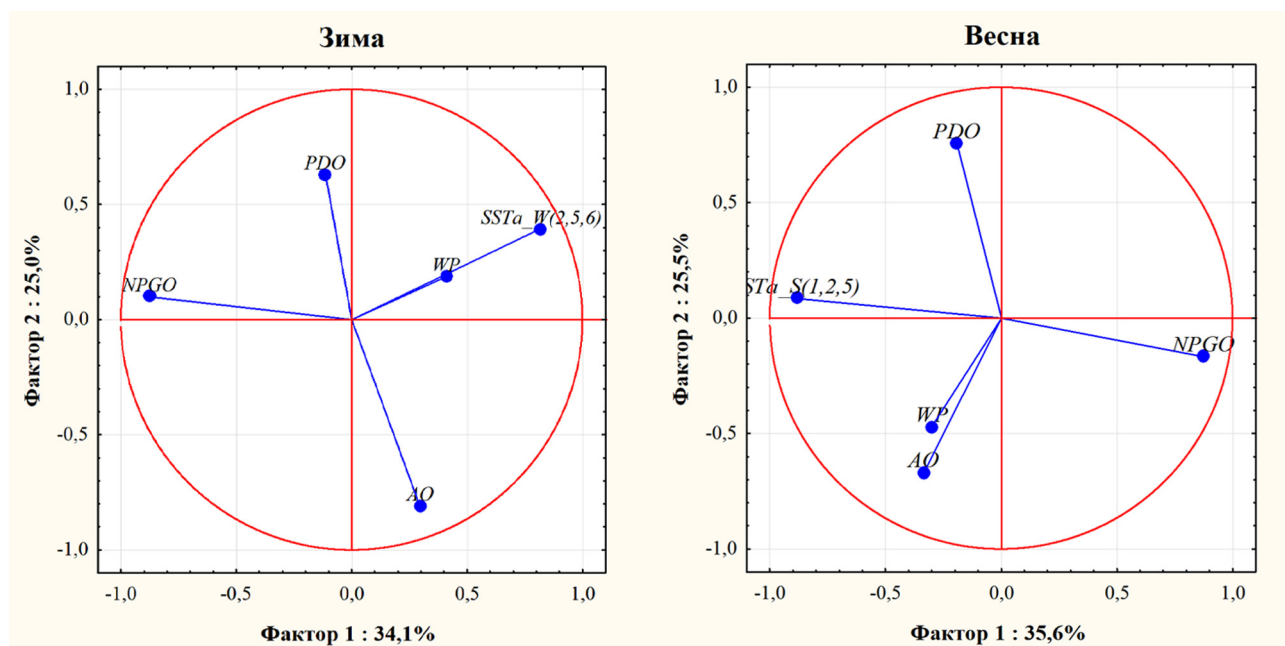


Рис. 9. Распределение $SSTa$ и климатических индексов в координатах первого и второго факторов для зимнего и весеннего периодов по данным 1992–2024 гг.
Fig. 9. Distribution of the $SSTa$ and climate indices in the coordinates of the first and second factors for winter and spring according to data for the period 1992–2024

вклад в объяснение признака составляет около 60% (рис. 9). Обращаем внимание, что чем ближе переменные (*SSTa* и климатические индексы) к единичной окружности, тем лучше они воспроизводятся в найденной системе координат.

Из результатов проведенного анализа главных компонент следует, что в зимний период наиболее заметное воздействие на полученную систему факторных координат оказывают такие индексы, как *NPGO*, *AO* и *SSTa_W* (2, 5, 6). Соответственно, в весенний период наиболее активными являются индексы *NPGO*, *PDO* и *SSTa_S* (1, 2, 5). Однако виден разный уровень воздействия факторных координат. Это указывает на то, что необходим отбор переменных при подготовке прогностической модели. При этом нельзя не учитывать, что первый и второй факторы объясняют лишь 60% признака.

Далее был проведен корреляционный анализ для оценки взаимосвязи предикторов (рис. 10). Исходя из полученных данных, относительно высокий умеренный коэффициент корреляции наблюдается лишь у двух пар индексов. В зимний период связь наблюдалась между *NPGO* и *SSTa_W* (2, 5, 6): $r = -0,59$, а в весенний период — между *NPGO* и *SSTa_S* (1, 2, 5): $r = -0,65$. Обращает внимание однородный характер корреляционной зависимости обоих пар наблюдений. В остальных случаях связь практически отсутствует. Это соответствует требованиям для построения прогностических многомерных регрессионных моделей, так как желательно, чтобы предикторы не имели значимой корреляции друг с другом.

Следующим шагом отбора наиболее активных предикторов было построение многомерных регрессионных моделей. Они характеризуют зависимость «климатические индексы + *SSTa* – возврат» для зимнего и весеннего периодов 1992–2024 гг. (табл. 2). Полученные резуль-

таты показали, что в обоих случаях существует умеренная связь. В зимний период коэффициент множественной корреляции $R = 0,62$, а в весенний период $R = 0,57$. Безусловно, данный уровень зависимости нельзя назвать высоким, так как в первом случае объясняется лишь 39% дисперсии зависимой переменной ($R^2 = 0,39$), а во втором — 32% ($R^2 = 0,32$). Однако в реальной ситуации опосредованно влияющие на состояние запасов горбуши климато-океанологические факторы не должны иметь определяющей роли в объяснении динамики ее численности. В данном случае они лишь будут дополнять ключевой для прогностической модели фактор исходной численности.

Принимая во внимание наличие достаточно большого количества включенных в модель климатических параметров, нами был выполнен пошаговый регрессионный анализ, который позволил выявить наиболее активные предикторы без потери общего уровня зависимости (табл. 3).

Результаты показали, что в зимний период наиболее значимыми являются такие предикторы, как *SSTa_W* (2, 5, 6) и *WP*, а в весенний период — *SSTa_S* (1, 2, 5) и *PDO*. В первом случае коэффициент множественной корреляции составил $R = 0,61$, во втором случае — $R = 0,54$. Полученные связи оказались статистически достоверными. Таким образом, включение данных предикторов в прогностическую модель для оперативного уточнения численности прогнозов подходов горбуши Северо-Восточной Камчатки вполне обоснованно.

Прогностические регрессионные модели

Как ранее было обозначено, прогноз подходов горбуши с учетом климато-океанологических факторов в зимне-весенний период может быть лишь краткосрочным, то есть его

Таблица 1. Факторные координаты значений *SSTa* и климатических индексов в зимний и весенний периоды по данным 1992–2024 гг.
Table 1. Factor coordinates of the *SSTa* values and climate indices in winter and spring on the data for the period 1992–2024

Сезон Season	Индексы Indices	Фактор 1 Factor 1	Фактор 2 Factor 2	Фактор 3 Factor 3	Фактор 4 Factor 4	Фактор 5 Factor 5
Зима Winter	<i>NPGO</i>	–0,88	0,10	0,32	–0,05	0,34
	<i>WP</i>	0,41	0,19	0,74	–0,50	–0,05
	<i>PDO</i>	–0,11	0,63	–0,56	–0,53	0,03
	<i>AO</i>	0,30	–0,81	–0,23	–0,40	0,21
	<i>SSTa_W</i> (2, 5, 6)	0,82	0,39	–0,02	0,27	0,32
Весна Spring	<i>NPGO</i>	0,88	–0,17	0,09	–0,25	–0,37
	<i>WP</i>	–0,30	–0,47	–0,81	–0,12	–0,10
	<i>PDO</i>	–0,19	0,76	–0,16	–0,60	0,00
	<i>AO</i>	–0,34	–0,67	0,40	–0,52	0,12
	<i>SSTa_S</i> (1, 2, 5)	–0,88	0,08	0,25	0,12	–0,37

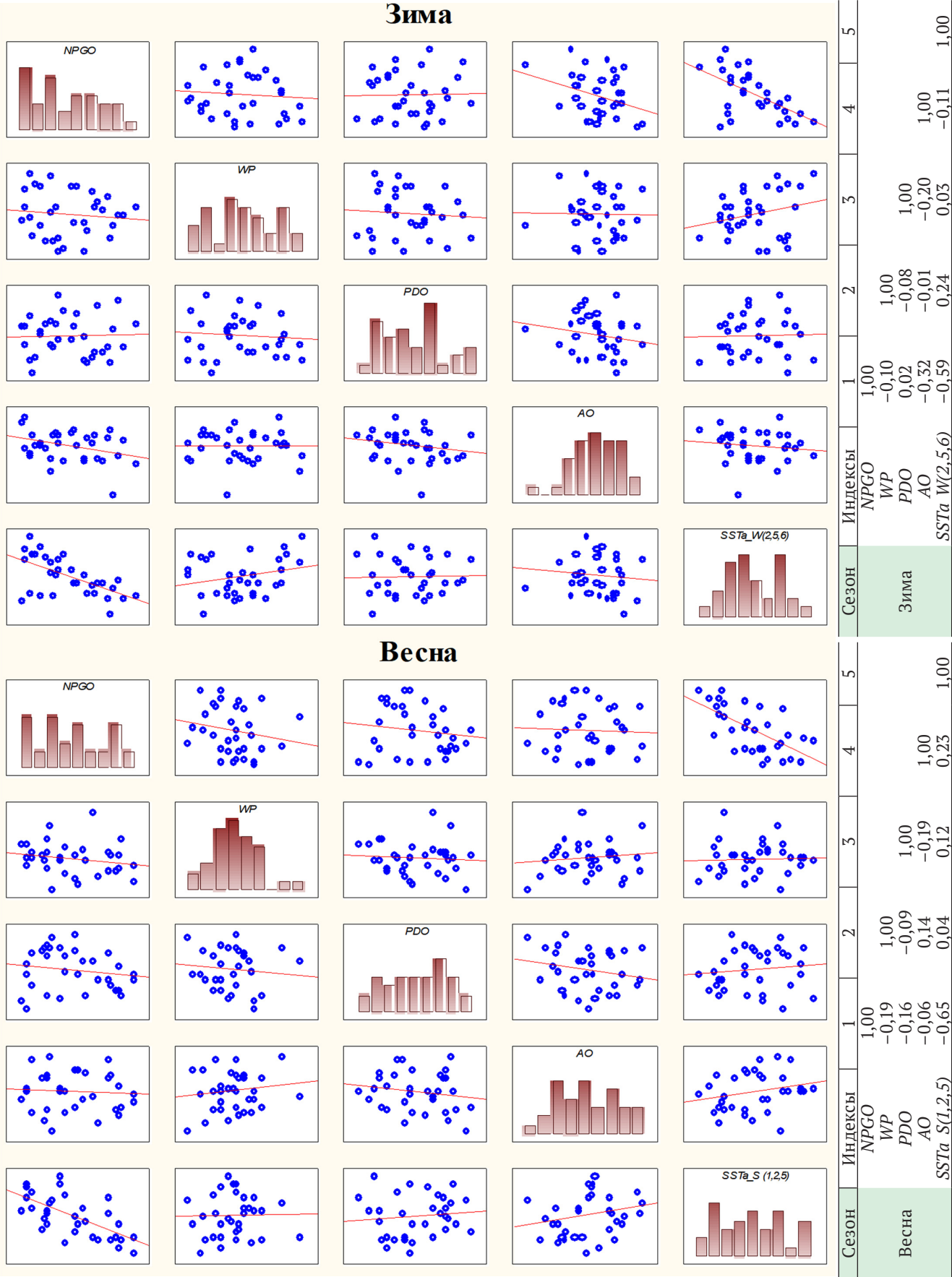


Рис. 10. Диаграммы рассеяния и корреляционная матрица значений *SSTa* и климатических индексов в зимний и весенний периоды по данным 1992–2024 гг.
Fig. 10. Scatter plots and correlation matrix of the values of the *SSTa* and climate indices in winter and spring based on the data for 1992–2024

можно подготовить только непосредственно перед началом лососевой путины. Это обусловлено особенностями жизненного цикла вида, который проводит в море/океане лишь 10–12 месяцев. Продолжительность морского/океанического периода жизни зависит от региональных закономерностей сроков ската молоди и захода производителей в нерестовые реки. Поэтому для горбуши долгосрочный прогноз всегда делается с заблаговременностью приблизительно в один год. Непосредственно для горбуши Северо-Восточной Камчатки при его подготовке используются следующие количественные данные:

- численность производителей на нерестилищах (июль–август, с лагом два года);
- численность молоди во время ската из рек в эстуарно-прибрежные воды (май–июнь, с лагом один год);
- численность молоди во время осенней откочевки от побережья в открытые морские/океанские воды (сентябрь–ноябрь, с лагом один год).

Краткосрочный прогноз с учетом условий зимнего нагула горбуши Северо-Восточной

Камчатки может быть использован для оперативной корректировки долгосрочного прогноза с заблаговременностью приблизительно 4 месяца, так как лососевая путина в Карагинской подзоне начинается с середины июня. Соответственно, краткосрочный прогноз, учитывающий условия весеннего нагула, сокращает заблаговременность корректировки долгосрочного прогноза до 1 месяца.

В качестве базовых предикторов в работе использованы данные рядов наблюдений о нерестовом запасе (*S*) производителей в реках Северо-Восточной Камчатки и количестве сеголетков (*SRV*), учтенных на осенних траловых съемках в Беринговом море. Соответственно, в качестве климатических предикторов для зимы были включены *SSTa_W* (2, 5, 6) и *WP*, а для весны — *SSTa_S* (1, 2, 5) и *PDO*.

Статистические и графические данные моделирования прогнозов типа «запас – пополнение» с учетом климато-океанологических факторов в зимне-весенний период для определения численности возвратов (*R*) горбуши Северо-Восточной Камчатки представлены в таблицах 4 и 5, а также на рисунке 11.

Таблица 2. Описательная статистика многомерных регрессионных моделей зависимости «климатические индексы + *SSTa* – возврат» для горбуши Северо-Восточной Камчатки по данным 1992–2024 гг. (включение всех предикторов)

Сезон Season	N	R	R ²	SE	F	p	Предикторы Predictors	B	SE (B)	b	SE (b)	t	p
Зима Winter	33	0,62	0,39	69,50	3,44	<0,05	Свободный член Free variable			56,39	14,66	3,85	<0,001
							<i>NPGO</i>	–0,09	0,21	–5,45	12,33	–0,44	0,662
							<i>WP</i>	0,35	0,16	40,85	18,40	2,22	<0,05
							<i>PDO</i>	–0,11	0,15	–8,72	12,31	–0,71	0,485
							<i>AO</i>	–0,07	0,18	–5,17	13,09	–0,40	0,696
							<i>SSTa_W</i> (2, 5, 6)	0,36	0,21	69,42	39,61	1,75	0,091
Весна Spring	33	0,57	0,32	73,36	2,54	0,052	Свободный член Free variable			55,90	15,92	3,51	<0,01
							<i>NPGO</i>	–0,17	0,22	–10,41	13,16	–0,79	0,436
							<i>WP</i>	0,01	0,17	0,99	21,04	0,05	0,963
							<i>PDO</i>	–0,26	0,17	–18,70	11,71	–1,60	0,122
							<i>AO</i>	0,12	0,17	16,51	23,10	0,71	0,481
							<i>SSTa_S</i> (1, 2, 5)	0,35	0,22	63,51	39,57	1,60	0,120

Таблица 3. Описательная статистика многомерных регрессионных моделей взаимосвязи «климатические индексы + *SSTa* – возврат» для горбуши Северо-Восточной Камчатки по данным 1992–2024 гг. (пошаговый отбор предикторов)

Table 3. Descriptive statistics of the multivariate regression models of the correlation “climate indices + the *SSTa* – return” for pink salmon in North-East Kamchatka based on the data for the period 1992–2024 (step-by-step selection of predictors)

Сезон Season	N	R	R ²	SE	F	p	Предикторы Predictors	B	SE (B)	b	SE (b)	t	p
Зима Winter	33	0,61	0,37	66,75	8,97	<0,001	Свободный член Free variable			59,57	12,99	4,59	<0,001
							<i>SSTa_W</i> (2, 5, 6)	0,42	0,15	80,62	28,37	2,84	<0,01
							<i>WP</i>	0,35	0,15	41,40	17,55	2,36	<0,05
Весна Spring	33	0,54	0,29	71,01	6,18	<0,01	Свободный член Free variable			53,74	15,05	3,57	<0,01
							<i>SSTa_S</i> (1, 2, 5)	0,50	0,15	89,32	27,80	3,21	<0,01
							<i>PDO</i>	–0,28	0,15	–19,70	10,95	–1,80	0,082

Коэффициенты детерминации обеих моделей очень близки: $R^2 = 0,75-0,76$, что дает объяснение приблизительно 75% изменчивости искомого признака. Это позволяет определить тенденцию динамики численности возвратов горбуши Северо-Восточной Камчатки. Однако коэффициенты детерминации практически совпадают с результатами схожего многомерного моделирования, выполненного в рамках долгосрочного прогнозирования рассматриваемой единицы запаса (Бугаев и др., 2024).

В статистике принято, что, если $R^2 > 0,9$, то говорят о высокой точности аппроксимации (модель хорошо описывает явление) (Курзаева, 2016). В случаях, когда R^2 лежит в диапазоне от 0,7 до 0,9, говорят об удовлетворительной аппроксимации (модель в целом адекватна описываемому

явлению). Если $R^2 < 0,6$, принято считать, что точность аппроксимации недостаточна и модель требует улучшения (введения новых независимых переменных, учета нелинейности и т. д.).

Представленные выше модели соответствуют удовлетворительному уровню аппроксимации. Теоретически они могут служить для корректировки оценок потенциальных подходов горбуши Северо-Восточной Камчатки. Однако их точность недостаточна для вынесения однозначных решений о необходимости подобных корректировок, поскольку долгосрочные модели имеют сходный уровень аппроксимации.

Более перспективным нам представляется использование в качестве базового предиктора данных об оценках численности молоди горбуши на осенних траловых съемках в Беринго-

Таблица 4. Описательная статистика регрессионной модели зависимости типа «запас – пополнение» с учетом климато-океанологических условий в зимний период для оперативного прогнозирования численности подходов горбуши Северо-Восточной Камчатки по данным 1992–2024 гг.
Table 4. Descriptive statistics of the regression model of the correlation “stock – recruitment” taking into account climate and oceanological conditions in winter for the operational forecasting of the abundance of pink salmon runs in North-East Kamchatka based on the data for the period 1992–2024

Регрессионная статистика / Regression statistics						
R	0,867					
R ²	0,752					
Нормированный / adjusted) R ²	0,726					
SE	42,709					
Наблюдения / Observations	33					
Дисперсионный анализ / Analysis of variance						
	df	SS	MS	F	p (F)	
Регрессия / Regression	3	160 643,7	53 547,89	29,355	<0,001	
Остаток / Residual	29	52 899,32	1824,115			
Итого / Total	32	213 543				
Параметры / Parameters						
	b	SE	t	p	CI -95%	CI +95%
Свободный член / Free variable	9,007	11,263	0,799	0,430	-14,029	32,044
S	2,100	0,315	6,655	<0,001	1,455	2,746
SSTa_W (2, 5, 6)	31,812	19,585	1,624	0,115	-8,245	71,869
WP (зима / winter)	3,733	12,578	0,296	0,768	-21,993	29,459

Таблица 5. Описательная статистика регрессионной модели зависимости типа «запас – пополнение» с учетом климато-океанологических условий в весенний период для оперативного прогнозирования численности подходов горбуши Северо-Восточной Камчатки по данным 1992–2024 гг.
Table 5. Descriptive statistics of the regression model of the correlation “stock – recruitment” taking into account climate and oceanological conditions in spring for the operational forecasting of the abundance of pink salmon runs in North-East Kamchatka based on the data for the period 1992–2024

Регрессионная статистика / Regression statistics						
R	0,872					
R ²	0,760					
Нормированный / (adjusted) R ²	0,735					
SE	42,063					
Наблюдения / Observations	33					
Дисперсионный анализ / Analysis of variance						
	df	SS	MS	F	p (F)	
Регрессия / Regression	3	162 233,2	54077,72	30,564	<0,001	
Остаток / Residual	29	51 309,84	1769,305			
Итого / Total	32	213 543				
Параметры / Parameters						
	b	SE	t	p	CI -95%	CI +95%
Свободный член / Free variable	5,519	10,985	0,502	0,619	-16,948	27,987
S	2,144	0,285	7,508	<0,001	1,560	2,728
SSTa_S (1, 2, 5)	34,483	18,040	1,911	0,065	-2,413	71,381
PDO (весна/spring)	-1,251	6,938	-0,180	0,858	-15,443	12,940

вом море. На этом этапе формируется основа численности потенциального возврата (Бирман, 1985; Карпенко, 1998; Шунтов, Темных, 2008), так как уже пройдены такие критические этапы жизненного цикла горбуши, как скат мальков из рек в прибрежье, а также откочевка молоди из прибрежья в открытые морские воды. По сути, именно эта часть запаса и будет

осуществлять нагул в зимне-весенний период в Беринговом море и сопредельных водах северной части Тихого океана.

Результаты регрессионного анализа зависимости «учет в море + $SSTa$ – возврат» для оперативного прогнозирования подходов горбуши Северо-Восточной Камчатки представлены в таблицах 6 и 7, а также на рисунке 12.

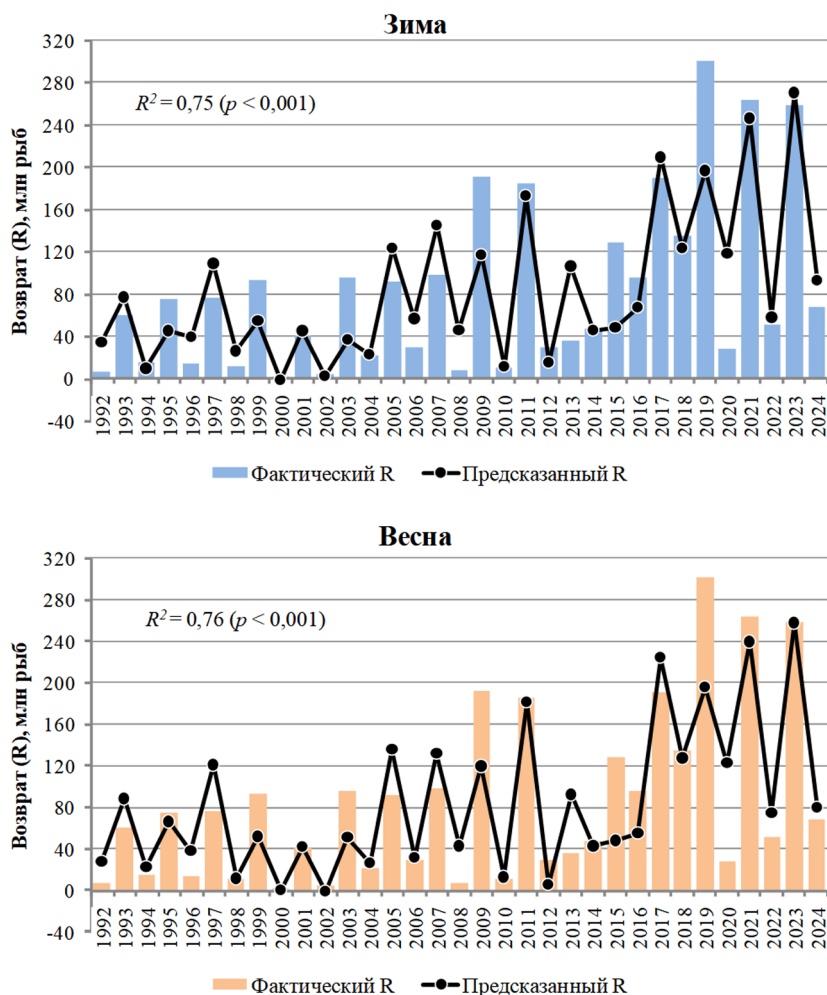


Рис. 11. Графики подбора предсказанных и наблюдаемых значений возвратов (R) горбуши Северо-Восточной Камчатки, полученных на основе регрессионных моделей зависимости типа «запас – пополнение» с учетом климато-океанологических факторов по данным 1992–2024 гг.

Fig. 11. Graphs of the pairs of predicted and observed values of returns (R) of North-East Kamchatka pink salmon, obtained on the basis of regression models of the stock-recruitment type correlation, taking into account climate and oceanographic factors according to data of the period 1992–2024

Таблица 6. Описательная статистика регрессионной модели зависимости «учет в море + $SSTa$ $W(2, 5, 6)$ – возврат» для оперативного прогнозирования численности подходов горбуши Северо-Восточной Камчатки по данным 2013–2024 гг.

Table 6. Descriptive statistics of the regression model of the correlation “account at sea + $SSTa$ $W(2, 5, 6)$ – return” for the operational forecasting of pink salmon runs in North-East Kamchatka based on the data for the period 2013–2024

Регрессионная статистика / Regression statistics						
R	0,946					
R ²	0,895					
Нормированный / (adjusted) R ²	0,865					
SE	38,576					
Наблюдения Observations	10					
Дисперсионный анализ / Analysis of variance						
	df	SS	MS	F	p (F)	
Регрессия / Regression	2	89 046,529	44 523,265	29,919	< 0,001	
Остаток / Residual	7	10 416,794	1488,113			
Итого / Total	9	99 463,323				
Параметры / Parameters						
	b	SE	t	p	CI –95%	CI +95%
Свободный член / Free variable	–19,376	31,102	–0,623	0,553	–92,920	54,169
SRV	0,231	0,038	6,054	<0,01	0,141	0,322
SSTa W(2, 5, 6)	80,523	50,315	1,600	0,154	–38,453	199,499

Из полученных результатов следует, что прогностический потенциал предлагаемых моделей заметно превосходит таковой по зависимости «запас – пополнение» с учетом климатических факторов (табл. 4 и 5). Для зимнего периода коэффициент детерминации (R^2) составляет 0,90, а для весеннего – 0,87. Пола-

гаем, что модель, включающая оценки численности молоди в Беринговом море и данные о температурном режиме в зоне ее зимнего нагула, позволяет достаточно точно прогнозировать численность возвратов горбуши Северо-Восточной Камчатки. В данном случае максимальная заблаговременность корректиров-

Таблица 7. Описательная статистика регрессионной модели зависимости «учет в море + $SSTa$ $S(1, 2, 5)$ – возврат» для оперативного прогнозирования численности подходов горбуши Северо-Восточной Камчатки по данным 2013–2024 гг.

Table 7. Descriptive statistics of the regression model of the correlation “account at sea + $SSTa$ $S(1, 2, 5)$ – return” for the operational forecasting of pink salmon runs in North-East Kamchatka based on the data for the period 2013–2024

Регрессионная статистика / Regression statistics						
R	0,934					
R^2	0,873					
Нормированный / (adjusted) R^2	0,836					
SE	42,541					
Наблюдения / Observations	10					
Дисперсионный анализ / Analysis of variance						
	df	SS	MS	F	p	
Регрессия / Regression	2	86 795,175	43 397,588	23,980	< 0,01	
Остаток / Residual	7	12 668,148	1809,735			
Итого / Total	9	99 463,323				
Параметры / Parameters						
	b	SE	t	p	$CI - 95\%$	$CI + 95\%$
Свободный член / Free variable	3,631	27,403	0,133	0,898	-61,168	68,430
SRV	0,253	0,038	6,646	<0,001	0,163	0,344
$SSTa$ $S(1, 2, 5)$	32,596	35,108	0,928	0,384	-50,420	115,612

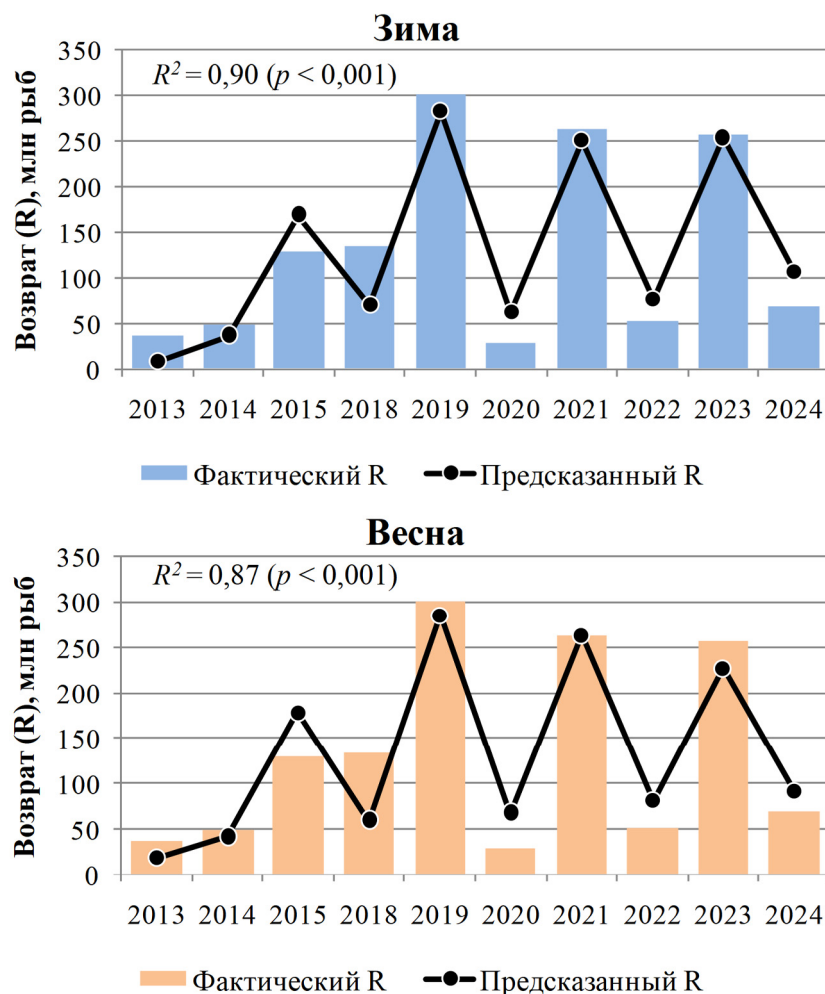


Рис. 12. Графики подбора предсказанных и наблюдаемых значений возвратов (R) горбуши Северо-Восточной Камчатки, полученных на основе регрессионных моделей зависимости «учет в море + $SSTa$ – возврат» по данным 2013–2024 гг.

Fig. 12. Graphs of the pairs of predicted and observed values of returns (R) of North-East Kamchatka pink salmon, obtained on the basis of regression models of the counts at sea + $SSTa$ – return according to data of the period 2013–2024

ки долгосрочных прогнозов составляет 4 месяца. Этого времени достаточно, чтобы принять административные решения по регулированию лососевого промысла в Карагинской подзоне. Однако следует признать, что настоящий ряд наблюдений (10 лет) пока недостаточен для разработки полноценных рекомендаций по данному вопросу. Необходимо продолжить ряд наблюдений для повышения репрезентативности полученных прогностических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенных исследований по оценке влияния климато-океанологических условий зимне-весеннего нагула горбуши Северо-Восточной Камчатки на ее численность были получены следующие результаты.

Оценены океанологические условия в зоне зимне-весеннего нагула горбуши Северо-Восточной Камчатки в Беринговом море и сопредельных водах северной части Тихого океана в современный период. Отмечено, что температурный режим вод в местах нагула оказывает воздействие на динамику численности ее запасов. Полученные коэффициенты корреляций (r) по зависимости « $SSTa$ – возврат» соответствовали 0,4–0,5.

С помощью регрессионных моделей зависимости «климатические индексы + $SSTa$ – возврат» определены наиболее значимые климатические параметры, которые могут быть использованы в качестве предикторов для построения прогностических моделей с целью оперативного прогнозирования численности подходов горбуши Северо-Восточной Камчатки. В зимний период таковыми являются $SSTa_W$ (2, 5, 6) и WP , в весенний период — $SSTa_S$ (1, 2, 5) и PDO . В первом случае коэффициент множественной корреляции (R) составил 0,61, а во втором — 0,54.

Построены прогностические модели типа «запас – пополнение» и «учет в море – возврат» с учетом климато-океанологических факторов, влияющих на динамику численности возвратов горбуши Северо-Восточной Камчатки во время зимне-весеннего нагула. Первый тип связей характеризовался коэффициентами детерминации (R^2) на уровне 0,75–0,76, второй тип — 0,87–0,90. Наиболее перспективной для краткосрочного прогнозирования динамики численности горбуши Северо-Восточной Камчатки представляется зависимость «учет в море + $SSTa$ – возврат».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Бабаян В.К., Бобырев А.Е., Булгакова Т.И., Васильев Д.А., Ильин О.И., Ковалев Ю.А., Михайлов А.И., Михеев А.А., Петухова Н.Г., Сафаралиев И.А., Четыркин А.А., Шереметьев А.Д. 2018. Методические рекомендации по оценке запасов приоритетных видов водных биологических ресурсов. М.: ВНИРО. 312 с.
- Бирман И.Б. 1985. Морской период жизни и вопросы динамики численности стада тихоокеанских лососей. М.: Агропромиздат. 208 с.
- Бугаев А.В. 2015. Преднерестовые миграции тихоокеанских лососей в экономической зоне России. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. 416 с.
- Бугаев А.В. 2017. Оценка влияния численности стад и глобальной температурной аномалии на среднюю массу тела тихоокеанских лососей в бассейне Северной Пацифики // Изв. ТИНРО. Т. 191. С. 3–33. EDN: ZUFHEN. doi:10.26428/1606-9919-2017-191-3-33
- Бугаев А.В., Герлиц А.И. 2023. Характеристика нагульных миграций заводской молодежи тихоокеанских лососей в бассейне Охотского моря и прилегающих водах Тихого океана в осенне-зимний период (региональная идентификация, численность и распределение уловов, биологические показатели, оценки смертности) // Изв. ТИНРО. Т. 203, вып. 1. С. 16–45. EDN: QCEING. doi:10.26428/1606-9919-2023-203-16-45
- Бугаев А.В., Тепнин О.Б. 2024. Климат и тихоокеанские лососи. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. 280 с. EDN: YVAMSM. doi:10.15853/9785902210467
- Бугаев А.В., Тепнин О.Б., Шнигальская Н.Ю., Кулик В.В. 2024. Описание регрессионных моделей для прогнозирования динамики численности горбуши Камчатского края на основе климато-океанологических и популяционно-генетических данных // Изв. ТИНРО. Т. 204, вып. 2. С. 477–508. EDN: KKJUSG. doi:10.26428/1606-9919-2024-204-477-508
- Грачев Л.Е., Горшков С.А., Добрынина М.В., Бедных А.М. 1982. Динамика численности и биология горбуши. Годовой отчет. № 4455. Архив КамчатНИРО. Петропавловск-Камчатский. 125 с.
- Карпенко В.И. 1998. Ранний морской период жизни тихоокеанских лососей. М.: ВНИРО. 165 с.
- Карпенко В.И., Андриевская Л.Д., Коваль М.В. 2013. Питание и особенности роста тихоокеанских лососей в морских водах. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. 304 с.
- Кеткина О.С. 2020. Возможности MS Excel для регрессионного анализа (Электрон. текст. ресурс). Екатеринбург: Уральский федер. ун-т. 43 с.

(https://study.urfu.ru/Aid/Publication/14132/1/ЭОР-Кеткина%20О.С._%202020.pdf)

Кляшторин Л.Б., Любушин А.А. 2005. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. М.: ВНИРО. 235 с.

Кровнин А.С. 2020. Роль крупномасштабных климатических факторов Северного полушария в многолетних колебаниях запасов основных объектов российского промысла : Дис. ... канд. биол. наук. М.: ВНИРО. 149 с.

Курзаева Л.В. 2016. Регрессионный анализ в электронных таблицах // Междунар. журнал прикладных и фундамент. исследований. № 12 (7). С. 1234–1238.

Никольский В.Г. 1974. Экология рыб. М.: Высшая школа. 367 с.

Смирнов А.И. 1975. Биология, размножение и развитие тихоокеанских лососей. М.: МГУ. 336 с.

Фельдман М.Г. 2020. Использование метода RandomForest в целях прогнозирования подходов горбуши северо-востока Камчатки // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. Вып. 59. С. 76–96. EDN: AITTFJ. doi:10.15853/2072-8212.2020.59.76-96

Фельдман М.Г., Бугаев А.В. 2021. Современные принципы управления запасами горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Камчатского края (динамика численности, прогнозирование, регулирование промысла) // Вопр. рыболовства. Т. 22, № 4. С. 86–95. EDN: ZGVWVD. doi:10.36038/0234-2774-2021-22-4-86-95

Фельдман М.Г., Шевляков Е.А. 2015. Выживаемость камчатской горбуши как результат совокупного воздействия плотностной регуляции и факторов внешней среды // Изв. ТИНРО. Т. 185. С. 88–114.

Халафян А.А. 2008. Statistica 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. М.: ООО «Бином-Пресс». 512 с.

Шунтов В.П., Темных О.С. 2008. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Владивосток: ТИНРО-Центр. Т. 1. 481 с.

Шунтов В.П., Темных О.С. 2011. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Владивосток: ТИНРО-Центр. Т. 2. 473 с.

Barnston A.G., Livezey R.E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. Vol. 115. P. 1083–1126.

Di Lorenzo E., Schneider N., Cobb K.M., Chhak K., Franks P.J.S., Miller A.J., McWilliams J.C., Bograd S.J., Arango H., Curchister E., Powell T.M., Rivere P. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change / Geophys. Res. Lett., 35, L08607, doi:10.1029/2007GL032838

Folland C.K., Parker D.E. 1995. Correction of instrumental biases in historical sea surface temperature data // Q. J. R. Meteorol. Soc. № 121. P. 319–367.

Ishii M., Shouji A., Sugimoto S., Matsumoto T. 2005. Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe collection // Int. J. Climatol. № 25. P. 865–879.

Japan Meteorological Agency. 2006. Characteristics of Global Sea Surface Temperature Analysis Data (COBE-SST) for Climate Use. Monthly Report on Climate System Separated. Vol. 12. 116 p.

Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // Bull. of the American Meteorological Society. Vol. 78. P. 1069–1079.

Ricker W.E. 1954. Stock and recruitment // J. Fish. Res. Bd. of Canada. Vol. 11 (5). P. 559–623.

Ricker W.E. 1975. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations // Bull. of the Fish. Res. Bd. of Canada. № 191. 382 p.

Thompson D.W.J., Wallace J.M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophysical Research Letters. № 25. P. 1297–1300.

REFERENCE

Babayan V.K., Bobyrev A.E., Bulgakova T.I., Vasiliev D.A., Ilyin O.I., Kovalev Yu.A., Mikhailov A.I., Mikheev A.A., Petukhova N.G., Safaraliev I.A., Chetyrkin A.A., Sheremetyev A.D. Methodological recommendations on assessment of reserves of priority types of aquatic biological resources. Moscow: VNIRO, 2018, 312 p. (In Russ.)

Birman I.B. *Morskoj period zhizni i voprosi dinamiki chislennosti stada tihoookeanskih lososey* [Marine period of life and issues of population dynamics of Pacific salmon]. Moscow: Agropromizdat, 1985, 208 p.

Bugaev A.V. *Predneresovye migratsii tihoookeanskih lososey v ekonomicheskoy zone Rossii* [Prespawning migrations of Pacific salmon in the Economic zone of Russia]. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatNIRO, 2015, 416 p.

Bugaev A.V. Evaluation of contributions of stock abundance and global temperature anomaly to mean body weight of pacific salmon in the North Pacific basin. *Izvestiya TINRO*, 2017, vol. 191 (4), pp. 3–33. (In Russ.) EDN: ZUFHEN. doi:10.26428/1606-9919-2017-191-3-33

Bugaev A.V., Gerlits A.I. Characteristics of feeding migrations of hatchery juveniles of Pacific salmon in the basin of Okhotsk Sea and adjacent Pacific waters in the autumn-winter period (re-

- gional identification, abundance and distribution of catches, biological indices, estimates of mortality). *Izvestiya TINRO*, 2023, vol. 203 (1), pp. 16–45. (In Russ.) EDN: QCEING. doi:10.26428/1606-9919-2023-203-16-45
- Bugaev A.V., Tepnin O.B. *Klimat i tihookeanskije lososi* [Climate and Pacific salmon]. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatNIRO, 2024, 280 p. EDN: YVAMSM. doi:10.15853/9785902210467
- Bugaev A.V., Tepnin O.B., Shpigalskaya N.Yu., Kulik V.V. Description of regression models for predicting the dynamics of pink salmon returns in the Kamchatka region based on climate-oceanological and population-genetic data. *Izvestiya TINRO*, 2024, vol. 204 (2), pp. 477–508. (In Russ.) EDN: KKJUSG. doi:10.26428/1606-9919-2024-204-477-508
- Grachev L.E., Gorshkov S.A., Dobrynina M.V., Bednykh A.M. *Dinamika chislennosti i biologiya gorbushi* [Stock abundance and biology of pink salmon]. *Annual report* № 4455, Petropavlovsk-Kamchatsky: archive KamchatNIRO, 1982, 125 p. (In Russ.)
- Karpenko V.I. *Rannij morskoy period zhizni tihookeanskikh lososej* [Early marine period of life of Pacific salmon]. Moscow: VNIRO, 1998, 165 p.
- Karpenko V.I., Andrievskaya L.D., Koval M.V. *Pitanie i osobennosti rosta tihookeanskikh lososej v morskikh vodakh* [Nutrition and growth characteristics of Pacific salmon in marine waters]. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatNIRO, 2013, 304 p.
- Ketkina O.S. *Vozmozhnosti MS Excel dlya regressionnogo analiza (Elektron. text. resurs)* [MS Excel Capabilities for Regression Analysis (Electronic text resource)]. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2020, 43 p. URL: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/14132/1/ЭОР-Кеткина%20О.С._%202020.pdf (дата обращения 06.06.2025).
- Klyashtorin L.B., Lyubushin A.A. *Tsyklicheskie izmeneniya klimata i ryboproduktivnosti* [Cyclical changes in climate and fish productivity]. Moscow: VNIRO, 2005, 235 p.
- Krovnin A.S. *Rol' krupnomashtabnykh klimaticheskikh faktorov Severnogo polushariya v mnogoletnykh kolebaniyakh zapasov osnovnykh objektov rossiyskogo promysla* [The role of large-scale climatic factors of the Northern Hemisphere in long-term fluctuations in the stocks of the main objects of Russian fishing]. *Dissertation for the Candidate of Biological Sciences*, Moscow: VNIRO, 2020, 149 p.
- Kurzaeva L.V. Regression analysis in spreadsheets. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, № 12 (7), pp. 1234–1238.
- Nikolskiy V.G. *Ekologiya ryb* [Fish ecology]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974, 367 p.
- Smirnov A.I. *Biologiya, razmnozhenie i razvitie tikhookeanskikh lososej* [Biology, reproduction and development of Pacific salmon]. Moscow: MGU, 1975, 336 p. (In Russ.). URL: <http://hdl.handle.net/123456789/3731> (дата обращения 06.06.2025).
- Feldman M.G. Using the decisions of the *Random Forest* algorithm for the purposes of forecasting pink salmon runs on North-Eastern Kamchatka. *The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and the north-west part of the Pacific Ocean*, 2020, vol. 59, pp. 76–96. (In Russ.) EDN: AITTJF. doi:10.15853/2072-8212.2020.59.76-96
- Feldman M.G., Bugaev A.V. Modern principles of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) stocks management in the Kamchatka Region (population dynamics, forecasting, fishing regulation). *Problems of Fisheries*, 2021, vol. 22, № 4, pp. 86–95. (In Russ.) EDN: ZGVWVD. doi:10.36038/0234-2774-2021-22-4-86-95
- Feldman M.G., Shevlyakov E.A. Survival of Kamchatka pink salmon as result of combined influence of density regulation and environmental factors. *Izvestiya TINRO*, 2015, vol. 185, pp. 88–114. (In Russ.) URL: <http://dx.doi.org/10.26428/1606-9919-2015-182-88-114> (дата обращения 06.06.2025).
- Khalafyan A.A. *Statistika 6. Statisticheskiy analiz dannykh* [Statistica 6. Statistical. Data Analysis]. 3-rd edition. Moscow: OOO “Binom-Press”, 2008, 512 p.
- Shuntov V.P., Temnykh O.S. Pacific salmon in marine and ocean ecosystems. Vladivostok: TINRO-Center, 2008, vol. 1, 481 p. (In Russ.)
- Shuntov V.P., Temnykh O.S. Pacific salmon in marine and ocean ecosystems. Vladivostok: TINRO-Center, 2008, vol. 2, 473 p. (In Russ.)
- Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, vol. 115, pp. 1083–1126.
- Di Lorenzo E., Schneider N., Cobb K.M., Chhak K., Franks P.J.S., Miller A.J., McWilliams J.C., Bograd S.J., Arango H., Curchister E., Powell T.M., Rivere P. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35, L08607, doi:10.1029/2007GL032838
- Folland C.K., Parker D.E. Correction of instrumental biases in historical sea surface temperature data. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1995, № 121, pp. 319–367.
- Ishii M., Shouji A., Sugimoto S., Matsumoto T. Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, 2005, № 25, pp. 865–879.

Japan Meteorological Agency. Characteristics of Global Sea Surface Temperature Analysis Data (COBE-SST) for Climate Use. *Monthly Report on Climate System Separated*, 2006, vol. 12, 116 p.

Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. of the American Meteorological Society*, 1997, vol. 78, pp. 1069–1079.

Ricker W.E. Stock and recruitment. *J. Fish. Res. Bd. of Canada*, 1954, vol. 11 (5), pp. 559–623.

Ricker W.E. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bull. of the Fish. Res. Bd. of Canada*, 1975, № 191, 382 p.

Thompson D.W.J., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 1998, № 25, pp. 1297–1300.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ / COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

Авторы заявляют, что данный обзор не содержит собственных экспериментальных данных, полученных с использованием животных или с участием людей. Библиографические ссылки на все использованные в обзоре данные оформлены в соответствии с ГОСТом. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

The authors declare that this review does not contain their own experimental data obtained using animals or involving humans. Bibliographic references to all data used in the review are formatted in accordance with GOST (the Russian State Standard). The authors declare that they have no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ AUTHOR CONTRIBUTION

А.В. Бугаев — написание статьи, аналитика и расчеты; О.Б. Тепнин — анализ океанологических условий и подготовка первичного материала; А.С. Кровнин — анализ океанологических условий.

A.V. Bugaev – writing the article, analytics and calculations; O.B. Tepnin – analysis of oceanographic conditions and preparation of primary material; A.S. Krovnin – analysis of oceanographic conditions.

Информация об авторах

А.В. Бугаев — докт. биол. наук, зам. руководителя Камчатского филиала ВНИРО (КамчатНИРО), a.bugaev@kamniro.vniro.ru.

ORCID: 0000-0001-6646-3241

О.Б. Тепнин — зав. сектором океанографии, Камчатский филиал ВНИРО (КамчатНИРО), o.tepnin@kamniro.vniro.ru.

ORCID: 0000-0001-9596-4336

А.С. Кровнин — докт. геогр. наук, начальник отдела динамики климата и водных экосистем, ВНИРО, akrovnin@vniro.ru.

ORCID: 0009-0001-8397-8535

Information about the authors

Alexandr V. Bugaev – D. Sc. (Biology), Deputy Head of KamchatNIRO, a.bugaev@kamniro.vniro.ru.

ORCID: 0000-0001-6646-3241

Oleg B. Tepnin – Head of Oceanography Division, Kamchatka Branch of VNIRO (KamchatNIRO), o.tepnin@kamniro.vniro.ru.

ORCID: 0000-0001-9596-4336

Andrey S. Krovnin – D. Sc. (Geography), Head of the Department of climate dynamics and aquatic ecosystems, VNIRO, akrovnin@vniro.ru.

ORCID: 0009-0001-8397-8535

Статья поступила в редакцию / Received: 10.06.2025

Одобрена после рецензирования / Revised: 01.07.2025

Статья принята к публикации / Accepted: 02.07.2025