

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ
METHODS OF INVESTIGATIONS**

Научная статья

УДК [639.2.053:597.552.511]/(571.66)**DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-477-508****EDN: KKJUSG****ОПИСАНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ГОРБУШИ
КАМЧАТСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ КЛИМАТО-ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ
И ПОПУЛЯЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ****А.В. Бугаев¹, О.Б. Тепнин¹, Н.Ю. Шпигальская¹, В.В. Кулик^{2*}**¹ Камчатский филиал ВНИРО (КамчатНИРО),
683000, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, 18;² Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

Аннотация. Представлены различные варианты регрессионных моделей для прогнозирования численности запасов (подход, возврат) горбуши Камчатского края. Исследованиями охвачен период наблюдений 1990–2023 гг. Проведенный анализ позволил определить наиболее подходящие и доступные климато-океанологические факторы, которые могут быть использованы в качестве предикторов для прогнозирования возвратов горбуши, — индекс Тихоокеанской декадной осцилляции (*PDO*), Западно-Тихоокеанский циклонический индекс (*WP*), индекс Арктической осцилляции (*AO*), аномалии температуры поверхности океана (*aSST*). На основе выявленных статистических закономерностей построены модели типа «запас–пополнение» с учетом климато-океанологических данных, позволяющие оценить потенциальную численность возвратов горбуши северо-восточной и западной Камчатки. Рассмотрены методы прогнозирования численности горбуши с использованием моделей «учет в море — возврат». Исходной информацией для моделирования связей послужили материалы осенних учетных траловых съемок ТИНРО в Беринговом и Охотском морях. Ряд наблюдений охватывает период 2012–2023 гг. Для определения численности западнокамчатской горбуши в бассейне Охотского моря использовали результаты генетической идентификации регионального состава молоди в смешанных траловых уловах. Все представленные модели имели достаточно высокий уровень коэффициентов детерминации. Однако для практического прогнозирования численности запасов горбуши Камчатского края необходимо применять несколько более простых моделей, чтобы определить общий тренд динамики полученных оценок, по причине недостаточно обобщающей способности полных моделей.

* Бугаев Александр Викторович, доктор биологических наук, заместитель руководителя, a.bugaev@kamniro.vniro.ru, ORCID 0000-0003-0782-6131; Тепнин Олег Борисович, заведующий сектором, o.tepnin@kamniro.vniro.ru, ORCID 0000-0001-9596-4336; Шпигальская Нина Юрьевна, кандидат биологических наук, руководитель, n.shpigalskaya@kamniro.vniro.ru, ORCID 0000-0002-2151-6220; Кулик Владимир Владимирович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, vladimir.kulik@tinro.vniro.ru, ORCID 0000-0003-0920-5312.

© Бугаев А.В., Тепнин О.Б., Шпигальская Н.Ю., Кулик В.В., 2024

Ключевые слова: горбуша, нерестовый запас, численность подходов, прогноз, регрессионные модели

Для цитирования: Бугаев А.В., Тепнин О.Б., Шпигальская Н.Ю., Кулик В.В. Описание регрессионных моделей для прогнозирования динамики численности горбуши Камчатского края на основе климато-океанологических и популяционно-генетических данных // Изв. ТИНРО. — 2024. — Т. 204, вып. 2. — С. 477–508. DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-477-508. EDN: KKJUSG.

Original article

Description of regression models for predicting the dynamics of pink salmon returns in the Kamchatka region based on climate-oceanological and population-genetic data

Alexander V. Bugaev*, Oleg B. Tepnin**, Nina Yu. Shpigalskaya***,
Vladimir V. Kulik****

*—**** Kamchatka branch of VNIRO (KamchatNIRO),
18, Naberezhnaya Street, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000, Russia

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

* D.Biol., deputy head, a.bugaev@kamniro.vniro.ru, ORCID 0000-0003-0782-6131

** head of sector, o.tepnin@kamniro.vniro.ru, ORCID 0000-0001-9596-4336

*** Ph.D., head, n.shpigalskaya@kamniro.vniro.ru, ORCID 0000-0002-2151-6220

**** Ph.D., head of laboratory, vladimir.kulik@tinro.vniro.ru, ORCID 0000-0003-0920-5312

Abstract. Several regression models for predicting returns of pink salmon in the Kamchatka region are presented. The data for 1990–2023 were analyzed. Among available climatic and oceanological indices, the most suitable for using as predictors for forecasting of pink salmon returns were the Pacific Decadal Oscillation (PDO) index, Western Pacific Cyclonic Index (WP), Arctic Oscillation (AO) index, and the sea surface temperature anomaly in the North Pacific. Multi-dimensional models of the «stock–recruitment» type were built on identified statistical patterns, which allowed to estimate potential abundance of the pink salmon returns to northeastern and western Kamchatka. Besides, methods for predicting the abundance of pink salmon returns on the data of fish counting in the sea are considered, using the materials of TINRO trawl surveys conducted in the Bering and Okhotsk Seas in the fall seasons of 2012–2023. To determine the abundance of pink salmon originated from West Kamchatka, genetic identification of regional composition of juveniles in mixed trawl catches was used. All tested methods have a high level of determination, but simpler regressive models are more prospective for practical forecasting of general trend in dynamics of pink salmon stocks in the Kamchatka region due to very weak generalization ability of more complicated models.

Keywords: pink salmon, spawning stock, salmon return, fishery forecasting, regression model

For citation: 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, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2024, vol. 204, no. 2, pp. 477–508. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-477-508. EDN: KKJUSG.

Введение

На рубеже второго и третьего десятилетий XXI века порядка 70–80 % добычи (вылова) тихоокеанских лососей Дальнего Востока России составляла горбуша. В 2018–2023 гг. в пределах Камчатского края доля горбуши в общем ежегодном вылове в среднем достигала приблизительно 80 % [Бугаев и др., 2023а, б, 2024]. В фактическом выражении речь идет о среднемноголетнем вылове на уровне 280 тыс. т. Понятно, что столь высокая промысловая значимость горбуши требует серьезных мер по сохранению и рациональному использованию ее запасов. К подобным мерам в первую очередь относятся вопросы прогнозирования динамики численности указанного вида.

На Камчатке воспроизводство основных запасов горбуши сосредоточено в водных объектах северо-восточного и западного побережий. Отметим, что на северо-востоке

Камчатки добывается более 95 % восточнокамчатской горбуши. С позиции применения единой стратегии промысла и общности популяционно-биологической структуры в указанных регионах вид формирует две региональные макроединицы запасов, которые принято обозначать как восточно- и западнокамчатские комплексы стад. Соответственно, исходя из этой предпосылки, для каждой региональной единицы запасов горбуши готовится отдельный прогноз потенциального подхода (возврата) и вылова с заблаговременностью в 1 год. Ограниченность периода прогнозирования напрямую связана с высокой межгодовой флюктуацией численности всех видов тихоокеанских лососей (особенно горбуши), что не позволяет делать достаточно точный промысловый прогноз на более продолжительный период времени. Поэтому к каждой путине ежегодно готовятся актуальные рекомендации по рациональному использованию эксплуатируемых единиц лососевых запасов, на основании их прогнозируемой динамики численности.

Методы прогнозирования численности запасов тихоокеанских лососей постоянно совершенствуются благодаря развитию математического моделирования и накоплению новых данных (предикторов). В представленной работе показаны реальные методические аспекты модельного прогнозирования численности камчатских стад горбуши, которые применяются специалистами Камчатского филиала ВНИРО (КамчатНИРО) в современный период.

Целью работы является демонстрация применения регрессионных моделей с учетом климато-океанологических и популяционно-биологических данных, а также неопределенности вычисленных параметров для прогнозирования динамики численности запасов горбуши Камчатского края.

Материалы и методы

В работе в качестве базисных материалов использованы промысловая статистика и оценки численности нерестовых запасов горбуши Камчатского края в 1990–2023 гг. На основе суммирования данных о вылове и пропуске на нерест (S-запас) определяли общую численность региональных подходов (возвратов) поколений (R-пополнение) производителей к северо-восточному и западному побережьям. Данные о нерестовом запасе ежегодно получают в результате авиаучетных съемок во всех промыслово-значимых водных объектах Камчатки. Съемки осуществляют специалисты КамчатНИРО по отработанным многолетним методикам [Остроумов, 1962, 1964; Шевляков, Маслов, 2011]. Данные о вылове лососей предоставляются Северо-Восточным территориальным управлением Росрыболовства.

Для прогнозирования численности камчатских стад горбуши использовали различные виды регрессионных моделей типа «запас–пополнение» [Бабаян и др., 2018]. Уточним, что в отношении этого вида простая зависимость (линейная или нелинейная) между численностью отнерестившихся и вернувшихся рыб в профильной научной литературе нередко обозначается как связь «родители–потомство» [Ricker, 1954] или кривая пополнения (или воспроизводства) [Ricker, 1975]. В общей форме желательным свойствам связи запаса и пополнения удовлетворяет кривая, выраженная по формуле (1) [Ricker, 1975], и ее линейное представление по формуле (2) [Rounsefell, 1958], которое можно выразить еще и по формуле (3), чтобы не смешивать ошибки по разные стороны равенства от разных источников измерения, но тогда при настройке методами линейной регрессии формула (3) будет иметь больше коэффициентов, а их изначальный смысл изменится, поэтому мы обозначим их иными символами по формуле (4):

$$R = a \cdot S \cdot e^{-b \cdot S}, \quad (1)$$

$$\log_e R - \log_e S = \log_e a - b \cdot S, \quad (2)$$

$$\log_e R = \log_e a - b \cdot S + \log_e S, \quad (3)$$

$$\log_e R = b_1 + b_2 \cdot S + b_3 \cdot \log_e S, \quad (4)$$

где a — безразмерный параметр; b — параметр в единицах, обратных единицам измерения S ; $b_{1...i}$ — регрессионные коэффициенты по числу i включенных предикторов.

Поиск параметров или коэффициентов произведен по опубликованным методикам [Ogle, 2016] при помощи языка сценариев R (<https://www.R-project.org/>).

Необходимо уточнить, что в водных объектах западного побережья Камчатки полноценный ежегодный учет численности производителей горбуши на нерестилищах в 1990–2000 гг. производился только для урожайной (четной) линии лет. В нечетные годы аэровизуальные съемки нередко выполняли по остаточному принципу при учете на нерестилищах производителей кеты и нерки. В результате имеющийся ряд наблюдений нерестовых запасов западнокамчатской горбуши в нечетные годы не вполне репрезентативен для указанного периода. Однако данные статистики промысла вполне достоверны. Поэтому, учитывая тот факт, что уровень регионального ежегодного промыслового изъятия вида колеблется в пределах 60–70 %, можно констатировать, что использованные ряды данных, отражающих величину подхода (возврата), достаточно адекватно показывают ситуацию с реальной динамикой численности горбуши западного побережья Камчатки.

Тем не менее, принимая во внимание определенную дискретность рядов наблюдений количественных показателей запасов западнокамчатской горбуши в 1990–2023 гг., при подготовке прогностической модели использовано логарифмическое сглаживание ($\text{Ln} = \log_e$) фактических значений нерестовых запасов и подходов. Это позволило стабилизировать дисперсию значений имеющихся рядов наблюдений и применить их для моделирования взаимосвязей «климатические индексы — возврат» и всех вариаций связей типа «запас–пополнение». Таким образом, для обозначения количественных показателей нерестовых запасов западнокамчатской горбуши использовали показатель $\text{Ln } S$, а для ряда наблюдений, отражающих данные возвратов (подходов), — $\text{Ln } R$.

При регрессионном моделировании прогнозов горбуши по формулам «запас–пополнение» в качестве дополнительных предикторов применяли следующие климато-океанологические индексы, отражающие влияние климатической изменчивости на численность запасов вида в северо-западной части Тихого океана (прикамчатские морские и океанические воды):

— *индекс Арктической осцилляции (АО)* — характеризует степень проникновения арктических воздушных масс в субарктический регион. Рассчитывается посредством разложения среднемесячной аномалии поля давления на уровне 1000 гПа над Арктикой с использованием естественных ортогональных функций (ЕОФ, первая компонента). Индекс имеет большую изменчивость в зимний период года. Данные по индексу доступны на сайте Центра климатических прогнозов Национального погодного бюро (CPC NCEP NOAA) (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США) (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/monthly.ao.index.b50.current.ascii);

— *индекс Тихоокеанской декадной осцилляции (PDO)* — характеризует изменчивость среднемесячной аномалии температуры поверхности воды ($aSST$) северной части Тихого океана (до 20° с.ш.). Является характеристикой климатических явлений, наблюдаемых преимущественно в северной части Тихого океана, в противоположность Эль-Ниньо/Южной осцилляции (ENSO). Во время «теплой» (положительной) фазы, возникающей в результате реакции океана на низкое атмосферное давление над Алеутскими островами, океанические течения приносят более теплые воды (повышенные $aSST$) в восточную часть Тихого океана. В это же время прохладные, богатые питательными веществами воды привносятся в западную часть Тихого океана. Наблюдается усиление Северотихоокеанского круговорота. Во время «холодной» (отрицательной) фазы, из-за перестройки метеорологических процессов, восточная часть Тихого океана становится холоднее, а западная часть Тихого океана — теплее. Отмечается ослабление Северотихоокеанского круговорота. Данные по индексу доступны на сайте Национального центра экологической информации (NCEI NOAA) (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США) (<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pdo/>);

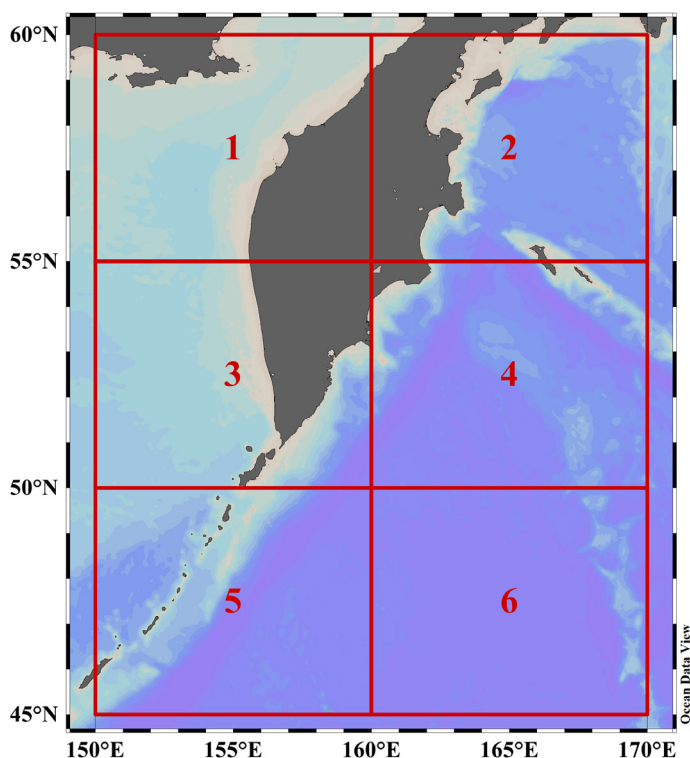
— *западно-Тихоокеанский циклонический индекс (WP)* — один из индексов дальних связей Северного полушария. Отражает низкочастотную изменчивость метеорологических показателей над северо-западной частью Тихого океана. Положительные и отрицательные фазы этого индекса показывают перераспределение температуры воздуха и влажности (осадков) в меридиональном и широтном направлениях. Данные по индексу доступны на сайте CPC NCEP NOAA (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>);

— *аномалия температуры поверхности океана (aSST)* — представляет расширенный набор реконструированных данных о температуре поверхности моря (ERSST). Это глобальный ежемесячный набор данных о температуре поверхности моря, полученный на основе Международного комплексного набора данных об океане и атмосфере (ICOADS). Данные ERSST рассчитываются на географической сетке $2^\circ \times 2^\circ$, пространственная полнота которых повышается с помощью статистических методов. Данный реанализ пополняется ежемесячно. Используемый в работе набор данных включает аномалии, рассчитанные по отношению к ежемесячным климатологическим данным 1971–2000 гг. Материалы по индексу доступны на сайте NCEI NOAA (<https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/cmb/ersst/v5/netcdf/>).

В настоящем исследовании данные *aSST* отражают термическое состояние вод поверхности в 6 районах, в которых проходят посткатадромные миграции (откочевка) молоди восточнокамчатских (2 и 4-й районы) и западнокамчатских (1, 3, 5 и 6-й районы) стад горбуши в летне-осенне-зимний период (август–декабрь) (рис. 1). Точные географические границы районов, а также помесечная динамика индексов *AO*, *PDO* и *WP* даны в приложении 1*.

Рис. 1. Карта-схема локализации районов осреднения значений *aSST*, использованных для оценки влияния температурного фактора в период летне-осенне-зимних миграций молоди (август–декабрь) на формирование численности поколений горбуши северо-востока и запада Камчатки в 1990–2023 гг.

Fig. 1. Scheme of the areas for averaging of SST anomalies (*aSST*) to assess influence of the temperature factor during summer-autumn-winter (August–December) migrations of pink salmon juveniles at northeastern and western Kamchatka on formation of the year-classes in 1990–2023



Отдельным и важнейшим элементом формирования прогнозов динамики численности горбуши Камчатки является моделирование зависимости «учет молоди в

* Все приложения размещены на странице статьи на сайте журнала (<http://izvestiya.tinro-center.ru>) как дополнительные файлы.

море — подход (возврат)». Данный вариант прогнозирования применяется для обоих комплексов стад горбуши — восточного и западного побережий. В качестве основного предиктора выступают оценки численности молоди горбуши (сеголеток) в период откочевки (сентябрь-октябрь) в открытые воды Берингова и Охотского морей. Количественные оценки молоди в пределах полигонов исследований выполняют специалисты ТИНРО на основе данных ежегодных пелагических учетных траловых съемок (рис. 2). Отметим, что метод прямого тралового учета является наиболее близким к возврату показателем общей численности смешанных стад, поскольку сформированный запас молоди уже прошел наиболее критический прибрежно-эстуарный этап жизненного цикла. Однако и этот показатель может быть смещенным в результате как используемых коэффициентов уловистости и горизонтальных раскрытий тралов, так и сделанных допущений в самом методе площадей. Следовательно, мы использовали классическую линейную регрессию, настроенную методом не только наименьших квадратов по формуле (5), но и наименьших ортогональных расстояний [Boggs et al., 1989] в пакете *onls* (<https://CRAN.R-project.org/package=onls>):

$$R = b_1 + b_2 \cdot S. \quad (5)$$

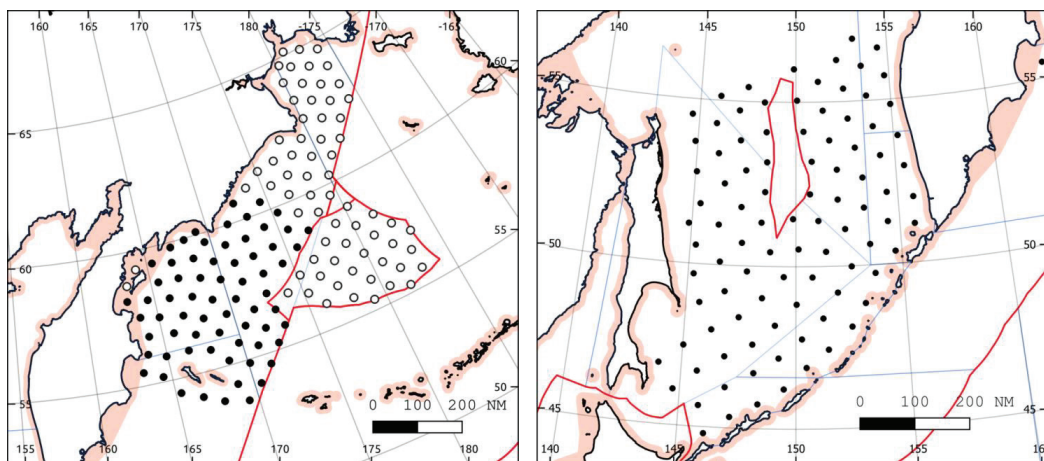


Рис. 2. Карты-схемы траловых станций комплексных лососевых съемок, проводимых в эпипелагиали Берингова (*слева*) и Охотского (*справа*) морей: красная линия — граница ИЭЗ РФ, розовая заливка — 12-мильная зона внутренних вод, черные точки — приоритетные станции, белые точки — дополнительные станции (рисунки выполнены А.А. Сомовым, ТИНРО)

Fig. 2. Schemes of trawl stations for complex salmon surveys conducted in the epipelagic zone of the Bering (*left*) and Okhotsk (*right*) Seas: red line — the border of the Russian EEZ, pink shading — 12-mile territorial zone, black dots — priority stations, white dots — additional stations (courtesy of A.A. Somov, TINRO)

Непосредственно для оценки доли/численности западнокамчатской горбуши из траловых уловов производится генетическая идентификация регионального состава скоплений молоди. Это необходимое условие, так как в Охотском море осуществляет нагул молодь из нескольких центров воспроизводства — Россия (побережье западной Камчатки, о. Сахалин, Курильские острова, материковое побережье Охотского моря) и Япония (о-ва Хоккайдо и Хонсю). Методические основы генетической идентификации были разработаны специалистами КамчатНИРО и ВНИРО [Шпигальская и др., 2011; Зеленина и др., 2022; Косицина и др., 2022]. В качестве основного метода много лет использовали анализ длин рестриктивных фрагментов (ПДРФ-анализ) митохондриальной ДНК (участок Cytb/D-loop). С 2022 г. в работу принята новая методика региональной идентификации горбуши на основании анализа ядерных генетических маркеров SNP-локусов (KASP-генотипирование).

В работе приняты следующие сокращения статистических показателей используемых регрессионных моделей:

- R — коэффициент парной или множественной корреляции;
- R^2 — коэффициент детерминации (аппроксимации);
- SE — стандартная ошибка;
- F — значение критерия Фишера;
- t — значение критерия Стьюдента;
- df — число степеней свободы;
- SS — сумма квадратов отклонений;
- MS — среднее квадратов отклонений;
- $\pm CI\ 95\ %$ — 95 %-ный доверительный интервал (знак «-» — нижняя граница, знак «+» — верхняя граница);
- p — уровень статистической значимости.

Всю статистическую обработку и анализ первичных данных осуществляли в программных средах MS Excel, STATISTICA 10 и R.

Результаты и их обсуждение

На современном этапе исследований прогнозирование динамики численности тихоокеанских лососей Камчатского края строится на различных методах математического моделирования, в основном базирующихся на данных о численности нерестовых запасов и знании возрастной структуры производителей в возвратах. В отношении самого многочисленного вида — горбуши — достаточно информации только о нерестовой численности, так как все ее производители имеют единый возраст созревания — 0.1. Кроме того, в отношении этого вида, как уже отмечено, большое значение для подготовки прогнозов имеют учетные траловые съемки, ежегодно проводимые в местах массовой осенней откочевки молоди из прибрежных вод бассейнов Берингова и Охотского морей. При этом в охотоморском бассейне ежегодно осуществляются популяционно-генетические исследования по идентификации регионального происхождения молоди вида в смешанных траловых уловах. Это крайне актуальная задача, так как в Охотском море нагуливается молодь горбуши практически со всех регионов Дальнего Востока России, а также Японии.

Особую роль в прогнозировании численности горбуши играют складывающиеся океанологические условия на ранних этапах морского нагула в период откочевки молоди из прибрежно-эстуарных зон в открытые воды. На этом этапе жизненного цикла естественная смертность вида может достигать порядка 70–90 % [Карпенко, 1998; Karpenko, 1998; Шунтов, Темных, 2008; Бугаев, Герлиц, 2023]. Причем это касается рыб как нативного, так и заводского происхождения. Поэтому изучение воздействия климато-океанологических факторов на среду обитания молоди горбуши на раннем этапе морского/океанического периода жизни может иметь определяющее значение для формирования продуктивности ее поколений в возвратах.

Математическое моделирование прогнозов численности камчатских стад горбуши получило стабильное практическое применение ближе к середине 2010-х гг. Большую роль в этом сыграли работавшие в тот период в КамчатНИРО специалисты — М.Г. Фельдман и Е.А. Шевляков. Именно они разработали методику прогнозирования численности горбуши с учетом совокупного воздействия плотностной регуляции численности производителей и факторов среды [Фельдман, Шевляков, 2015]. Представленные ими стратифицированные модели отражали уровневые вариации взаимосвязи «родители–потомство». Впоследствии методы прогнозирования были расширены путем использования регрессионных моделей, учитывающих климато-океанологические условия в период воспроизводства и раннего морского периода жизни горбуши [Фельдман и др., 2018]. В качестве основных предикторов, характеризующих климатическую изменчивость, они использовали ряды данных двух индексов — PDO и WP , которые показы-

вали взаимосвязь с коэффициентами воспроизводства (R/S) в летний (нерест), зимний (инкубация икры) и осенний (откочевка молоди) периоды. Позднейшие исследования позволили М.Г. Фельдману расширить математический аппарат прогнозирования вида путем включения в прогноз метода классификационного моделирования — случайный лес деревьев решений (Random Forest) [Фельдман, 2020]. В данном случае предикторами были помесечные данные климатических индексов (PDO , WP , AO). В работе применялся итеративный способ отбора наиболее важных факторов. Выбор лучшей модели осуществлялся по наименьшей ошибке на тестовых данных. Представленный набор различных методов модельного прогнозирования динамики численности горбуши положен в основу современных принципов управления запасами вида в Камчатском крае [Фельдман, Бугаев, 2021].

Ниже мы рассмотрим базовые и новые методы современного модельного прогнозирования динамики запасов горбуши, воспроизводящихся на северо-восточном и западном побережьях Камчатки, с использованием климато-океанологических и популяционно-генетических данных.

Моделирование взаимосвязей «климатические индексы — возврат»

В начале 2000-х гг. известные специалисты-климатологи Л.Б. Кляшторин и А.А. Любушин [2005] подготовили монографию о циклических изменениях климата и рыбопродуктивности основных видов мировых запасов водных биоресурсов, к которым относятся и тихоокеанские лососи. Их исследования охватывали период 1950–2000 гг. В начале 2010-х гг. специалистами КамчатНИРО также была подготовлена и опубликована первая работа по оценке влияния некоторых климатических факторов на численность азиатских стад горбуши и кеты [Бугаев, Тепнин, 2011]. Позднее эти исследования расширили путем включения новых климатических предикторов и анализа воздействия термического режима вод западной части Северной Пацифики на запасы всех массовых видов дальневосточных лососей [Бугаев и др., 2018]. Результаты этих исследований были включены в международный обзорный отчет Комиссии по анадромным рыбам северной части Тихого океана «Статус и тренды численности тихоокеанских лососей и стальноголовой форели в связи с их экосистемами» (NPAFC, North Pacific Anadromous Fish Commission) (WGSA NPAFC, 2023*).

Многочисленными авторами этих исследований было отмечено, что в подавляющем большинстве случаев наиболее значимым фактором увеличения численности тихоокеанских лососей в 1990–2010 гг. была определена Глобальная температурная аномалия (GdT) Северного полушария Земли. В данном случае, формулируя общий физический принцип воздействия указанного фактора, можно отметить, что по сути речь идет о глобальном потеплении климата Земли. Поэтому GdT не может не оказывать воздействия на весь комплекс разнообразных климато-океанологических факторов, которые формируют условия среды обитания гидробионтов. При этом очевидно, что данное воздействие прежде всего сказывается на увеличении температуры поверхности океана (SST), что не может не отражаться на жизнедеятельности эпипелагических видов нектона, к которым относятся и тихоокеанские лососи. Следовательно, фактор изменчивости терморегима вод, в которых обитают лососи, является вполне адекватным предиктором для выявления зависимостей типа «условия среды — численность гидробионтов». Конкретно в нашем случае наиболее удобно подобную взаимосвязь оценивать с помощью аномалий температуры поверхности океана ($aSST$), так как отклонения температурных показателей от среднегодовых значений более четко отражают межгодовые изменения терморегима вод.

* Working Group on Stock Assessment NPAFC. The status and trends of Pacific salmon and steelhead trout stocks with linkages to their ecosystem : NPAFC Tech. Rep. 2023. № 19. 256 p. DOI: 10.23849/LOEX7610.

Как уже было отмечено, на современном этапе исследований хорошо известно, что для выживания тихоокеанских лососей критическим этапом считается ранний морской нагул молоди после ската из нерестовых рек. Учитывая это, ранее проведен ряд исследований, в которых оценивалось потенциальное воздействие $aSST$ в осенне-зимний период 1-го морского/океанического года нагула молоди различных видов тихоокеанских лососей на формирование численности возвратов их производителей [Бугаев, Тепнин, 2015; Бугаев и др., 2018, 2021; Фельдман и др., 2022]. Проверка нелинейной связи уловов горбуши с различными температурными усреднениями с задержками во времени и без них показала, что везде максимальный информационный коэффициент был выше 0,7, а в отдельных случаях он достигал максимальной силы связи, равной 1 [Датский и др., 2021].

В настоящей работе районы исследований, где предполагается наиболее активное опосредованное воздействие фактора $aSST$ на продуктивность горбуши камчатских стад, ограничены зонами максимальной концентрации молоди вида в период откочевки от побережья в открытые морские и тихоокеанские воды (см. рис. 1). Уточним, что терморегим вод может потенциально влиять на развитие кормовой базы, интенсивность питания и темп роста рыб, а также на смещение их традиционных ареалов нагула. Соответственно, обозначенные причинно-следственные связи отражаются на конечных продукционных показателях (подходах, возвратах) вида.

Учитывая известные закономерности осенне-зимних миграций молоди горбуши северо-востока и запада Камчатки [Бирман, 1985; Ерохин, 2002; Шунтов, Темных, 2008], были выбраны районы ее поэтапной откочевки по региональному принципу. Для стад горбуши, воспроизводящихся в реках северо-восточного побережья, оптимальными для оценки взаимосвязи « $aSST$ –возврат» являются районы 2 (август–сентябрь) и 4 (ноябрь–декабрь). В отношении стад вида, воспроизводящихся на западном побережье, наиболее показательны районы 1 (август–сентябрь), 3 (август–октябрь), 5 (ноябрь–декабрь) и 6 (ноябрь–декабрь). Таким образом, можно проследить потенциальное влияние температурного фактора на формирование численности региональных запасов камчатской горбуши на протяжении всех этапов откочевки молоди из прибрежных вод к местам зимовки. Межгодовая изменчивость $aSST$ по месяцам и районам наблюдений представлена на рис. 3.

Принимая во внимание многофакторность климатического воздействия на водную среду и имеющееся математическое подтверждение зависимости продуктивности тихоокеанских лососей от изменчивости таких предикторов, как PDO , WP и AO [Фельдман, Шевляков, 2015; Бугаев и др., 2018; Фельдман, 2020], указанные индексы также были включены в регрессионные модели вместе с показателями $aSST$. Это позволило оценить их комплексное влияние на формирование численности возвратов горбуши восточной и западной Камчатки. Значения предикторов PDO , WP и AO были синхронизированы по месяцам соответственно логике посткатадромных миграций молоди горбуши — с августа по декабрь. Данные $aSST$, кроме аналогичной помесечной разбивки, были ранжированы по районам миграций молоди северо-восточного и западного побережий Камчатки. Результаты регрессионного анализа зависимости «климатические индексы — возврат» для камчатских стад горбуши представлены в табл. 1 и 2.

В каждой модели использовано 32 наблюдения для обеих репродуктивных линий (четные и нечетные годы) горбуши Камчатского края в возвратах 1992–2023 гг. без исключений переменных рядов численности и климатических индексов. Это позволило определить реакцию изменчивости продукционных показателей региональных запасов вида на совокупное воздействие рассматриваемых климатических факторов. Учитывая, что в расчетах все индексы характеризуют климато-океанологические условия в конкретный месяц, для удобства их обозначили следующим образом: F_1 (PDO_N месяца); F_2 (WP_N месяца); F_3 ($aSST_N$ месяца); F_4 (AO_N месяца).

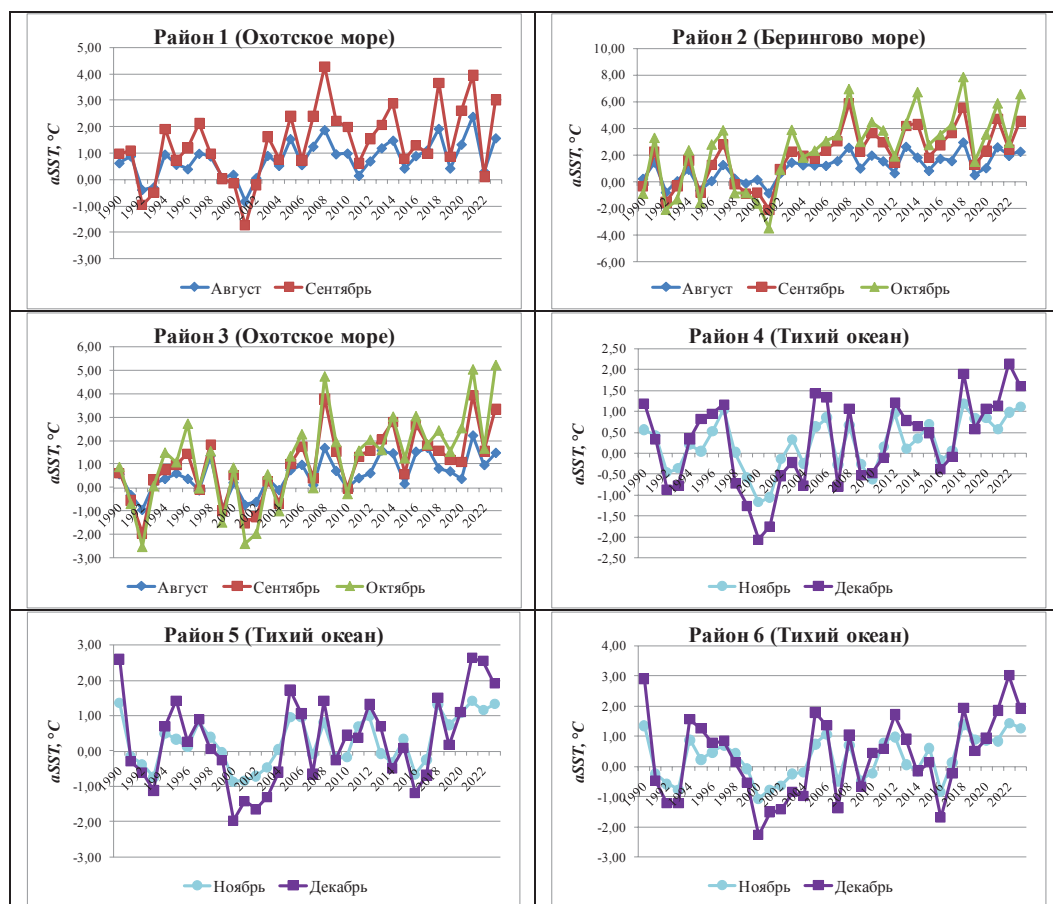


Рис. 3. Межгодовая динамика аномалий поверхности океана ($aSST$) по районам нагульных миграций молоди камчатской горбуши при откочевке от побережий к местам зимовки по данным 1990–2023 гг. (август–декабрь)

Fig. 3. Interannual dynamics of sea surface anomaly ($aSST$) in the time of pink salmon migration from the Kamchatka coasts to the wintering grounds (August–December) in 1990–2023, by areas of the juveniles feeding

Общий вид регрессионных моделей для оценки связи возврата горбуши северо-восточной и западной Камчатки от значений предикторов, определенных с помощью метода наименьших квадратов, выражен в следующей формуле:

$$Y = bX = b_0 + b_1F_1 + b_2F_2 + b_3F_3 + b_4F_4, \quad (6)$$

где $Y = R$ для горбуши северо-восточной, а для горбуши западной Камчатки $Y = \log_e R$; b — вектор коэффициентов; X — матрица предикторов; b_0 — свободный член уравнения (общее смещение); F_1, F_2, F_3 и F_4 — использованные климатические факторы (индексы).

Полученные результаты показали достаточно высокий уровень приближения прогнозируемых возвратов (подходов) горбуши Камчатки от воздействия совокупности использованных в моделях климатических факторов. Связи возвратов, найденные в моделях по формуле (6) для северо-восточных стад вида, продемонстрировали наиболее значимые корреляции в августе и сентябре: R — соответственно 0,55 и 0,59. В этот период молодь горбуши мигрирует от берега в открытые воды юго-западной части Берингова моря (район 2) (см. рис. 1). Отметим, что это относительно высокие показатели связи для предикторов опосредованного воздействия, к которым относятся климатические факторы. Далее, в ноябре и декабре, молодь горбуши мигрирует из берингоморских вод в тихоокеанские, занимая акваторию субарктической зоны

Результаты регрессионного анализа взаимосвязи «климатические индексы — возврат» с учетом дифференциации по районам нагульных миграций молоди горбуши северо-восточной Камчатки в период откочевки от побережья к местам зимовки (август-декабрь) по данным 1992–2023 гг.

Table 1

Results of regression analysis for the relationship between climate indices and return abundance in the time of pink salmon migration from the coast to the wintering grounds (August-December) in 1992–2023, differentiated by areas of the juveniles feeding at northeastern Kamchatka

Район	Месяц	R	R ²	SE	F	p	Параметры	Коэффициенты ($b_{0..i}$)	SE	t	p
2	Август	0,55	0,30	74,456	2,868	< 0,05	Y-пересечение	33,759	20,111	1,679	0,105
							F ₁ (PDO_08)	-11,890	11,436	-1,040	0,308
							F ₂ (WP_08)	-6,270	14,371	-0,436	0,666
							F ₃ (aSST_08)	38,589	14,394	2,681	< 0,05
							F ₄ (AO_08)	24,653	27,863	0,885	0,384
	Сентябрь	0,59	0,35	71,492	3,683	< 0,05	Y-пересечение	41,646	18,331	2,272	< 0,05
							F ₁ (PDO_09)	-22,488	11,231	-2,002	0,055
							F ₂ (WP_09)	-25,139	12,699	-1,980	0,058
							F ₃ (aSST_09)	25,639	13,380	1,916	0,066
							F ₄ (AO_09)	-23,495	22,258	-1,056	0,301
	Октябрь	0,50	0,26	77,184	2,201	0,096	Y-пересечение	62,023	19,752	3,140	< 0,01
							F ₁ (PDO_10)	-2,185	12,412	-0,176	0,862
							F ₂ (WP_10)	6,687	14,131	0,473	0,640
							F ₃ (aSST_10)	45,221	16,385	2,760	< 0,05
							F ₄ (AO_10)	17,901	19,751	0,906	0,373
4	Ноябрь	0,42	0,18	80,712	1,435	0,249	Y-пересечение	66,736	17,350	3,846	< 0,001
							F ₁ (PDO_11)	-10,812	12,280	-0,880	0,386
							F ₂ (WP_11)	13,566	15,595	0,870	0,392
							F ₃ (aSST_11)	56,869	25,140	2,262	< 0,05
							F ₄ (AO_11)	-14,199	15,961	-0,890	0,382
	Декабрь	0,58	0,34	72,086	3,511	< 0,05	Y-пересечение	78,521	14,348	5,473	< 0,001
							F ₁ (PDO_12)	-7,023	11,764	-0,597	0,556
							F ₂ (WP_12)	41,010	15,974	2,567	< 0,05
							F ₃ (aSST_12)	73,353	25,418	2,886	< 0,01
							F ₄ (AO_12)	-8,444	8,772	-0,963	0,344

Результаты регрессионного анализа взаимосвязи «климатические индексы–возврат» с учетом дифференциации по районам нагульных миграций молоди горбуши западной Камчатки в период откочевки от побережья к местам зимовки (август–декабрь) по данным 1992–2023 гг.

Table 2
Results of regression analysis for the relationship between climate indices and return abundance in the time of pink salmon migration from the coast to the wintering grounds (August–December) in 1992–2023, differentiated by areas of the juveniles feeding at western Kamchatka

Район	Месяц	R	R ²	SE	F	p	Параметры	Коэффициенты (b _{0...4})	SE	t	p
1	Август	0,48	0,23	1,972	2,049	0,115	Y-пересечение	2,934	0,552	5,314	<0,001
							F ₁ (PDO_08)	0,278	0,298	0,932	0,360
							F ₂ (WP_08)	-0,333	0,379	-0,879	0,387
							F ₃ (aSST_08)	0,083	0,535	0,154	0,879
							F ₄ (AO_08)	-1,695	0,751	-2,257	<0,05
	Сентябрь	0,41	0,17	2,057	1,338	0,281	Y-пересечение	3,382	0,508	6,655	<0,001
							F ₁ (PDO_09)	0,403	0,326	1,235	0,227
							F ₂ (WP_09)	0,146	0,362	0,403	0,690
							F ₃ (aSST_09)	-0,176	0,570	-0,308	0,760
							F ₄ (AO_09)	1,285	0,648	1,982	0,058
3	Август	0,49	0,24	1,967	2,096	0,109	Y-пересечение	3,053	0,448	6,817	<0,001
							F ₁ (PDO_08)	0,244	0,305	0,801	0,430
							F ₂ (WP_08)	-0,410	0,392	-1,046	0,305
							F ₃ (aSST_08)	-0,202	0,491	-0,411	0,684
							F ₄ (AO_08)	-1,635	0,742	-2,204	<0,05
	Сентябрь	0,41	0,17	2,058	1,336	0,282	Y-пересечение	3,348	0,464	7,210	<0,001
							F ₁ (PDO_09)	0,385	0,345	1,116	0,274
							F ₂ (WP_09)	0,150	0,359	0,419	0,678
							F ₃ (aSST_09)	-0,181	0,609	-0,298	0,768
							F ₄ (AO_09)	1,260	0,640	1,969	0,059
	Октябрь	0,25	0,06	2,179	0,461	0,764	Y-пересечение	3,174	0,510	6,227	<0,001
							F ₁ (PDO_10)	0,122	0,349	0,349	0,730
							F ₂ (WP_10)	-0,423	0,395	-1,072	0,293
							F ₃ (aSST_10)	-0,155	0,689	-0,225	0,824
							F ₄ (AO_10)	0,592	0,562	1,054	0,301

5	Ноябрь	0,27	0,08	2,165	0,552	0,699	Y-пересечение	2,752	0,444	6,198	< 0,001
							F ₁ (PDO_11)				
							F ₂ (WP_11)				
							F ₃ (aSST_11)				
							F ₄ (AO_11)				
6	Декабрь	0,14	0,02	2,230	0,133	0,969	Y-пересечение	2,980	0,457	6,515	< 0,001
							F ₁ (PDO_12)				
							F ₂ (WP_12)				
							F ₃ (aSST_12)				
							F ₄ (AO_12)				
6	Ноябрь	0,26	0,07	2,173	0,499	0,736	Y-пересечение	2,760	0,446	6,181	< 0,001
							F ₁ (PDO_11)				
							F ₂ (WP_11)				
							F ₃ (aSST_11)				
							F ₄ (AO_11)				
6	Декабрь	0,14	0,02	2,230	0,133	0,969	Y-пересечение	2,964	0,453	6,545	< 0,001
							F ₁ (PDO_12)				
							F ₂ (WP_12)				
							F ₃ (aSST_12)				
							F ₄ (AO_12)				

северо-западной части Тихого океана (район 4). На данном этапе миграций относительно высокий уровень корреляционной связи фиксируется в декабре — $R = 0,58$.

У западнокамчатской горбуши на этапе откочевки от побережья в открытые воды Охотского моря наиболее значимые показатели зависимости «климатические индексы — возврат» наблюдаются в августе в районах 1 и 3: R — соответственно 0,48 и 0,49. В сентябре данная взаимосвязь заметно снижается до $R = 0,41$ в обоих районах. В октябре в районе 3 эта зависимость практически не просматривается — $R = 0,25$. Последующий этап откочевки молоди горбуши из охотоморских в тихоокеанские воды субарктической зоны в ноябре-декабре также демонстрирует отсутствие значимой реакции искомой взаимосвязи для районов 5 и 6 ($R = 0,14–0,27$).

Обращаем внимание, что исходя из коэффициентов регрессии (b) для горбуши восточнокамчатских стад наиболее значимым в моделях является предиктор $aSST$. У западнокамчатских стад четко выраженный предиктор, влияющий на модель, менее выражен. Как правило, большее значение имеют индексы PDO и WP . Однако в отдельных моделях вклад индексов $aSST$ и AO выше.

Подводя итог проведенному анализу взаимосвязей «климатические индексы — возврат», отметим, что для дальнейшего формирования прогностических моделей типа «запас–пополнение» возможно использование следующих комплексов климатических предикторов:

восточная Камчатка — PDO , WP и AO (август, сентябрь, декабрь), $aSST$ район 2 (август, сентябрь), район 4 (декабрь);

западная Камчатка — PDO , WP и AO (август, сентябрь), $aSST$ район 1 (август, сентябрь), район 3 (август, сентябрь).

При этом, учитывая выявленные максимальные показатели множественных коэффициентов корреляций, в прогностических моделях перспективно использование более ограниченного набора исходных данных. Для оценки потенциальных подходов горбуши восточной Камчатки наиболее подходит группа предикторов, примененная для района 2 (сентябрь), — F_1 (PDO_{09}), F_2 (WP_{09}), F_3 ($aSST_{09}$) и F_4 (AO_{09}). Для комплекса стад горбуши западной Камчатки более показательными будут предикторы, использованные в районе 3 (август), — F_1 (PDO_{08}), F_2 (WP_{08}), F_3 ($aSST_{08}$) и F_4 (AO_{08}).

Моделирование статистических связей типа «запас–пополнение»

Как известно, базисом любой прогностической модели типа «запас–пополнение» является наличие исходной информации о запасе (S). В отношении тихоокеанских лососей это количество производителей, отнерестившихся в реках рассматриваемого региона. При этом следует принимать во внимание, что данный вид водных биологических ресурсов относится к моноциклическим рыбам, поэтому формально пополнение общего запаса (R) формируется для каждого поколения лишь 1 раз. В связи с этим термин «пополнение» для возврата (подхода) тихоокеанских лососей не совсем точен. По сути терминология взаимосвязи «родители–потомство» более адекватно отражает принцип формирования продуктивности конечного запаса этих рыб. Однако при использовании прогностических моделей, дополнительно включающих климато-океанологические данные, разумнее применять определение, в котором данная взаимосвязь обозначается как модель типа «запас–пополнение», тем более что методические рекомендации по разработке материалов промысловых прогнозов для всех видов водных биологических ресурсов в рыбохозяйственных исследованиях указывают именно на использование этого определения в аналогичных моделях [Бабаян и др., 2018].

Северо-восточная Камчатка. В практике прогнозирования запасов горбуши Камчатки базисная связь «родители–потомство» для оценки подходов производителей к рекам северо-восточного побережья представлена на рис. 4. Описательная статистика этой регрессионной модели дана в табл. 3.

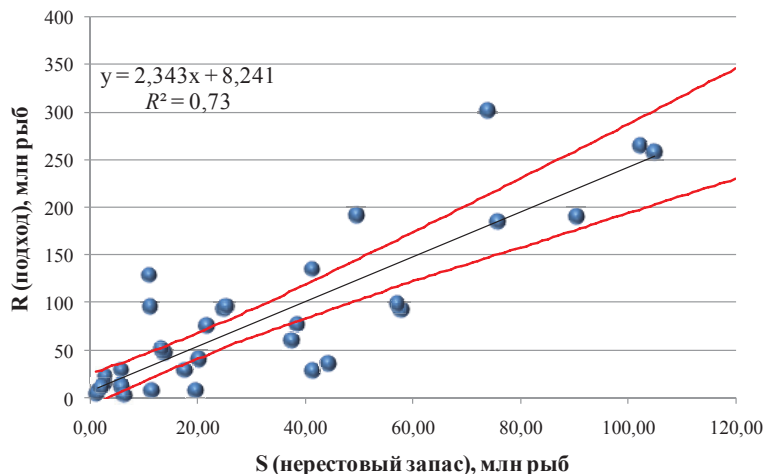


Рис. 4. Регрессионная модель для оценки численности подходов горбуши северо-восточной Камчатки на основе линейной зависимости «родители–потомство» по данным 1990–2023 гг., красные кривые показывают границы $\pm CI$ 95 % из переувыборки

Fig. 4. Regression model for estimating the abundance of pink salmon returns in northeastern Kamchatka based on the linear parent-offspring relationship for the data obtained in 1990–2023. Red curves limit the 95 % percentiles confidence intervals

Таблица 3

Описательная статистика регрессионной модели зависимости «родители–потомство» для горбуши северо-восточной Камчатки по данным 1990–2023 гг.

Table 3

Descriptive statistics for the regression model based on the parent-offspring relationship for pink salmon in northeastern Kamchatka (data of 1990–2023)

Регрессионная статистика						
R	0,853					
R ²	0,728					
Нормированный R ²	0,719					
SE	43,939					
Наблюдения	32					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	p	
Регрессия	1	155368,564	155368,564	80,475	< 0,001	
Остаток	3	57919,324	1930,644			
Итого	31	213287,888				
Модель						
Параметры	Коэффициенты	SE	t	p	−CI 95 %	+CI 95 %
Y-пересечение	8,241	11,493	0,717	0,479	−15,230	31,713
S	2,343	0,261	8,971	< 0,001	1,810	2,877

Как видно из представленных материалов, настоящая связь достаточно сильная, так как коэффициент детерминации (R^2) составляет 0,73. Таким образом, зависимость дает 73 % объяснения дисперсии искомого признака, т.е. ожидаемой величины подхода стад горбуши северо-восточной Камчатки. Однако существуют и другие варианты прогнозирования численности этой единицы запаса. Например, модель динамики численности поколений горбуши Карагинской подзоны, учитывающая в качестве независимых переменных температуру прибрежных вод в конце июня и численность родителей, описывает больше дисперсии ($R^2 = 0,791$) [Шевляков и др., 2024a]. Этот пример показывает перспективность включения дополнительных факторов среды в качестве предикторов прогностической модели.

Западная Камчатка. Аналогичная зависимость для комплекса стад горбуши западной Камчатки выражена в модели «родители–потомство» с прологарифмированными рядами наблюдений (рис. 5, табл. 4). В данном случае $R^2 = 0,60$. Подобный уровень

Рис. 5. Регрессионная модель для оценки численности подходов горбуши западной Камчатки на основе линейной зависимости «родители–потомство» по данным 1990–2023 гг., красные кривые показывают границы $\pm CI$ 95 % из переверстки

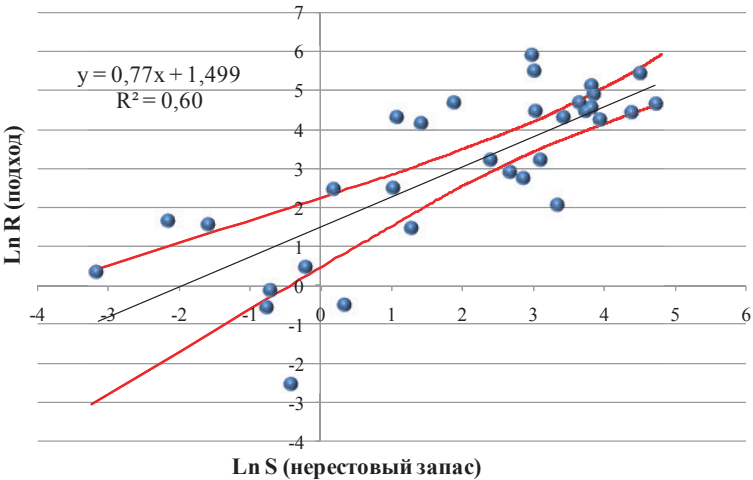


Fig. 5. Regression model for estimating the abundance of pink salmon returns in western Kamchatka based on the linear parent-offspring relationship (data of 1990–2023). Red curves limit the 95 % percentiles confidence intervals

Таблица 4

Описательная статистика регрессионной модели зависимости «родители–потомство» для горбуши западной Камчатки по данным 1990–2023 гг.

Table 4

Descriptive statistics for the regression model based on the parent-offspring relationship for pink salmon in western Kamchatka (data of 1990–2023)

Регрессионная статистика						
R	0,775					
R ²	0,600					
Нормированный R ²	0,587					
SE	1,350					
Наблюдения	32					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	p	
Регрессия	1	82,155	82,155	45,064	< 0,001	
Остаток	30	54,692	1,823			
Итого	31	136,848				
Модель						
Параметры	Коэффициенты	SE	t	p	−95 %	+95 %
Y-пересечение	1,499	0,326	4,597	0,000	0,833	2,164
Ln S	0,770	0,115	6,713	0,000	0,536	1,004

детерминации недостаточен для точного прогнозирования численности региональных подходов вида. Это указывает на необходимость применения расширенного формата моделирования прогноза, т.е. включения дополнительных предикторов.

Следующим этапом является моделирование взаимосвязей типа «запас–пополнение» с включением климато-океанологических предикторов, отражающих влияние факторов среды на формирование продуктивности поколений горбуши. Общий вид прогностических регрессионных моделей для оценки численности возвратов горбуши, определенных с помощью метода наименьших квадратов, выражен в формуле (7) для северо-восточной Камчатки, а для западной Камчатки в формуле (8):

$$R = b_1 S + b_2 F_1 + b_3 F_2 + b_4 F_3 + b_5 F_4 + b_0,$$
 (7)

$$\text{Ln } R = b_1 \text{Ln } S + b_2 F_1 + b_3 F_2 + b_4 F_3 + b_5 F_4 + b_0.$$
 (8)

Северо-восточная Камчатка. В отношении горбуши северо-восточного побережья Камчатки модель типа «запас–пополнение» представлена на рис. 6. Регрессионная статистика модели показана в табл. 5. Полученные результаты позволили повысить статистический уровень рассматриваемой зависимости — $R^2 = 0,81$.

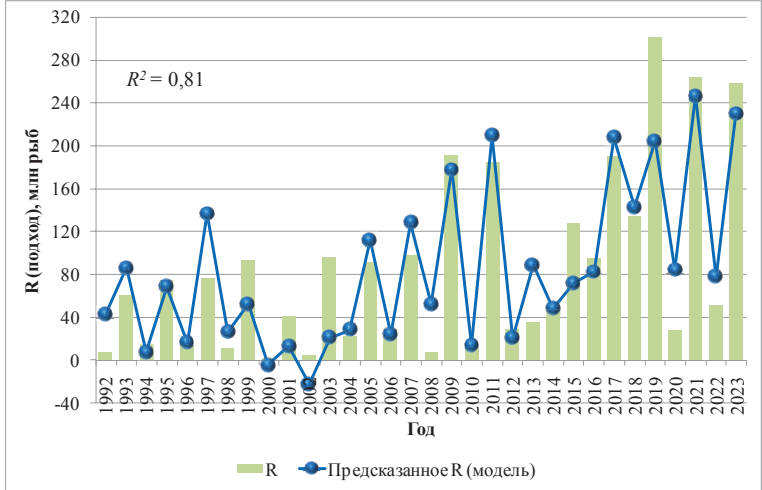


Рис. 6. Регрессионная модель для оценки численности подходов горбуши северо-восточной Камчатки на основе зависимости типа «запас–пополнение» с учетом климато-океанологических предикторов по данным 1990–2023 гг.

Fig. 6. Regression model for estimating the abundance of pink salmon returns in northeastern Kamchatka based on the stock–recruitment relationship including climatic and oceanographic factors (data of 1990–2023)

Таблица 5

Описательная статистика регрессионной модели зависимости типа «запас–пополнение» с учетом климато-океанологических факторов для горбуши северо-восточной Камчатки по данным 1990–2023 гг.

Table 5

Descriptive statistics for the regression model based on the stock–recruitment relationship including climatic and oceanographic factors for pink salmon in northeastern Kamchatka (data of 1990–2023)

Регрессионная статистика						
R	0,902					
R ²	0,814					
Нормированный R ²	0,778					
SE	39,086					
Наблюдения	32					
Дисперсионный анализ		df	SS	MS	F	p
Регрессия		5	173567,203	34713,441	22,722	< 0,001
Остаток		26	39720,684	1527,719		
Итого		31	213287,888			
Модель						
Параметры	Коэффициенты	SE	t	p	–CI 95 %	+CI 95 %
Y-пересечение	–2,190	11,415	–0,192	0,849	–25,655	21,274
S	2,114	0,264	8,021	< 0,001	1,572	2,656
F ₁	–1,707	6,665	–0,256	0,800	–15,406	11,992
F ₂	–8,781	7,236	–1,213	0,236	–23,655	6,094
F ₃	17,294	7,389	2,341	< 0,05	2,106	32,481
F ₄	–21,122	12,173	–1,735	0,095	–46,143	3,899

Западная Камчатка. Для горбуши западного побережья Камчатки многомерная регрессионная модель представлена на рис. 7. Соответственно, статистическое описание модели дано в табл. 6.

В данном случае статистическая значимость модели также заметно возросла по сравнению с первичной зависимостью «родители–потомство» — $R^2 = 0,69$. Этот показатель уже достаточно высок, так как позволяет прогнозировать тренд динамики численности подходов западнокамчатской горбуши.

Рис. 7. Регрессионная модель для оценки численности подходов горбуши западной Камчатки на основе зависимости типа «запас–пополнение» с учетом климато-океанологических предикторов по данным 1990–2023 гг.

Fig. 7. Regression model for estimating the abundance of pink salmon returns in western Kamchatka based on the stock–recruitment relationship including climatic and oceanographic factors (data of 1990–2023)

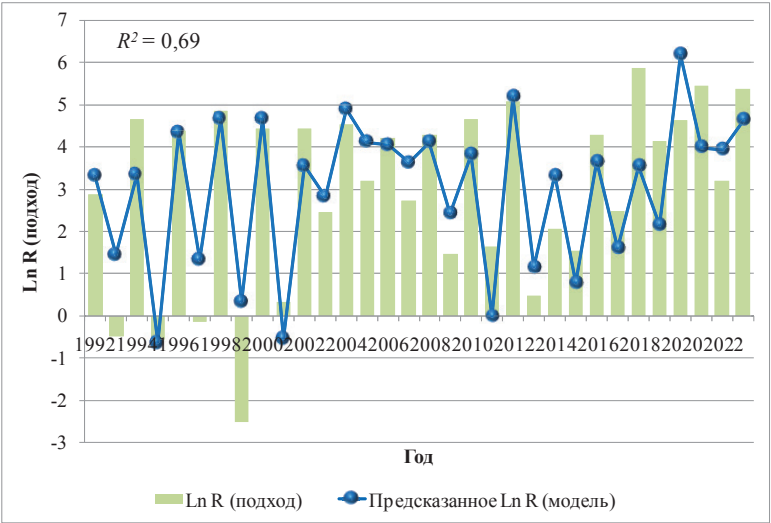


Таблица 6

Описательная статистика многомерной регрессионной модели зависимости типа «запас–пополнение» с учетом климато-океанологических факторов для горбуши западной Камчатки по данным 1990–2023 гг.

Table 6

Descriptive statistics for the multivariate regression model based on the stock–recruitment relationship including climatic and oceanographic factors for pink salmon in western Kamchatka (data of 1990–2023)

Регрессионная статистика						
R	0,829					
R²	0,687					
Нормированный R²	0,627					
SE	1,283					
Наблюдения	32					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	p	
Регрессия	5	94,076	18,815	11,437	< 0,001	
Остаток	26	42,771	1,645			
Итого	31	136,848				
Модель						
	Коэффициенты	SE	t	p	−CI 95 %	+CI 95 %
Y-пересечение	1,712	0,365	4,692	< 0,001	0,962	2,462
Ln S	0,697	0,114	6,125	< 0,001	0,463	0,931
F₁	0,091	0,200	0,457	0,652	−0,320	0,503
F₂	−0,342	0,256	−1,336	0,193	−0,868	0,184
F₃	−0,322	0,321	−1,003	0,325	−0,981	0,338
F₄	−0,891	0,499	−1,787	0,086	−1,916	0,134

В целом представленные варианты прогностических моделей типа «запас–пополнение» вполне отвечают задачам прогнозирования динамики численности горбуши Камчатского края. Однако необходимо понимать, что получить точную прогнозную величину потенциального подхода и вылова этого вида практически невозможно. Численность горбуши настолько подвержена флуктуации из-за многофакторности воздействия среды и эндогенных причин, что с помощью математических методов можно обосновать лишь величины, близкие к тем, что составят фактические подходы производителей в конкретный год. Поэтому прогностическую модель можно считать адекватной, если получится спрогнозировать даже условный тренд численности поколения вида. В упрощенной форме, например, — низкая, средняя или высокая численность подхода.

Ранее в работах специалистов КамчатНИРО более подробно рассматривались ориентиры градации запасов камчатской горбуши по величине потенциального подхода и вылова [Бугаев и др., 2023б]. Полагаем, что трендовый подход позволяет рационально сориентировать региональную рыбодобывающую промышленность при подготовке к лососевым путинам. Представителям рыбного промысла принципиально важно знать, на каком уровне будет происходить потенциальная добыча (вылов) горбуши в предстоящую путину — 10 тыс. т, 50, 100, 150 тыс. т и т.д.

Однако следует отметить, что специалисты нередко занижают первоначальную расчетную величину прогнозируемого вылова (ПВ) не только горбуши, но и других видов тихоокеанских лососей. При этом трендовый порядок потенциальных подходов всегда сообщается представителям промышленности в рамках организационных мероприятий при подготовке к путине, а также на заседаниях Комиссии по добыче (вылову) анадромных видов рыб в Камчатском крае. Подчеркнем, что искусственное занижение ПВ связано с предосторожным подходом и не представляет проблем для

рыбодобывающей промышленности, так как законодательно утверждена возможность осуществления корректировки ранее обозначенного объема ПВ с учетом фактических данных, полученных в результате оперативного биологического мониторинга промысловых единиц лососевых запасов в течение путины. Поэтому в случае правильно предсказанного тренда численности (изначально заниженного) осуществляется корректировка на увеличение объема ПВ.

Моделирование взаимосвязей «учет в море — возврат»

В настоящее время горбуша является единственным видом, в отношении которого опробована и уже давно применяется прогностическая модель «учет в море — возврат». Во-первых, это связано с высокой численностью вида, что позволяет получать достаточно достоверные оценки численности на полигонах исследований в бассейнах Берингова и Охотского морей в период осенней откочевки молоди из прибрежных зон в открытые воды. Во-вторых, горбуша имеет простую возрастную структуру, поэтому все учтенные рыбы в осенний период конкретного года возвращаются в родные водоемы на следующий год. Это дает возможность прогнозировать возврат вида с использованием прямой математической зависимости.

Основоположниками подобного метода прогнозирования возврата горбуши Камчатки были специалисты КамчатНИРО, которые начали проведение учетных траловых съемок в бассейнах Берингова и Охотского морей в 1980-е гг. [Ерохин, 2002, 2006, 2007]. В 1990–2000 гг. разработаны схемы траловых стаций в зонах высокой концентрации (полигоны исследований) камчатских стад горбуши. Прогнозы строили на основе зависимости «учет в море — возврат».

К концу 2000-х гг. высокая себестоимость проведения учетных траловых съемок на обширных акваториях Берингова и Охотского морей привела к сокращению, а впоследствии к полному прекращению этого вида исследований в КамчатНИРО. При этом в 1990–2000 гг. специалистами ТИНРО была сформирована система аналогичных траловых съемок, выполняемых практически на одних и тех же полигонах исследований в указанных водных объектах (см. рис. 2). Изначально подобные работы по районам проведения и содержанию позиционировались как масштабные комплексные биоэкологические исследования [Волвенко, 2003; Шунтов, 2005]. В принципе к настоящему времени их изначальный статус не изменился, но все больше данные съемки рассматриваются с позиции прикладного значения, прежде всего ориентированного на получение оценок численности массовых видов нектона, в отношении которых готовятся промысловые прогнозы. Важнейшим из прогнозируемых видов является горбуша.

В 2010-х гг. проведение учетных траловых съемок в Беринговом и Охотском морях полностью стало прерогативой ТИНРО. Специалисты КамчатНИРО выступали лишь в составе ихтиологических групп с целью сбора генетических и отолитных проб. По результатам съемок сотрудники ТИНРО ежегодно готовят прогнозы на основе взаимосвязи «учет в море — возврат» — отдельно для горбуши северо-восточной Камчатки и суммарно для всех регионов охотоморского бассейна. В последнем случае по отдельным регионам потенциальные возвраты, как правило, оцениваются на основе известных закономерностей среднесноголетнего долевого вклада каждого центра воспроизводства в общий запас охотоморской горбуши. Для этого используют данные промысловой статистики или оценки численности подходов.

В настоящей работе использованы только современные данные (2012–2023 гг.) о численности сеголеток горбуши, полученные специалистами ТИНРО при проведении учетных траловых съемок в Беринговом и Охотском морях. Ряды наблюдений синхронизированы для обоих водных объектов. При этом следует отметить, что с 2018 г. учетные траловые съемки ТИНРО осуществляются с одновременным использованием двух научно-исследовательских судов. Данный подход дает преимущество, так как учет молоди тихоокеанских лососей на полигонах исследований происходит за более

короткий период. Это позволяет получить уточненные оценки численности рыб без потери информативности по причине их миграционной активности. Полагаем, что по мере накопления ряда наблюдений по новой схеме учета моделирование зависимости «учет в море — возврат» будет строиться по новому временному периоду.

Северо-восточная Камчатка. Горбуша, воспроизводящаяся в реках северо-восточного побережья Камчатки, в августе-сентябре откочевывает в акваторию юго-западной части Берингова моря. Район осеннего нагула един для всех локальных стад/популяций вида в регионе. Как ранее уже было отмечено, данный комплекс стад горбуши рассматривается как единый промысловый запас. Поэтому возможно прямое моделирование прогноза численности вида для всего регионального запаса без учета внутривидовой структуры морских скоплений молоди.

На основе имеющихся данных получена прогностическая модель зависимости «учет в море — возврат» для горбуши северо-восточной Камчатки (рис. 8). Описательная регрессионная статистика модели дана в табл. 7.

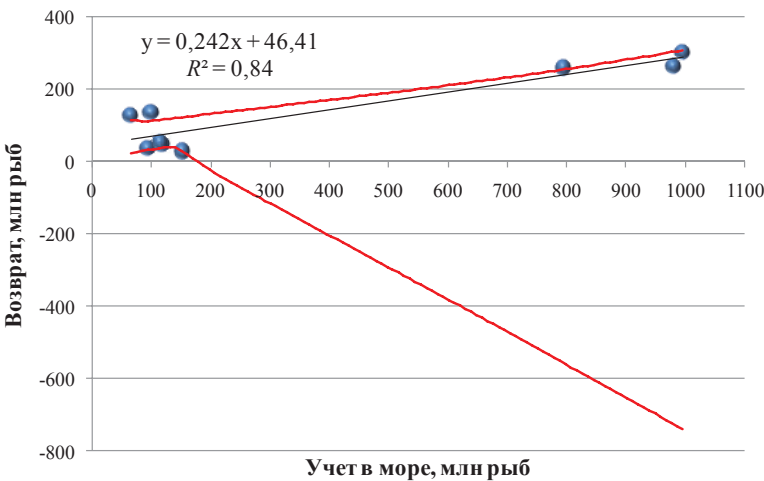


Рис. 8. Регрессионная модель для оценки численности подходов горбуши северо-восточной Камчатки на основе линейной зависимости «учет в море — возврат» по данным 2012–2023 гг. (отсутствуют данные 2015 и 2016 гг.), красные кривые показывают границы $\pm CI$ 95 % из перевыборки

Fig. 8. Regression model for estimating the abundance of pink salmon returns in northeastern

Kamchatka based on the linear relationship between the abundance at sea and the returns (data of 2012–2023, with missing 2015 and 2016). Red curves limit the 95 % percentiles confidence intervals

Таблица 7

Описательная статистика регрессионной модели зависимости «учет в море — возврат» для горбуши северо-восточной Камчатки по данным 2012–2023 гг.

Table 7

Descriptive statistics for the regression model based on the relationship between the abundance at sea and the returns for pink salmon in northeastern Kamchatka (data of 2012–2023)

Регрессионная статистика						
R	0,919					
R ²	0,844					
Нормированный R ²	0,821					
SE	46,034					
Наблюдения	9					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	p	
Регрессия	1	80122,032	80122,032	37,809	< 0,001	
Остаток	7	14834,049	2119,150			
Итого	8	94956,081				
Модель						
Параметры	Коэффициенты	SE	t	p	−CI 95 %	+CI 95 %
Y-пересечение	46,417	21,473	2,162	0,067	−4,359	97,192
Учет в море	0,243	0,039	6,149	< 0,001	0,149	0,336

Из представленных данных видно, что уровень детерминации модели достаточно высок — $R^2 = 0,84$, но в результате переВыборки доверительный интервал пересек 0. Данная модель вполне соответствует требованиям для прогнозирования динамики запасов тихоокеанских лососей, результаты которых предусматривают стандартную ошибку $\pm 25\text{--}30\%$. Отметим, что специалистами ТИНРО строятся аналогичные модели для комплекса стад горбуши северо-восточной Камчатки, которые также характеризуются высоким уровнем детерминации [Шевляков и др., 2023, 2024б].

Западная Камчатка. В бассейне Охотского моря, как отмечено выше, нагуливается молодь различных региональных комплексов стад горбуши. Причем вариабельность количества нагуливающейся молодежи зависит от динамики запасов вида в каждом конкретном регионе воспроизводства. Традиционным базисом при подготовке прогнозов численности горбуши на основе зависимости «учет в море — возврат» в охотоморском бассейне было разделение «северного» и «южного» комплексов стад. Уточним, что к «северному» комплексу традиционно относились стада горбуши, воспроизводящиеся в реках западнокамчатского и североохотоморского побережий. «Южный» комплекс стад включал рыб, воспроизводящихся на о. Сахалин, Курильских островах, в бассейне р. Амур и юго-западной части охотоморского побережья.

В течение 1990–2000 гг. в бассейне Охотского моря молодь горбуши западнокамчатского происхождения (условно «северный» комплекс стад) выделяли из смешанных скоплений путем анализа характера распределения траловых уловов и размерно-массовых показателей рыб [Ерохин, 2002, 2006]. При этом в середине 1990-х гг. по данным траловых съемок КамчатНИРО были выполнены первые исследования по генетической идентификации регионального происхождения молодежи горбуши в бассейне Охотского моря [Varnavskaya et al., 1998]. В качестве генетических маркеров использовали частоты аллозимных локусов. Полученные результаты позволили уточнить закономерности миграций западнокамчатской горбуши при откочевке от побережья в открытые воды. К сожалению, в последующий почти 15-летний период подобных исследований больше не проводили.

По мере увеличения численности западнокамчатской горбуши в 2010-е гг. все актуальнее становился вопрос оперативной дифференциации молодежи горбуши, имеющей различное региональное происхождение, в смешанных морских скоплениях. Однако было понятно, что любой метод, основанный на качественных морфометрических показателях рыб, не будет достаточно точным для решения проблемы идентификации молодежи горбуши в бассейне Охотского моря по районам происхождения.

Начиная с 2009 г. решением данной проблемы занялись специалисты-генетики КамчатНИРО и Института биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, которые осуществили дифференциацию «северного» и «южного» комплексов стад с помощью анализа распределения частот комбинированных гаплотипов митохондриальной ДНК [Шпигальская и др., 2011]. Впоследствии данные исследования ежегодно велись специалистами КамчатНИРО в режиме мониторинга. Все эти работы изначально были связаны с идеей необходимости получения адекватной модели «учет в море — возврат» для комплекса стад горбуши западной Камчатки.

В начале 2020-х гг. уже был накоплен достаточно репрезентативный ряд идентификационных оценок (долей) регионального состава молодежи горбуши («южный» и «северный» комплексы стад) по данным траловых уловов учетных съемок ТИНРО. На их основе получены адекватные оценки численности молодежи «северного» комплекса стад из общего количества сеголеток горбуши в бассейне Охотского моря. Дальнейшим этапом работы стало непосредственное разделение горбуши западной Камчатки и североохотоморского побережья. Для этого потенциальную долю (количество) рыб североохотоморского побережья выделяли из общей «северной» группировки стад на основе знания закономерностей статистики промысла горбуши в обоих регионах. Таким образом, стало возможным использование модели «учет в море — возврат» для

комплекса стад горбуши западного побережья Камчатки. Аналогичная модель уже была использована специалистами КамчатНИРО для подготовки региональных прогнозов вида в 2023 и 2024 гг.*. При этом в 2023 г. данный подход полностью оправдался по тренду (прогнозируемый вылов — 190 тыс. т, фактический вылов — 231 тыс. т).

Следует отметить, что в 2020-х гг. специалисты ТИНРО начали решать задачу по дифференциации молоди горбуши «северного» и «южного» комплексов стад с помощью кластерно-аналитического подхода с использованием в качестве первичных данных показателей индивидуальной массы самок из траловых уловов [Шевляков и др., 2023, 2024б]. На основе этого метода удавалось разделять сеголеток «северного» и «южного» комплексов стад. Полагаем, что в качестве альтернативы, данный метод оценки внутривидовой структуры молоди горбуши в охотоморском бассейне вполне актуален. Однако популяционно-генетические методы идентификации регионального состава рыб в смешанных морских скоплениях остаются предпочтительнее.

С учетом вышесказанного была построена регрессионная модель «учет в море — возврат» для комплекса стад западной Камчатки (рис. 9). Вводные данные, которые использовали для построения прогностической модели, представлены в табл. 8. Описательная регрессионная статистика модели дана в табл. 9.

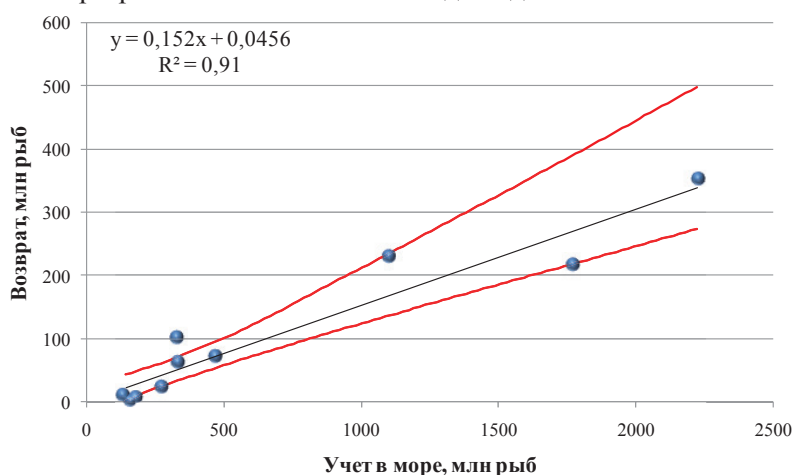


Рис. 9. Регрессионная модель для оценки численности подходов горбуши западной Камчатки на основе линейной зависимости «учет в море — возврат» по данным 2012–2023 гг. (отсутствуют данные 2014 г.), красные кривые показывают границы $\pm CI$ 95 % из переборки

Fig. 9. Regression model for estimating the abundance of pink salmon returns in western Kamchatka based on the linear relationship between the abundance at sea and the returns (data of 2012–2023, with missing 2014). Red curves limit the 95 % percentiles confidence intervals

Полученные результаты моделирования прогнозов динамики численности горбуши западной Камчатки демонстрируют очень высокий уровень детерминации по взаимосвязи «учет в море — возврат» — $R^2 = 0,91$. Соответственно, представленная модель отвечает всем необходимым требованиям для промыслового прогнозирования данной единицы запасов вида.

Диагностика связей типа «запас–пополнение»

Северо-восточная Камчатка. Оптимальной моделью для прогнозирования подходов горбуши к северо-восточной Камчатке от нерестового запаса родителей оказалась простая прямая пропорция с коэффициентом 2,436 и CI 95 % от 1,802 до 3,293 (прил. 2) или 2,403 в диапазоне CI 95 % от 1,780 до 3,249 с применением ортогональной ре-

* Лососи–2023 (путинный прогноз). Владивосток: ТИНРО, 2023. 104 с.; Лососи–2024 (путинный прогноз). Владивосток: ТИНРО, 2024.

Таблица 8

Модельные параметры, использованные для регрессионной модели зависимости «учет в море — возврат» для горбуши западной Камчатки по данным 2012–2023 гг.

Table 8

Model parameters used for the regression model based on the relationship between the abundance at sea and the returns for pink salmon in western Kamchatka (data of 2012–2023)

Модельные параметры (молодь)	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Общая численность молоди в море, млн рыб	1128	569	696	1060	442	2752	678	555	2113	1271	2564
Доля молоди «северной» группировки стад в море, %	35	34	–	46	46	82	56	62	55	25	73
Численность молоди «северной» группировки стад в море, млн рыб	395	194	–	487	203	2257	380	344	1162	318	1872
Численность молоди западной Камчатки в море, млн рыб*	168	188	–	478	143	2223	341	337	1107	284	1773
Модельные параметры (производители)	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Численность подходов производителей западной Камчатки, млн рыб	1,6	7,7	4,6	71,2	11,8	350,0	62,0	100,8	229,0	23,3	215,2
Доля североохотоморских стад в вылове «северной» группировки стад, %**	57,3	3,0	56,8	1,9	29,5	1,5	10,1	2,0	4,7	10,6	5,3

* Определяется путем вычета доли/численности рыб, потенциально имеющих североохотоморское происхождение (Магаданская область).

** Определяется по соотношению фактического вылова горбуши западного побережья Камчатки и Магаданской области в год возврата, последующего после проведения учетной траловой съемки в бассейне Охотского моря.

Таблица 9

Описательная статистика регрессионной прогностической модели зависимости «учет в море — возврат» для горбуши западной Камчатки по данным 2012–2023 гг.

Table 9

Descriptive statistics for the regression predictive model based on the relationship between the abundance at sea and the returns for pink salmon in western Kamchatka (data of 2012–2023)

Регрессионная статистика						
R	0,956					
R ²	0,914					
Нормированный R ²	0,903					
SE	36,798					
Наблюдения	10					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	p	
Регрессия	1	115225,0	115225,0	85,090	< 0,001	
Остаток	8	10833,12	1354,14			
Итого	9	126058,1				
Модель						
Параметры	Коэффициенты	SE	t	p	−CI 95 %	+CI 95 %
У-пересечение	0,045	16,446	0,003	0,997	−37,879	37,970
Учет	0,152	0,016	9,224	< 0,001	0,114	0,190

грессии (прил. 3). Любое усложнение такой простой модели по формулам (1, 4, 8) и др. вело к увеличению информационных критериев (ухудшению моделей). Однако в результате многократной перекрестной проверки установлено, что в зависимости от зерна генератора псевдослучайных чисел в оптимальные модели могут входить почти все факторы, кроме F1, но не вместе, а в более простых конфигурациях моделей, чем представленная в табл. 5. Таким образом, мы повторили процедуры смены зерна в случайном лесе по опубликованным скриптам [Фельдман, 2020], переключив их в режим регрессии, а не классификации (прил. 4). Использование идентичного пакета *Boruta* [Kursa, Rudnicki, 2010] позволило нам подтвердить, что пока ни один из предложенных факторов не может считаться достаточно надежным для прогнозирования, так как их эффект буквально не отличался от шума (рис. 10).

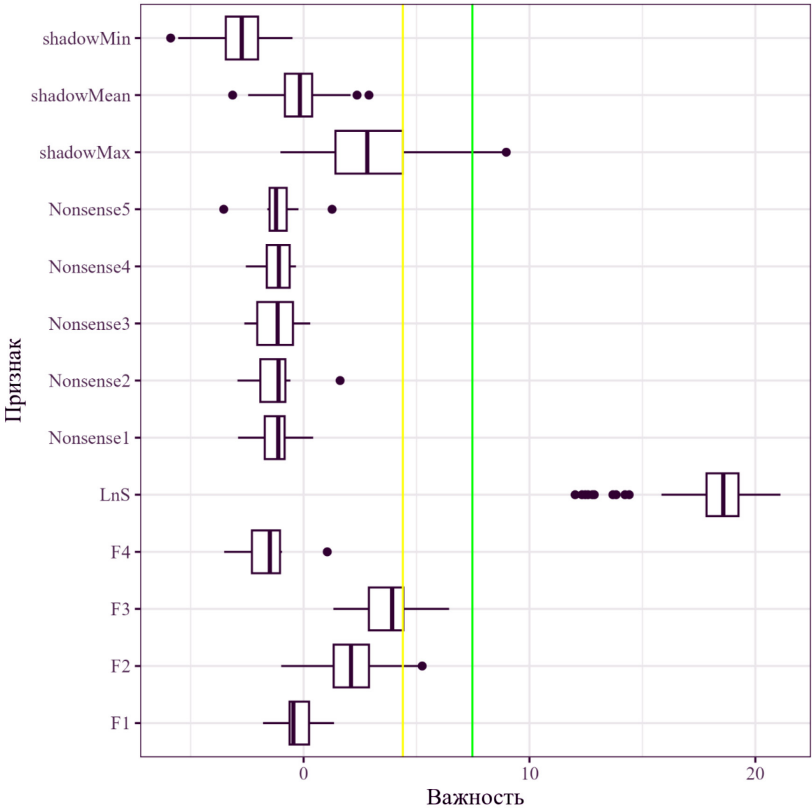


Рис. 10. Результат алгоритма *Boruta* (чем выше Z-показатели уменьшения точности, тем выше важность) для северо-восточной Камчатки: признаки, важность которых выше порога shadowMax, признаются подтвержденными, желтая вертикаль показывает 75,0 % распределения, а зеленая — 97,5 % распределения shadowMax; Nonsense1...5 являются случайным замесом соответствующих признаков F1...F4 и LnS

Fig. 10. Result of the *Boruta* algorithm (Z-scores of accuracy decreasing) for northeastern Kamchatka: the signs with importance higher the shadowMax threshold are reckoned as confirmed. Vertical lines: yellow — 75,0 %, green — 97,5 % of the shadowMax parameter distribution; Nonsense1...5 are a random mixture of the corresponding features F1...F4 and LnS

Самой показательной проверкой качества прогнозирования оказалась средняя абсолютная шкалированная ошибка (MASE). Она в модели Рикера, настроенной на данных без последних 5 лет наблюдений, составила 1,167, а в модели прямой пропорции MASE достиг 0,599 (прил. 5). Это значит, что в тесте на последних 5 годах наивный прогноз (следующий год повторит данный по величине R) был лучше, чем модель Рикера (MASE > 1). Аналогично модель прямой пропорции была ближе к тестовым данным, чем наивный прогноз (MASE < 1).

Западная Камчатка. Оптимальной моделью для прогнозирования подходов горбуши к западной Камчатке от нерестового запаса родителей оказалась простая прямая пропорция с коэффициентом 2,866 и CI 95 % от 1,721 до 4,774 (прил. 6) или 2,868 в диапазоне CI 95 % от 1,887 до 4,378 с применением ортогональной регрессии, с которой модель Рикера оказывается более предпочтительной (прил. 7). Дальнейшее усложнение модели Рикера вело к увеличению информационных критериев (снижению качества прогнозирования). Однако в результате многократной перекрестной проверки установлено, что в зависимости от зерна генератора псевдослучайных чисел в оптимальные модели могут входить все факторы, но не вместе, а в более простых конфигурациях моделей, чем представленная в табл. 6. Таким образом, мы повторили процедуры смены зерна в случайном лесе по опубликованным скриптам [Фельдман, 2020], переключив их в режим регрессии, а не классификации (прил. 8). Использование идентичного пакета *Boruta* позволило нам подтвердить, что пока ни один из предложенных факторов не может считаться достаточно надежным для прогнозирования, так как их эффект буквально не отличался от шума (рис. 11).

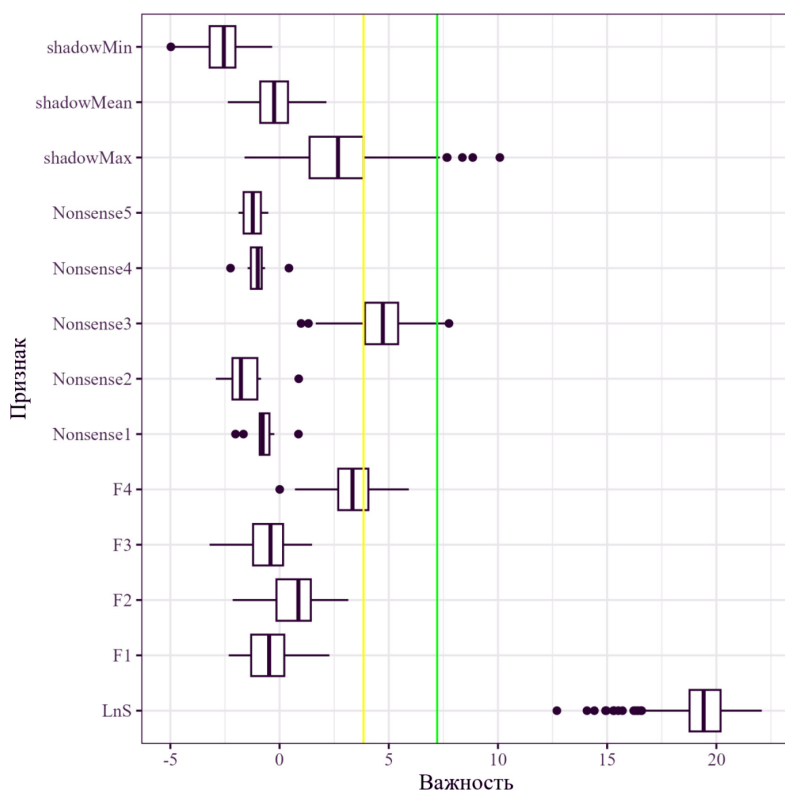


Рис. 11. Результат алгоритма *Boruta* для западной Камчатки. Пояснения см. на рис. 10
Fig. 11. Result of the *Boruta* algorithm for western Kamchatka. See explanation at Fig. 10

Проверка качества прогнозирования по MASE в модели Рикера, настроенной на данных без последних 5 лет наблюдений, составила 1,031, а в модели прямой пропорции MASE достиг 1,157 (прил. 9). Это значит, что в тесте на последних 5 годах наивный прогноз (следующий год повторит данный по величине R) был лучше, чем модель Рикера или прямой пропорции ($MASE > 1$). Таким образом, пока нельзя назвать ни одну из проверенных моделей для западной Камчатки надежной.

Закключение

В результате выполненной работы представлены различные варианты используемых в КамчатНИРО прогностических моделей для оценки численности запасов

(подход, возврат) горбуши Камчатского края. В качестве исходных базовых данных служили ряды наблюдений, характеризующих численность нерестовых запасов и подходов вида в 1990–2023 гг.

Исследования позволили определить наиболее активные климато-океанологические факторы, которые могут быть использованы в качестве предикторов для прогнозирования. К таковым отнесены следующие климатические показатели: индекс Тихоокеанской декадной осцилляции (*PDO*), Западно-Тихоокеанский циклонический индекс (*WP*), индекс Арктической осцилляции (*AO*). В качестве дополнительного параметра использовали дифференцированные по районам и месяцам данные аномалий температуры поверхности океана (*aSST*), которые позволили отследить опосредованную реакцию влияния терморегима вод на ранних этапах морского нагула горбуши на формирование численности ее подходов. На основе выявленных закономерностей были построены прогностические модели типа «запас–пополнение» с учетом климато-океанологических данных для оценки динамики численности возвратов горбуши северо-восточной и западной Камчатки. В первом случае объяснение прогнозов ожидаемых подходов составило 81 % ($R^2 = 0,81$), а во втором — 69 % ($R^2 = 0,69$).

Отдельным блоком рассмотрены методы прогнозирования численности горбуши с использованием регрессионных моделей «учет в море — возврат». По данным учетных траловых съемок ТИНРО были построены зависимости, отражающие связь оцененной численности сеголеток на полигонах исследований в Беринговом и Охотском морях с величиной подходов производителей северо-восточной и западной Камчатки. В бассейне Охотского моря для определения численности западнокамчатской горбуши использовали данные генетической идентификации регионального состава молоди в смешанных траловых уловах. Для горбуши северо-восточной и западной Камчатки объяснение прогнозов ожидаемых подходов составило соответственно 84 % ($R^2 = 0,84$) и 91 % ($R^2 = 0,91$).

Все представленные в тексте статьи регрессионные модели имеют высокую долю описанной дисперсии. Однако анализ их обобщающей способности показал, что все они были переобучены, но и простые модели Рикера или прямой пропорции нельзя назвать достаточно надежными для прогнозирования подходов к западной Камчатке. Тем не менее к северо-восточной Камчатке подходы горбуши, по всей вероятности, находятся в прямой зависимости от числа родителей. Наиболее часто среди всех дополнительных предикторов в различных испытаниях моделей для прогнозирования подходов горбуши оставался *F3* (*aSST*) со средним тестовым $R^2 = 0,62$ у северо-восточной Камчатки, а у западной Камчатки — *F4* (*AO*) со средним тестовым $R^2 = 0,47$.

Для практического прогнозирования численности запасов горбуши Камчатского края, возможно, необходимо применять в комплексе рассмотренные модели типа «запас–пополнение» и «учет в море — возврат». Это позволит более адекватно учесть многофакторную природу процессов, влияющих на формирование численности региональных запасов вида. Однако модель «учет в море — возврат» у северо-восточной Камчатки обладает крайне высокой неустойчивостью параметров и требует дальнейшего накопления наблюдений.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность сотрудникам КамчатНИРО: за сбор генетических материалов во время экспедиционных работ на научно-исследовательских судах — специалистам лаборатории рыбохозяйственной экологии А.П. Лозовому, А.В. Кожевникову, И.А. Заочному; за обработку генетических проб — специалистам лаборатории молекулярной генетики А.Н. Косициной, В.В. Савенкову, А.М. Денисенко, У.О. Муравской.

The authors are grateful to their colleagues from KamchatNIRO: A.P. Lozovoy, A.V. Kozhevnikov, and I.A. Zaachny for collecting genetic samples aboard research

vessels and A.N. Kositsina, V.V. Savenkov, A.M. Denisenko, and U.O. Muravskaya for cameral processing of the genetic samples.

Финансирование работы (FUNDING)

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study was not sponsored.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable international, national and/or institutional guidelines for care and use of animals were implemented.

The authors state that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

А.В. Бугаев — обобщение и анализ материалов, подготовка демонстрационных материалов, математические расчеты, написание статьи.

О.Б. Тепнин — подготовка и предоставление климато-океанологических данных.

Н.Ю. Шпигальская — выполнение генетической идентификации регионального происхождения молоди горбуши из траловых уловов в бассейне Охотского моря.

В.В. Кулик — диагностика обобщающей способности моделей, подготовка демонстрационных материалов, редактирование.

A. V. Bugaev — data generalization and analysis, illustrations, mathematical calculations, writing the text; O. B. Tepnin — climatic and oceanographic data providing and processing; N. Yu. Shpigalskaya — genetic identification of origin for juvenile pink salmon from trawl catches obtained in the Okhotsk Sea; V. V. Kulik — diagnostics of generalization ability of models, illustrations, editing.

Список литературы

Бабаян В.К., Бобырев А.Е., Булгакова Т.И. и др. Методические рекомендации по оценке запасов приоритетных видов водных биологических ресурсов. — М. : ВНИРО, 2018. — 312 с.

Бирман И.Б. Морской период жизни и вопросы динамики стада тихоокеанских лососей : моногр. — М. : Агропромиздат, 1985. — 208 с.

Бугаев А.В., Герлиц А.И. Характеристика нагульных миграций заводской молоди 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. — 2023. — Т. 203, вып. 1. — С. 16–45. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-16-45. EDN: QCEING.

Бугаев А.В., ЗикунOVA О.В., Артюхина Н.Б., Шубкин С.В. Аналитический обзор итогов лососевых путин в Камчатском крае в 2018–2022-х гг. (прогнозы, промысел, запасы). Сообщение 2 (нерка, кижуч, чавыча) // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2023а. — Вып. 68. — С. 42–62. doi 10.15853/2072-8212.2023.68.42-62

Бугаев А.В., ЗикунOVA О.В., Шпигальская Н.Ю. и др. Аналитический обзор итогов лососевых путин в Камчатском крае в 2018–2022-х гг. (прогнозы, промысел, запасы). Сообщение 1 (горбуша, кета) // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2023б. — Вып. 68. — С. 5–41. DOI: 10.15853/2072-8212.2023.68.5-41.

Бугаев А.В., ЗикунOVA О.В., Артюхина Н.Б., Шубкин С.В. Итоги лососевой путины в Камчатском крае в 2023 г. // Бюл. изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2024. — № 18. — С. 19–41. DOI: 10.26428/losos_bull18-2024-19-41. EDN: SAXNEI.

Бугаев А.В., Тепнин О.Б. Оценка влияния некоторых климатических факторов на численность азиатских стад горбуши и кеты // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 166. — С. 67–87.

Бугаев А.В., Тепнин О.Б. Продуктивность тихоокеанских лососей: влияние термических условий вод в период первой зимы в бассейне Северной Пацифики // Тр. ВНИРО. — 2015. — Т. 158. — С. 89–111.

Бугаев А.В., Тепнин О.Б., Радченко В.И. Климатическая изменчивость и продуктивность тихоокеанских лососей Дальнего Востока России // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2018. — Вып. 49. — С. 5–50. DOI: 10.15853/2072-8212.2018.49.5-50.

Бугаев А.В., Фельдман М.Г., Тепнин О.Б., Коваль М.В. Аномалии температуры поверхности воды в западной части Северной Пацифики — потенциальный климатический предиктор прогнозирования тихоокеанских лососей Камчатки // Вопр. рыб.-ва. — 2021. — Т. 22, № 4. — С. 46–62. DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-4-46-62.

Волвенко И.В. Морфометрические характеристики стандартных биостатистических районов для биоценологических исследований рыболовной зоны России на Дальнем Востоке // Изв. ТИНРО. — 2003. — Т. 132. — С. 27–42.

Датский А.В., Кулик В.В., Датская С.А. Динамика обилия массовых промысловых рыб дальневосточных морей и прилегающих районов открытой части Тихого океана и влияющие на неё факторы // Тр. ВНИРО. — 2021. — Т. 186. — С. 31–77. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-186-31-77.

Ерохин В.Г. Биология молоди тихоокеанских лососей в прикамчатских водах Охотского моря : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Петропавловск-Камчатский : КамчатНИРО, 2002. — 24 с.

Ерохин В.Г. Методико-биологические основы морского мониторинга тихоокеанских лососей в научной практике КамчатНИРО // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2007. — Вып. 9. — С. 50–78.

Ерохин В.Г. Оценка нерестовых возвратов горбуши и нерки западной Камчатки по материалам траловых учетов их молоди в Охотском море // Бюл. № 1 реализации «Концепции дальневосточной бассейновой программы изучения тихоокеанских лососей». — Владивосток : ТИНРО-Центр, 2006. — С. 248–252.

Зеленина Д.А., Животовский Л.А., Сошина В.А. и др. Внутривидовая дифференциация азиатской горбуши по данным о последовательности митохондриального гена *Cytb* // Генетика. — 2022. — Т. 58, № 11. — С. 1280–1291. DOI: 10.31857/S0016675822110145.

Карпенко В.И. Ранний морской период жизни тихоокеанских лососей : моногр. — М. : ВНИРО, 1998. — 165 с.

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

Косицына А.И., Шпигальская Н.Ю., Сергеев А.А. и др. Генетическая идентификация молоди горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) Охотоморского бассейна по результатам рестрикционного анализа митохондриальной ДНК и анализа однонуклеотидных полиморфизмов // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2022. — Вып. 66. — С. 52–67. DOI: 10.15853/2072-8212.2022.66.52-67.

Остроумов А.Г. Опыт применения аэрометодов для оценки заполнения нерестилищ лососями // Лососевое хозяйство Дальнего Востока. — М. : Наука, 1964. — С. 90–99.

Остроумов А.Г. Опыт применения аэрометодов учета тихоокеанских лососей в реках Камчатки. — Петропавловск-Камчатский : Книжная редакция «Камчатской правды», 1962. — 41 с.

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

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

Фельдман М.Г., Бугаев А.В., Тепнин О.Б. Результаты использования климато-океанологических предикторов для модели случайного леса (Random Forest) в целях прогнозирования динамики численности подходов горбуши Западной Камчатки // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2022. — Вып. 65. — С. 42–51. DOI: 10.15853/2072-8212.2022.65.42-51.

Фельдман М.Г., Шевляков Е.А. Выживаемость камчатской горбуши как результат совокупного воздействия плотностной регуляции и внешних факторов среды // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 182. — С. 88–114. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-182-88-114.

Фельдман М.Г., Шевляков Е.А., Дубынин В.А. Оценка величины, прогноз и управление запасами тихоокеанских лососей в Камчатском крае // Современное состояние и перспективы лососевого хозяйства на Дальнем Востоке России : мат-лы науч. конф. — Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2018. — С. 38–48. <http://www.sakhniro.ru/userfiles/conference%207-8.11.2017/materials2017.pdf>.

Шевляков Е.А., Дедерер Н.А., Островский В.И., Хен Г.В. Термические условия морских прибрежных вод как фактор, благоприятствующий появлению экстремовысокочисленных поколений карагинской горбуши // Изв. ТИНРО. — 2024а. — Т. 204, вып. 1. — С. 30–47. DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-30-47. EDN: RVYEMU.

Шевляков Е.А., Сомов А.А., Шевляков В.А. и др. Промысел горбуши в Дальневосточном рыбопромысловом бассейне в 2023 г.: предварительные исследования, прогноз, интерпретация итогов путины // Бюл. изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2024б. — № 18. — С. 97–104. DOI: 10.26428/losos_bull18-2024-97-104. EDN: ESMRWK.

Шевляков Е.А., Маслов А.В. Реки, определяющие воспроизводство тихоокеанских лососей на Камчатке, как реперы для оценки заполнения нерестового фонда // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 164. — С. 114–139.

Шевляков Е.А., Сомов А.А., Шевляков В.А. и др. Промысел горбуши в Дальневосточном рыбопромысловом бассейне в 2022 г.: предварительные исследования, прогноз, интерпретация итогов путины // Бюл. № 17 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2023. — С. 101–109. DOI: 10.26428/losos_bull17-2023-101-109. EDN: SYLNEO.

Шпигальская Н.Ю., Брыков В.А., Кухлевский А.Д. и др. Региональная идентификация смешанных морских скоплений молоди горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha*) на основе изменчивости фрагмента Cytb/D-loop митохондриальной ДНК // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 165. — С. 89–103.

Шунтов В.П. Опыт создания новой базы данных биологических ресурсов дальневосточных морей // Вопр. рыб-ва. — 2005. — Т. 6, № 2(22). — С. 172–190.

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

Boggs P.T., Donaldson J.R., Byrd R.H., Schnabel R.B. Algorithm 676: ODRPACK: software for weighted orthogonal distance regression // ACM Trans. Math. Softw. — 1989. — Vol. 15, Iss. 4. — P. 348–364. DOI: 10.1145/76909.76913.

Karpenko V.I. Ocean mortality of Northeast Kamchatka pink salmon and influencing factors // NPAFC Bull. — 1998. — № 1. — P. 251–261. <https://www.npafc.org/wp-content/uploads/Bulletins/Bulletin-1/page-251-261Karpenko.pdf>.

Kursa M.B., Rudnicki W.R. Feature Selection with the Boruta Package // J. of Statistical Software. — 2010. — Vol. 36, Iss. 11. — P. 2–12. DOI: 10.18637/jss.v036.i11.

Ogle D.H. Introductory Fisheries Analyses with R. — CRC Press : Chapman & Hall/CRC The R Series, 2016. — 304 p.

Ricker W.E. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations : Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada. — Ottawa : Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, 1975. — Bull. 191. — 382 p.

Ricker W.E. Stock and recruitment // J. Fish. Res. Bd Canada. — 1954. — Vol. 11, № 5. — P. 559–623. DOI: 10.1139/f54-039.

Rounsefell G.A. Factors causing decline in sockeye salmon of Karluk River, Alaska // U.S. Fish Wildl. Serv. Fish. Bull. — 1958. — Vol. 58. — P. 83–169. https://spo.nmfs.noaa.gov/sites/default/files/pdf-content/fish-bull/rounsefell_1.pdf.

Varnavskaya N.V., Erokhin V.G., Davydenko V.A. Determining area of origin of pink salmon juveniles on their catadromous migration in the Okhotsk Sea in 1995 using genetic stock identification techniques // NPAFC Bull. — 1998. — № 1. — P. 274–284. <https://www.npafc.org/wp-content/uploads/Bulletins/Bulletin-1/page-274-284Varnavskaya.pdf>.

References

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., and Sheremetyev, A.D., *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke zapasov prioritetnykh vidov vodnykh biologicheskikh resursov* (Guidelines for assessing stocks of priority types of aquatic biological resources), Moscow: VNIRO, 2018.

Birman, I.B., *Morskoi period zhizni i voprosy dinamiki stada tikhookeanskikh lososei* (The Marine Life History and the Issues of Dynamics of the Pacific Salmon Stock), Moscow: Agropromizdat, 1985.

Bugaev, A.V. and Gerlits, A.I., The characteristics of feeding migrations of hatchery-reared pacific salmon juveniles in the Sea of Okhotsk basin and adjacent Pacific waters in the autumn–winter period (regional identification, abundance, distribution of catches, biological characteristics, and mortality rate estimates), *Russ. J. Mar. Biol.*, 2023, vol. 49, no. 7, pp. 546–568. doi 10.1134/s1063074023070039

Bugaev, A.V., Zikunova, O.V., Artyukhina, N.B., and Shubkin, S.V., Analytical review of the results of salmon fisheries in Kamchatka Territory in 2018–2022 (forecasts, fisheries, stocks). Communication 2 (Sockeye salmon, Coho salmon, Chinook salmon), *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2023, vol. 68, pp. 42–62. doi 10.15853/2072-8212.2023.68.42-62

Bugaev, A.V., Zikunova, O.V., Shpigalskaya, N.Yu., Artyukhina, N.B., Shubkin, S.V., Kovalenko, M.N., and Lozovoy, A.P., Analytical review of the results of salmon fisheries in Kamchatka Territory in 2018–2022 (forecasts, fisheries, stocks). Communication 1 (Pink salmon, Chum salmon), *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2023, vol. 68, pp. 5–41. doi 10.15853/2072-8212.2023.68.5-41

Bugaev, A.V., Zikunova, O.V., Artyukhina, N.B., and Shubkin, S.V., Results of the salmon fishery season in Kamchatka Region in 2023, *Bull. study of Pacific Salmon in the Far East*, Vladivostok: TINRO, 2024, no. 18, pp. 19–41. doi 10.26428/losos_bull18-2024-19-41. EDN: CAXNEI.

Bugaev, A.V. and Tepnin, O.B., Estimation of some climatic factors influence on abundance of asian pink and chum salmon, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2011, vol. 166, pp. 67–87.

Bugaev, A.V. and Tepnin, O.B., Productivity of Pacific salmon: influence of water thermal conditions during the period of first winter in the basin of North Pacific, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 158, pp. 89–111.

Bugaev, A.V., Tepnin, O.B., and Radchenko, V.I., Climate variability and pacific salmon productivity in Russian Far East, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2018, vol. 49, pp. 5–50. doi 10.15853/2072-8212.2018.49.5-50

Bugaev, A.V., Pheldman, M.G., Tepnin, O.B., and Koval, M.V., On the use of the data of the anomaly of the water surface temperature in the western part of the northern Pacific as a potential climatic predictor for predicting the number of Pacific salmon of Kamchatka, *Vopr. Rybolov.*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 46–62. doi 10.36038/0234-2774-2021-22-4-46-62

Volvenko, I.V., Morphometric characteristic of standard biostatistical regions for biocenological researches of Russian fishing zone on Far East, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2003, vol. 132, pp. 27–42.

Datsky, A.V., Kulik, V.V., and Datskaya, S.A., The dynamics of the abundance of commercial fish in the Far Eastern seas and adjacent areas of the open part of the Pacific Ocean and factors influencing it, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 186, pp. 31–77. doi 10.36038/2307-3497-2021-186-31-77

Erokhin, V.G., Biology of juvenile Pacific salmon in the Kamchatka waters of the Sea of Okhotsk, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatNIRO, 2002.

Yerokhin, V.G., Methodical and biological basis of marine monitoring of Pacific Salmon in scientific practice of KamchatNIRO, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2007, vol. 9, pp. 50–78.

Erokhin, V.G., Assessment of spawning returns of pink salmon and sockeye salmon from western Kamchatka based on trawl surveys of their juveniles in the Sea of Okhotsk, *Byull. no. 1 realizatsii "Kontseptsii dal'nevostochnoi basseinovoi programmy izucheniya tikhookeanskikh lososei"* (Bull. No. 1 Implementation "Concept of the Far Eastern Basin Program for the Study of Pacific Salmon"), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2006, pp. 248–252.

Zelenina, D.A., Zhivotovsky, L.A., Soshnina, V.A., Vilkova, O.Yu., and Glubokovsky, M.K., Intraspecies Differentiation of the Asian Pink Salmon inferred from the Mitochondrial cytb Gene sequences, *Russ. J. Genet.*, 2022, vol. 58, no. 11, pp. 1323–1333. doi 10.1134/s1022795422110138

Karpenko, V.I., *Ranniy morskoy period zhizni tikhookeanskikh lososey* (Early marine life of Pacific salmon), Moscow: VNIRO, 1998.

Klyashtorin, L.B. and Lyubushin, A.A., *Tsiklicheskiye izmeneniya klimata i ryboproduktivnosti* (Cyclic Changes in Climate and Fish Capacity), Moscow: VNIRO, 2005.

Kositsyna, A.I., Shpigalskaya, N.Yu., Sergeev, A.A., Soshnina, V.A., Savenkov, V.V., Denisenko, A.D., Muravskaya, U.O., and Zelenina, D.A., Genetic identification of juvenile pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) in the Okhotsk Sea basin based on the results of restriction analysis of mitochondrial DNA and analysis of single-nucleotide polymorphism, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2022, vol. 66, pp. 52–67. doi 10.15853/2072-8212.2022.66.52-67

Ostroumov, A.G., The experience of using aerial methods to assess the filling of spawning grounds with salmon, in *Lososevoye khozyaystvo Dal'nego Vostoka* (Salmon farming in the Far East), Moscow: Nauka, 1964, pp. 90–99.

Ostroumov, A.G., *Opyt primeneniya aerometodov ucheta tikhookeanskikh lososey v rekakh Kamchatki* (The experience of using aeromethods of Pacific salmon accounting in the rivers of Kamchatka), Petropavlovsk-Kamchatsky: Book edition of Kamchatka Pravda, 1962.

Feldman, M.G., Using the decisions of the random forest algorithm for the purposes of forecasting pink salmon runs on north-eastern Kamchatka, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2020, vol. 59, pp. 76–96. doi 10.15853/2072-8212.2020.59.76-96

Feldman, M.G. and Bugaev, A.V., Modern principles of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) stocks management in the Kamchatka region (population dynamics, forecasting, fishing regulation), *Vopr. Rybolov.*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 86–95. doi 10.36038/0234-2774-2021-22-4-86-95

Feldman, M.G., Bugaev, A.V., and Tepnin, O.B., Results of using climate-oceanological predictors in a Random Forest model for the forecast of stock abundance dynamics of pink salmon runs in Western Kamchatka, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2022, vol. 65, pp. 42–51. doi 10.15853/2072-8212.2022.65.42-51

Feldman, M.G. and Shevlyakov, E.A., Survival of Kamchatka pink salmon as result of combined influence of density regulation and environmental factors, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 182, pp. 88–114. doi 10.26428/1606-9919-2015-182-88-114

Feldman, M.G., Shevlyakov, E.A., and Dubynin, V.A., Assessment of the size, forecast and management of Pacific salmon stocks in the Kamchatka Territory, in *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy lososevogo khozyaistva na Dal'nem Vostoke Rossii* (Scientific conference “Current state and prospects of salmon farming in the Russian Far East”), Yuzhno-Sakhalinsk: SakhNIRO, 2018, pp. 38–48. <http://www.sakhniro.ru/userfiles/conference%207-8.11.2017/materials2017.pdf>

Shevlyakov, E.A., Dederer N.A., Ostrovsky, V.I., and Khen, G.V., Thermal conditions in the marine coastal waters as a factor favorable for formation of extra-strong year-classes of Karaginsky pink salmon, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2024, vol. 204, no. 1, pp. 30–47. doi 10.26428/1606-9919-2024-204-30-47. EDN: RVYEMU.

Shevlyakov, E.A., Somov, A.A., Shevlyakov, V.A., Kanzeparova, A.N., Dederer, N.A., and Melnikov, I.V., Pink salmon fishery in the Far-Eastern fishing basin in 2023: preliminary studies, forecast, interpretation of the fishing season results, *Bull. study of Pacific Salmon in the Far East*, Vladivostok: TINRO, 2024, no. 18, pp. 97–104. doi 10.26428/losos_bull18-2024-97-104. EDN: ESMRWK.

Shevlyakov, E.A. and Maslov, A.V., The rivers determining reproduction of pacific salmon in Kamchatka as indicators of spawning grounds filling, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2011, vol. 164, pp. 114–139.

Shevlyakov, E.A., Somov, A.A., Shevlyakov, V.A., Kanzeparova, A.N., Dederer, N.A., and Melnikov, I.V., Pink salmon fishery in the Far-Eastern fishing basin in 2022: preliminary studies, forecast, interpretation of the fishing season results, in *Bull. No. 17 izucheniya tikhookeanskikh lososei na Dal'nem Vostoke* (Bull. No. 17 Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO, 2023, pp. 101–109. doi 10.26428/losos_bull17-2023-101-109. EDN: SYLHEO.

Shpigalskaya, N.Y., Brykov, V.A., Kukhlevsky, A.D., Saravansky, O.N., Klimov, A.V., Chetvertak, A.A., and Shevlyakov, E.A., Regional identification of mixed aggregations of juvenile pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* in the sea on the base of mitochondrial DNA Cytb/D-loop fragment variety, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2011, vol. 165, pp. C. 89–103.

Shuntov, V.P., Experience of creating new information database for biological resources of the Far Eastern Seas, *Vopr. Rybolov.*, 2005, vol. 6, no. 2(22), pp. 172–190.

Shuntov, V.P. and Temnykh, O.S., *Tikhookeanskije lososi v morskikh i okeanicheskikh ekosistemakh* (Pacific Salmon in Sea and Ocean Ecosystems), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2008, vol. 1.

Boggs, P.T., Donaldson, J.R., Byrd, R.H., and Schnabel, R.B., Algorithm 676: ODRPACK: software for weighted orthogonal distance regression, *ACM Trans. Math. Softw.*, 1989, vol. 15, no. 4, pp. 348–364. doi 10.1145/76909.76913

Karpenko, V.I., Ocean mortality of Northeast Kamchatka pink salmon and influencing factors, *NPAFC Bull.*, 1998, no. 1, pp. 251–261. <https://www.npafc.org/wp-content/uploads/Bulletins/Bulletin-1/page-251-261Karpenko.pdf>.

Kursa, M. and Rudnicki, W., Feature Selection with the Boruta Package, *J. of Statistical Software*, 2010, vol. 36, no. 11, pp. 2–12. doi 10.18637/jss.v036.i11

Ogle, D.H., *Introductory Fisheries Analyses with R*, CRC Press: Chapman & Hall/CRC The R Series, 2016.

Ricker, W.E., *Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations*, Ottawa: Dep. Environ. Fish. Mar. Serv., 1975.

Ricker, W.E., Stock and recruitment, *J. Fish. Res. Bd Canada*, 1954, vol. 11, no. 5, pp. 559–623. doi 10.1139/f54-039

Rounsefell, G.A., Factors causing decline in sockeye salmon of Karluk River, Alaska, *U.S. Fish Wildl. Serv. Fish. Bull.*, 1958, vol. 58, pp. 83–169. https://spo.nmfs.noaa.gov/sites/default/files/pdf-content/fish-bull/rousefell_1.pdf

Varnavskaya, N.V., Erokhin, V.G., and Davydenko, V.A., Determining area of origin of pink salmon juveniles on their catadromous migration in the Okhotsk Sea in 1995 using genetic stock identification techniques, *NPAFC Bull.*, 1998, no. 1, pp. 274–284. <https://www.npafc.org/wp-content/uploads/Bulletins/Bulletin-1/page-274-284Varnavskaya.pdf>. Cited May 13, 2024.

R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024, version 4.4.0. <https://www.R-project.org/>. Cited May 13, 2024.

https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/monthly.ao.index.b50.current.ascii. Cited May 13, 2024.

<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pdo/>. Cited May 13, 2024.

<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>. Cited May 13, 2024.

<https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/cmb/ersst/v5/netcdf/>. Cited May 13, 2024.

Spiess, A.-N., *onls: Orthogonal Nonlinear Least-Squares Regression*. R package version 0.1-2. <https://CRAN.R-project.org/package=onls>. Cited May 13, 2024.

Working Group on Stock Assessment NPAFC. The status and trends of Pacific salmon and steelhead trout stocks with linkages to their ecosystem, *NPAFC Tech. Rep.*, 2023, no. 19, 256 p. doi 10.23849/LOEX7610

Lososi–2023 (putinnyi prognoz) (Salmon–2024 (Fishing forecast)), Vladivostok: TINRO, 2023.

Lososi–2024 (putinnyi prognoz) (Salmon–2024 (Fishing forecast)), Vladivostok: TINRO, 2024.

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

После доработки 15.05.2024 г.

Принята к публикации 5.06.2024 г.

*The article was submitted 19.04.2024; approved after reviewing 15.05.2024;
accepted for publication 5.06.2024*