

Научная статья

УДК 597.552.511–152.6:005.521

DOI: 10.26428/losos_bull18-2024-171-184

EDN: FYBDYA

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ ТИХООКЕАНСКИХ ЛОСОСЕЙ В ХАБАРОВСКОМ КРАЕ

В.И. Островский*

Хабаровский филиал ВНИРО (ХабаровскНИРО),
680038, г. Хабаровск, Амурский бульвар, 13а

Аннотация. Рассмотрены методы прогнозирования запасов тихоокеанских лососей в Хабаровском крае. Показано, что ошибки прогнозов на основе теоретических моделей «родители–потомки» связаны с изменчивостью погодных условий в местах размножения. При дополнении однофакторных моделей факторами, связанными с изменчивостью погоды в местах размножения, значительно лучше объясняется динамика численности потомков. Это позволяет надеяться на уменьшение ошибок прогнозов, основанных на многофакторных моделях, при условии надежных оценок численности родителей и потомков, что весьма проблематично в условиях растущего дефицита квалифицированных кадров.

Ключевые слова: тихоокеанские лососи, динамика численности, методы прогнозирования, погодноклиматические факторы, *Oncorhynchus*

Для цитирования: Островский В.И. Проблемы и перспективы прогнозирования запасов тихоокеанских лососей в Хабаровском крае // Бюл. изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2024. — № 18. — С. 171–184. DOI: 10.26428/losos_bull18-2024-171-184. EDN: FYBDYA.

Original article

Problems and prospects in forecasting the stocks of pacific salmon in Khabarovsk Region

Vladimir I. Ostrovsky

Khabarovsk branch of VNIRO (KhabarovskNIRO), 13a, Amursky Boulevard, Khabarovsk, 680038, Russia
Ph.D., head of department, ostrovskiy@khabarovsk.vniro.ru, ORCID 0000-0003-2576-4413

Abstract. Methods for forecasting the stocks of pacific salmon in Khabarovsk Region are considered. Errors of the forecasts based on theoretical parent-offspring models are associated with variability in weather conditions on the spawning grounds. The progeny dynamics is modeled much better when weather factors are assimilated into the single-factor models. The errors reduction would be expected for multifactor models, assuming that they will be based on reliable data on the number of parents and offspring, though this condition seems questionable in the face of a growing shortage of qualified observers and modelers.

Keywords: pacific salmon, population dynamics, forecasting method, weather-climatic factors, *Oncorhynchus*

For citation: Ostrovsky V.I. Problems and prospects in forecasting the stocks of pacific salmon in Khabarovsk Region, *Bulletin on the study of Pacific salmon in the Far East*, Vladivostok: TINRO, 2024, no. 18, pp. 171–184. (In Russ.). DOI: 10.26428/losos_bull18-2024-171-184. EDN: FYBDYA.

Введение

Динамика численности популяций животных зависит от рождаемости, смертности, эмиграции и иммиграции. Учитывая относительно хорошо развитый хоминг у тихоокеанских лососей, последними двумя составляющими динамики можно пренебречь и рассматривать её как результат взаимодействия двуединого процесса рождаемости и смертности. Вполне очевидно, что при постоянной рождаемости численность популяции зависит от смертности, при постоянной смертности — от рождаемости. Допуская постоянство одной из двух составляющих динамики, её можно описать однофак-

* Островский Владимир Иванович, кандидат биологических наук, начальник отдела, ostrovskiy@khabarovsk.vniro.ru, ORCID 0000-0003-2576-4413.

торными моделями, но результат прогнозирования будет зависеть от оправданности принятых допущений.

В предположении постоянства условий воспроизводства, влияющих на смертность лососей, разработаны теоретические модели «родители–потомки» [Максименко, Антонов, 2003], но известно, что смертность потомков, иногда близкая к тотальной, зависит от влияния множества внешних факторов, действующих преимущественно в пресноводный или ранний морской период жизни [Коновалов, 1985]. Прогнозы динамики численности популяций тихоокеанских лососей не отличаются высокой точностью, что отчасти может быть связано с попытками описания многофакторного процесса формирования численности однофакторными моделями.

В поиске разрешения явного противоречия между теоретическими моделями и сведениями о смертности потомков в связи с влиянием внешних факторов в Хабаровском филиале ВНИРО (ХабаровскНИРО) разрабатываются многофакторные модели, основанные на поиске причин отклонений фактической численности потомков от численности, рассчитанной с использованием однофакторных моделей «родители–потомки».

Цель настоящей работы — сравнить результаты прогнозирования численности потомков лососей на основе однофакторных и многофакторных моделей с обзором эволюции методов прогнозирования в текущем веке и оценкой перспектив их дальнейшего развития.

Материалы и методы

Работа основана на обзоре прогнозов численности тихоокеанских лососей, возвращающихся из моря в конкретном году (подход), разрабатываемых ХабаровскНИРО в текущем веке. Прогнозы обычно основываются на анализе предполагаемой или выявленной связи численности потомков с численностью родителей, которая оценивается прямым учетом количества рыб, пропущенных на нерестилища. Численность потомков относительно просто оценивается только у горбуши, которая практически вся созревает в одинаковом возрасте, вследствие чего каждый год из моря возвращаются рыбы, принадлежащие к одному поколению. Численность потомков горбуши равна численности подхода, т.е. сумме численности выловленных и пропущенных на нерестилища рыб. Потомки лососей с более сложной возрастной структурой возвращаются из моря в течение нескольких лет, их принадлежность к конкретному поколению устанавливается после определения возрастного состава рыб с последующей оценкой абсолютной численности рыб каждого возраста. Численность потомков складывается из численности рыб, принадлежащих к одному и тому же поколению, в подходах нескольких смежных лет.

В зависимости от уровня информационной обеспеченности в качестве косвенной меры численности родителей и потомков могут выступать такие характеристики, как улов, улов на усилие, популяционная плодовитость, численность производителей, численность покатной молодежи, количество нерестовых бугров и др. Описать все возможные методические аспекты оценок, используемых в прогнозах параметров за длительный период, в рамках данной работы не представляется возможным, можно лишь сослаться на использование рекомендованных методов исследований лососей [Глубоковский и др., 2017].

Значения коэффициентов уравнений подбирали итерационными методами, реализованными в пакете прикладных программ SYSTAT. При построении моделей использованы методы множественного нелинейного регрессионного анализа [Дрейпер, Смит, 2007]. Полагая, что остатки уравнений связаны с погодными условиями в местах размножения, анализировали связь их величины с изменчивостью метеорологических факторов из числа приведенных на сайте «Погода и климат» (<http://www.pogodaiklimat.ru/history.htm>). Дополнительные факторы включали в модель при условии статистически значимого (с вероятностью не менее 95 %) увеличения объясненной доли дисперсии зависимой переменной [Поллард, 1982].

Результаты и их обсуждение

Прогнозы запасов тихоокеанских лососей в границах Хабаровского края специалистами ХабаровскНИРО разрабатываются для 7 районов прогнозирования и насчитывают 18 прогнозируемых объектов (виды лососей в различных районах). В первой пятилетке текущего века во всех районах (за исключением Охотского района) лососей изучали сотрудники лаборатории тихоокеанских лососей, в штате которой числилось до 13 человек. В Охотском районе лососей изучали 8 сотрудников Охотской лаборатории, но кроме тихоокеанских лососей они изучали состояние запасов других морских и проходных видов рыб. Учитывая большую протяженность морской береговой линии Хабаровского края (около 2,5 тыс. км), множество нерестовых рек, время, затрачиваемое на полевые и камеральные исследования, разработку прогнозов, число сотрудников не казалось избыточным. Непосредственно в разработке всех прогнозов запасов лососей от стадии расчетов до написания текстов участвовали до 11 сотрудников.

До 2008 г., как и в прошлом веке, прогнозы основывались на предположении относительного постоянства среднесуточного отношения численности потомков к популяционной плодовитости или численности молоди, мигрирующей в море. При отсутствии соответствующих данных относительно постоянной принимали среднесуточную кратность воспроизводства (отношение численности потомков к численности родителей). Логика расчетов сводилась к умножению оцененной факторной переменной (численность родителей, популяционная плодовитость, численность покатной молоди) на среднесуточные значения соответствующих пересчетных коэффициентов. В некоторые годы значения факторных переменных предоставляли сотрудники Амурского филиала Главрыбвода (ранее — Амуррыбвод), а пересчетные коэффициенты при отсутствии оригинальных данных заимствовались из литературных источников.

Нельзя сказать, что экспертный уровень прогнозов не вызывал нареканий со стороны кураторов, поэтому во второй пятилетке стали внедрять методы прогнозирования на основе теоретических однофакторных моделей, с 2008 по 2010 г. модели были разработаны для 4 объектов прогнозирования, а в прогнозах запасов лососей на 2017 г. — для 9 основных объектов. Внедрению теоретических моделей для остальных районов (Аяно-Майский, Тугуро-Чумиканский районы, Амурский лиман) препятствовало прекращение исследований по причине сокращения числа сотрудников. В 2016 г. в лаборатории тихоокеанских лососей насчитывалось 8 человек, в Охотской лаборатории — 5, в разработке всех прогнозов участвовали 8 сотрудников (рис. 1).

Сокращение штата было связано с тем, что в Хабаровском крае нет учебных заведений для подготовки ихтиологов, а специалисты других регионов, поступившие в ХабаровскНИРО в прошлом веке по распределению, постепенно выходили на пенсию. Однако, несмотря на растущее несоответствие необходимых трудозатрат для полноценного выполнения требуемого объема работ реальному количеству сотрудников, разработка прогнозов оставалась посильной. Прогнозы имели характер технического документа «разового прочтения», поэтому допускалось произвольное изложение текста в соответствии с регламентированными разделами. Изложение прогнозов порой не отличалось изысканным стилем, с их разработкой справлялись инженерно-технические работники под руководством заведующих лабораториями. Судя по отчетам об итогах лососевых путин, ежегодно приводимых в настоящем сборнике трудов, гуру в области прогнозирования подходов тихоокеанских лососей не было и нет. «Вердикт» о корректности методов прогнозирования и прогнозов выносили коллегиальным решением заседания Дальневосточного лососевого совета, прогноз утверждали на заседании ученого совета ВНИРО, где его представляли либо сотрудники региональных институтов, либо кураторы. Порой спорные вопросы по поводу прогнозируемых объемов вылова устраняли в итоговых таблицах сразу после заседания ученого совета без внесения изменений в текст прогноза.

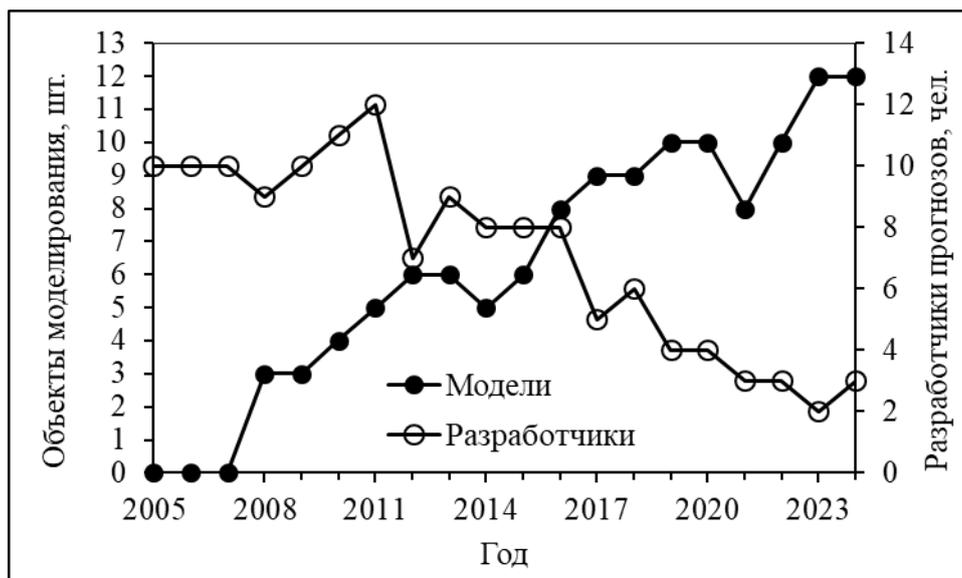


Рис. 1. Динамика численности сотрудников, принимавших непосредственное участие в разработке прогнозов и количества объектов прогнозирования с использованием математических моделей

Fig. 1. Dynamics of the number of employees directly involved in forecasting and the number of objects for forecasting with numerical models

Упразднение Дальневосточного лососёвого совета (последнее заседание было в 2018 г.) преобразило роль кураторов — вместо посредников между исполнителями прогнозов и заказчиком они стали выполнять функцию научного наставника, рецензента, научного и технического редактора в одном лице. Отчасти переформатирование их деятельности объяснимо возросшей ответственностью за соблюдение обновлённых регламентов, рекомендаций, усложненных правил оформления документов, которые стали сопоставимыми с правилами редакций научных журналов, но прогнозы разрабатываются в сжатые сроки ограниченным и постепенно сокращающимся штатом как сотрудников лабораторий, так и непосредственных разработчиков прогнозов. Переписка, корректировка, согласование текстов с кураторами затягивается на несколько месяцев, как правило, существенно не влияя ни на прогнозируемый объём вылова, ни на оправдываемость прогнозов, но значительно сокращая время, которое могло быть использовано на исследование закономерностей воспроизводства лососей.

Полагаем, что именно возросшие требования к видимой стороне качества прогнозов ускорили сокращение численности прогнозистов. Для продолжения исследований в более значимых для промысла районах Хабаровского края в них направлялись сотрудники из менее значимых районов, в 2017 г., под угрозой прекращения исследований в подзоне Приморье, ответственность за разработку прогнозов «в нагрузку» была возложена на Советско-Гаванскую лабораторию, созданную для исследования прибрежных морских видов животных и растений. В штате лаборатории насчитывалось шесть человек, в настоящее время их осталось двое, столько же и в Охотской лаборатории, причем участие в исследовании лососей сотрудников обеих лабораторий ограничивается сбором первичных данных, все лососевые прогнозы на 2023 г. разрабатывали два сотрудника, на 2024 г. — три (рис. 1).

Внедрение методов прогнозирования, основанных на однофакторных теоретических моделях «родители–потомки», предполагало реализацию возможности «всестороннего аналитического оценивания» результатов прогнозирования, разработку научно-обоснованных «ориентиров управления промыслом», долгосрочных прогнозов, однако опыт их применения не оправдал ожиданий, по-прежнему требовались постоянные корректировки прогнозов в ходе путин. Так, например, в период роста запасов осенней амурской кеты прогнозы обычно были заниженными, требовалась их корректировка в большую сторону, в период уменьшения — завышенными, регулярно вводились меры ограничения вылова.

При анализе остатков однофакторных моделей было установлено, что в отклонениях запаса амурской осенней кеты от прогнозных значений выявляется отчетливый временной тренд, который может быть объяснен только направленной изменчивостью условий воспроизводства, влияющих на выживаемость потомства [Островский и др., 2022]. Причина изменчивости выживаемости неизвестна, но вполне очевидно, что объективность её наличия должна учитываться в прогнозах. Впервые попытка реализовать эту идею в Хабаровском крае была предпринята в прогнозе вылова кеты Охотского района на 2021 г. [Островский, Пономарёв, 2020]. В прогнозе использовались методы пошагового нелинейного регрессионного анализа в сочетании с методами анализа временных рядов [Дуброва, 2003]. В прогнозе на 2022 г. такие методы применили к прогнозам запасов приморской [Островский, Козлова, 2023а] и охотоморской горбуши, осенней амурской кеты [Островский и др., 2022] и кеты Сахалинского залива. Уверенность в большей надежности этих прогнозов основана на увеличении доли дисперсии численности потомков, объясняемой совместным влиянием численности родителей и направленной изменчивости условий воспроизводства.

Модели, включающие обе факторные переменные, лучше имитировали реальную динамику численности потомков, чем однофакторные модели, что позволяло надеяться на лучшую оправданность прогнозов, но каждая составляющая таких моделей описывалась гладкими кривыми, поэтому не избавляла от проблемы выбросов. Для её решения необходимо было из множества погодноклиматических факторов вычлнить те, изменчивость которых коррелирует с отклонениями от зависимости «родители–потомки». Такая цель впервые была достигнута на примере кеты Охотского района [Островский, 2022], было показано, что синусоидальный тренд межгодовой изменчивости численности потомков полностью исчезает после включения в модель конкретных метеорологических факторов, действующих в пресноводный период жизни. Построенная модель хорошо объясняет причину «аномально» большой численности поколения кеты Охотского района 2005 г. С использованием аналогичного подхода были установлены наиболее вероятные причины необъяснимых однофакторными и двухфакторными моделями отклонений прогнозов численности потомков амурской [Островский, 2023] и приморской [Островский, Козлова, 2023б] горбуши.

Опыт, полученный в ходе разработки многофакторных моделей, учитывающих изменчивость параметров среды, использован в прогнозе на 2023 г. для охотоморской и приморской горбуши, кижуча Охотского района, кеты Охотского района и Сахалинского залива, а в прогнозе вылова на 2024 г. для всех объектов прогнозирования, для которых имелись валидные данные. Он был положительно воспринят сотрудниками СахНИРО и используется ими в прогнозах вылова горбуши.

Сравним результаты описания динамики численности потомков лососей в Хабаровском крае однофакторными (нечетные номера, как правило, уравнение Рикера) и многофакторными (четные номера) моделями отдельно по объектам прогнозирования (табл. 1). Во всех уравнениях численность родителей обозначена R (млн рыб), численность потомков — R (млн рыб), за исключением уравнений (11) и (12), в которых описывается связь уловов амурской горбуши в год нереста родителей (CR , тыс. т) с уловами потомков (CR , тыс. т), и уравнений 17 и 18, в которых численность родителей и потомков приведена в тысячах рыб. Факторные переменные, характеризующие количество осадков, измерялись в миллиметрах, температура воздуха в °С. Названия объектов прогнозирования и результаты дисперсионного анализа уравнений приведены в табл. 2.

Краткое описание объектов прогнозирования и переменных в уравнениях, приведенных в табл. 1.

Горбуша Северо-Охотоморской подзоны (уравнения (1) и (2)). В начале текущего века была предпринята попытка отдельного прогнозирования численности потомков горбуши для четырех подрайонов — Охотского, Аяно-Майского, Тугуро-Чумиканского и Николаевского (Сахалинский залив) муниципальных районов. Полагая, что улов горбуши в этих районах частично состоит из транзитных рыб [Островский, 2018], прогнозы стали разрабатывать для Северо-Охотоморской подзоны в

целом (здесь и далее — в границах Хабаровского края). Зависимость численности потомков от численности родителей описывается уравнением Рикера (1). В уравнении (2) факторная переменная M2 соответствует сумме максимального количества осадков, выпадавших за одни сутки в августе и сентябре в год нереста, переменная T — средней температуре воздуха в июле и августе в год миграции потомков в море (метеостанция пос. Охотск).

Таблица 1

Уравнения зависимости численности потомков тихоокеанских лососей (R, млн рыб) от численности родителей (P, млн рыб) и изменчивости погодных факторов в пресноводный период жизни (пояснения в тексте)

Table 1

Equations describing dependence of the number of progeny (R, 10⁶ ind.) on the number of parents (P, 10⁶ ind.) and weather factors in freshwater period of their life for pacific salmon (see explanation in the text)

Уравнение, №	Уравнение
(1)	$R = 5,924 \cdot P \cdot \exp(-P/5,799)$
(2)	$R = 10,442 \cdot P \cdot \exp(-P/5,942 - 0,019 \cdot M2 + ((T-13,650)/0,833)^2)$
(3)	$R = 3,388 \cdot P \cdot \exp(-P/3,587)$
(4)	$R = 11,507 \cdot P \cdot \exp(-P/3,953 - (((O4-44,672)/154,897)^2)) \cdot O10^{-0,246} \cdot O5^{-0,171} \cdot O6^{0,152}$
(5)	$R = 8,164 \cdot P \cdot \exp(-P/0,048)$
(6)	$R = 3,776 \cdot P \cdot \exp(0,111 \cdot T - P/0,042)$
(7)	$R = 11,154 \cdot P \cdot \exp(-P/0,08)$
(8)	$R = 17,770 \cdot P \cdot \exp(-P/0,074 - 0,010 \cdot M + ((T8-13,812)/1,802)^2)$
(9)	–
(10)	$R = 97,912 \cdot P \cdot \exp(0,0171 \cdot T12 - ((M9-50,155)/50,155)^2 - P/0,317) \cdot T10^{-0,534} \cdot M3^{0,199}$
(11)	$CR = 1,784 \cdot CP^{0,631}$
(12)	$CR = 0,103 \cdot CP^{0,949} \cdot \exp(0,041 \cdot O)$
(13)	$R = 3,181 \cdot P \cdot \exp(-P/10,970)$
(14)	$R = 0,602 \cdot P \cdot \exp(-P/9,395 + 0,006 \cdot O + 0,309 \cdot T)$
(15)	$R = 9,821 \cdot P \cdot \exp(-P/3,864)$
(16)	$R = 1,561 \cdot P \cdot \exp(0,575 \cdot T - P/4,820)$
(17)	$R = 5,782 \cdot P \cdot \exp(-P/3455,263)$
(18)	$R = 1,753 \cdot P \cdot \exp(-P/3595,955 + O \cdot 0,009 + ((T5-6,577)/2,413)^2 + ((T12-1,686)/0,883)^2)$

Кета Охотского района (уравнения (3) и (4)). В уравнении (4) переменная O4 — суммарное количество осадков в марте и апреле в год нереста и в год миграции молоди в море, O10 — суммарное количество осадков, выпавших в сентябре и октябре в год нереста, O5 — количество осадков в мае в год нереста, O6 — количество осадков в июле в год нереста по метеостанции пос. Охотск [Островский, 2022],

Нерка (уравнения (5) и (6)). Воспроизводится и осваивается в промышленных масштабах в Охотском районе. Переменная T (уравнение (6)) — сумма средних температур воздуха в феврале на первом и втором году жизни (метеостанция пос. Охотск).

Кижуч (уравнения (7) и (8)). Кижуч, как и нерка, в промышленных масштабах осваивается промыслом в Охотском районе. Кроме численности родителей численность потомков связана с изменчивостью суммы максимальных значений суточных осадков в апреле и августе в год выклева личинок (уравнение (8), фактор M), а также с изменчивостью температуры воздуха (фактор T) в августе в год нереста по метеостанции пос. Охотск.

Кета Сахалинского залива (Николаевский район, уравнение (10)). Описать зависимость численности потомков кеты Сахалинского залива от численности родителей однофакторным уравнением (9) не удастся, линия тренда точечной диаграммы «родители–потомки» имеет U-образный вид (при

сглаживании полиномом второй степени). Типичный для кривой Рикера вид линии тренда слабо прослеживается лишь после устранения влияния на зависимую переменную метеорологических факторов, из числа которых численность потомков наиболее тесно связана с изменчивостью средней температуры воздуха (данные ближайшего метеорологического пункта пос. Литке) в декабре в год нереста (Т12) (рис. 2). Кроме того, в уравнение включены факторы Т10 (средняя температура воздуха в октябре в год нереста), М9 (максимальное количество осадков, выпадавших за 1 сут в сентябре в год нереста) и М3 (максимальное количество осадков, выпадавших за 1 сут в марте в год миграции молоди в море).

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа уравнений (1)–(18) (табл. 1) и имитации прогноза численности потомков*

Table 2

Results of variance analysis of Equations (1)–(18) at Table 1 and simulated forecast of the number of progeny

Район	Вид	Уравнение, №	N	R ² _c	p1	«Прогноз»			
						n	r	p2	W, %
СОМ	Горбуша	(1)	16	0,219	> 0,05	8	0,264	> 0,05	47,6
СОМ	Горбуша	(2)	16	0,918	< 0,000	8	0,958	< 0,001	14,3
Охотский	Кета	(3)	38	0,301	< 0,000	19	0,575	< 0,05	25,1
Охотский	Кета	(4)	38	0,840	< 0,000	19	0,952	< 0,001	10,7
Охотский	Нерка	(5)	15	0,118	> 0,05	7	0,422	> 0,05	31,5
Охотский	Нерка	(6)	15	0,843	< 0,000	7	0,929	< 0,01	11,9
Охотский	Кижуч	(7)	16	0,403	< 0,001	8	0,906	< 0,01	16,4
Охотский	Кижуч	(8)	16	0,924	< 0,000	8	0,98	< 0,001	5,9
Николаевский	Кета	(9)	24	–		12	–		
Николаевский	Кета	(10)	24	0,865	< 0,000	12	0,948	< 0,001	11,1
Р. Амур	Горбуша	(11)	39	0,373	< 0,000	18	0,871	< 0,001	34,5
Р. Амур	Горбуша	(12)	39	0,922	< 0,000	18	0,983	< 0,002	20,6
Р. Амур	Кета летняя	(13)	13	0,324	< 0,05	6	0,674	> 0,05	134,2
Р. Амур	Кета летняя	(14)	13	0,851	< 0,001	6	0,949	< 0,01	42,6
Р. Амур	Кета осенняя	(15)	13	0,201	> 0,05	6	0,461	> 0,05	63,4
Р. Амур	Кета осенняя	(16)	13	0,935	< 0,000	6	0,973	< 0,001	13,6
Приморье	Горбуша	(17)	26	0,425	< 0,000	13	0,625	< 0,05	65,8
Приморье	Горбуша	(18)	26	0,847	< 0,000	13	0,97	< 0,001	26,8

* N — объём выборок при построении моделей, приведенных в табл. 1, R²_c — скорректированный коэффициент детерминации, p1 — уровень статистической значимости уравнений, n — объём тестовой (контрольной) выборки, r — парный коэффициент корреляции Пирсона между «прогнозной» и фактической численностью потомков, p2 — уровень статистической значимости коэффициента корреляции, W — взвешенная абсолютная ошибка «прогнозирования», СОМ — Северо-Охотоморская подзона.

Амурская горбуша (уравнения (11) и (12)). Численность родителей и потомков горбуши не известна. Принимая её вылов в качестве косвенной меры запаса, сопоставляли уловы в год нереста родителей (СР) с уловами через два года (СR), когда на нерест возвращаются потомки. Кроме факторной переменной СР, улов положительно коррелирует с количеством осадков в июне, октябре, ноябре и декабре в год нереста, а также в апреле в год миграции молоди в море. В качестве факторной переменной, характеризующей изменчивость количества осадков (О), использовали среднее их значение в указанных месяцах [Островский, 2023]. В настоящее время центр воспроизводства амурских лососей смещен в нижние притоки Амура. По этой причине сведения по погодным факторам, на фоне которых воспроизводились амурские лососи, брались по метеостанции г. Николаевск-на-Амуре.

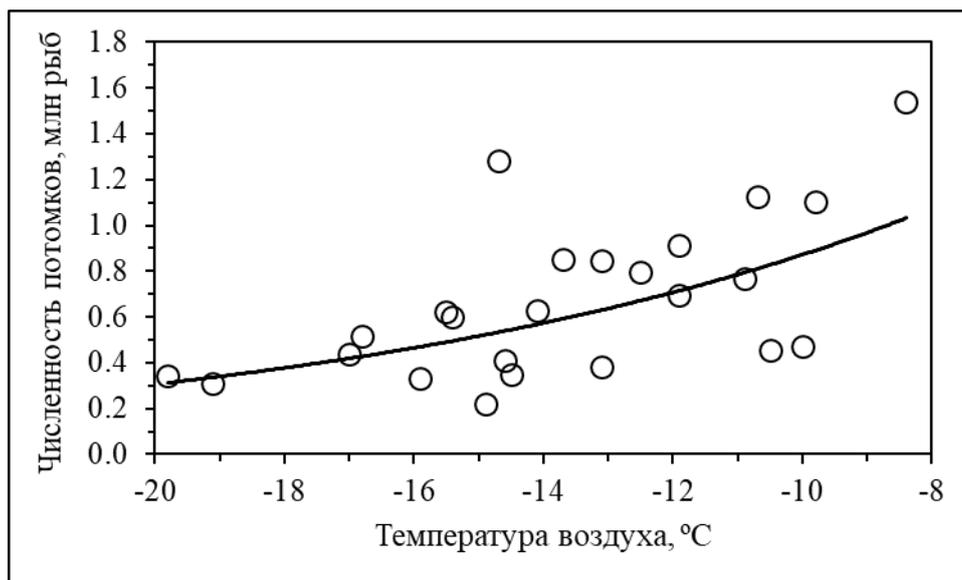


Рис. 2. Зависимость численности потомков кеты Сахалинского залива от температуры воздуха в декабре по метеостанции пос. Литке в год нереста

Fig. 2. Number of chum salmon progeny in the Sakhalin Bay in dependence on air temperature at Litke weather station in December of spawning years

Летняя амурская кета (уравнения (13) и (14)). Кроме численности родителей численность потомков летней кеты статистически связана со средним значением количества осадков за два смежных года — в год нереста и в год покатной миграции (O), а также с температурой воздуха в октябре в год нереста (переменная T).

Осенняя амурская кета (уравнения (15) и (16)). Связь численности потомков с численностью родителей слабая, она четче проявляется после исключения влияния на численность потомков температуры воздуха в июне в год покатной миграции, в июне и сентябре в год нереста, значения факторной переменной (T) рассчитаны как среднее значение температур в указанных месяцах.

Приморская горбуша (в границах Хабаровского края, уравнения (17) и (18)). Численность потомков зависит не только от численности родителей, но и от условий среды, в частности — от суммарного количества осадков в январе и феврале в год выклева личинок (переменная O). Кроме количества осадков, изменчивость численности поколений горбуши статистически связана ещё с двумя факторами — со среднегодовой температурой воздуха в год нереста (T12) и в мае в год покатной миграции (T5) по метеорологическому пункту пос. Советская Гавань [Островский, Козлова, 2023б].

Статистически значимые связи, выявляемые в пошаговом регрессионном анализе, свидетельствуют лишь о её наличии, а не о причинах формирования связей. В некоторых случаях на возможные механизмы формирования связей указывают литературные данные, свидетельствующие о влиянии температуры воздуха и, соответственно, воды на темп роста молоди и на её выживаемость в зависимости от размеров тела, о связи высоты снежного покрова и зимней температуры воздуха с урожайностью поколений, о влиянии паводков на смертность личинок. С.М. Коновалов [1985], анализируя литературные источники, насчитывал более 30 факторных переменных, способных влиять на численность популяций тихоокеанских лососей, и полагал, что сочетания градаций таких переменных могут приводить к формированию сотен вариантов воздействия, что усложняет их выявление и классификацию по степени влияния на численность популяций.

Задача вычленения факторов, потенциально способных влиять на численность потомков, действительно сложная, но разрешимая. Приведенные нами результаты свидетельствуют о том, при использовании однофакторных моделей для всех объектов прогнозирования характерна слабая связь численности потомков с численностью родителей либо её отсутствие. Об этом можно судить по ма-

лым значениям скорректированных коэффициентов детерминации уравнений с нечетными порядковыми номерами и по значениям уровней статистической значимости (табл. 2). Многофакторные модели значительно улучшают качество описания динамики численности потомков, что предполагает предпочтение их использования в практическом прогнозировании. Однако априорная оценка надежности прогнозов, основанная на сравнении результатов дисперсионного анализа однофакторных и многофакторных моделей (табл. 1 и 2), может отличаться от апостериорной, связанной с несовершенством моделей, в том числе и по причине неизвестных ошибок измерений.

Для апостериорной оценки надежности прогнозов не обязательно ждать несколько лет, задача решается методами имитационного моделирования. С этой целью разделили исходный временной ряд на два временных отрезка — обучающий и контрольный («прогнозируемый»), подобрали значения коэффициентов моделей к обучающей выборке, симутировали прогноз численности следующего поколения. Пошагово включая в модель данные последующих лет уточняли значения коэффициентов и рассчитывали численность потомков. Так для каждого объекта прогнозирования получили ряды «прогнозируемых» значений численности потомков, полностью идентичные результатам реального прогнозирования при условии использования в прошлом однофакторных и многофакторных моделей, приведенных в табл. 1. Точность «прогнозов» оценивали по взвешенной абсолютной процентной ошибке (W , отношение суммы абсолютных значений разностей «факт–прогноз» к сумме всех фактических значений численности потомков за период «прогнозирования», $WAPE$) (табл. 2).

Среднее арифметическое значение коэффициентов парной корреляции Пирсона между «прогнозируемой» и фактической численностью потомков при использовании однофакторных моделей (нечетные номера уравнений в табл. 2) равно 0,60, для 4 из 9 объектов прогнозирования значения этого коэффициента статистически не значимы, для одного случая связь «родители–потомки» не описывается уравнением Рикера. Среднее арифметическое значение взвешенных ошибок прогнозирования однофакторных моделей превышает 52 %. Из этого следует, что практически все однофакторные модели фактически непригодны как для краткосрочного, так и для долгосрочного прогнозирования. Более-менее удовлетворительные результаты описания динамики численности потомков можно получить лишь на относительно коротких специально отобранных временных отрезках либо исключением из анализа «плохих» точек.

Использование в прогнозировании многофакторных моделей (четные номера уравнений, табл. 2) имеет явные преимущества перед однофакторными — среднее значение коэффициентов корреляции рядов «прогноз–факт» многофакторных моделей равно 0,96, средняя ошибка — 18,3 %. Рассмотрим последний критерий на примере динамики «прогнозируемой» и фактической численности потомков амурской летней кеты (рис. 3) с использованием однофакторного (13) и многофакторного уравнения (14).

Как пики, так и провалы в динамике численности амурской летней кеты не объяснимы уравнением Рикера (рис. 3, уравнение (13)), без учета влияния изменчивости погодных факторов оно «схватывает» лишь общую тенденцию уменьшения численности потомков, связанную с уменьшением численности родителей. Несмотря на очевидное (рис. 3) сходство «прогнозной» и фактической численности потомков, рассчитанной по уравнению (14), высокую и с вероятностью более 99 % статистически значимую корреляцию «прогнозной» и фактической численности потомков (табл. 2), взвешенная абсолютная ошибка для этого объекта прогнозирования самая большая (42,6 %) из числа многофакторных уравнений (табл. 2). При заданной точности модели ≤ 20 % (по крайней мере при ошибке прогноза вылова более 20 % на административном уровне обычно требуются объяснения причин больших отклонений прогноза) можно сделать вывод о неадекватности модели. Еще большее несоответствие демонстрируют абсолютные ошибки «прогноза» (модуль остатка, отнесенный к фактическому значению) за отдельные годы контрольного периода — они варьируют в пределах 21,3–129,7 % (рис. 4).

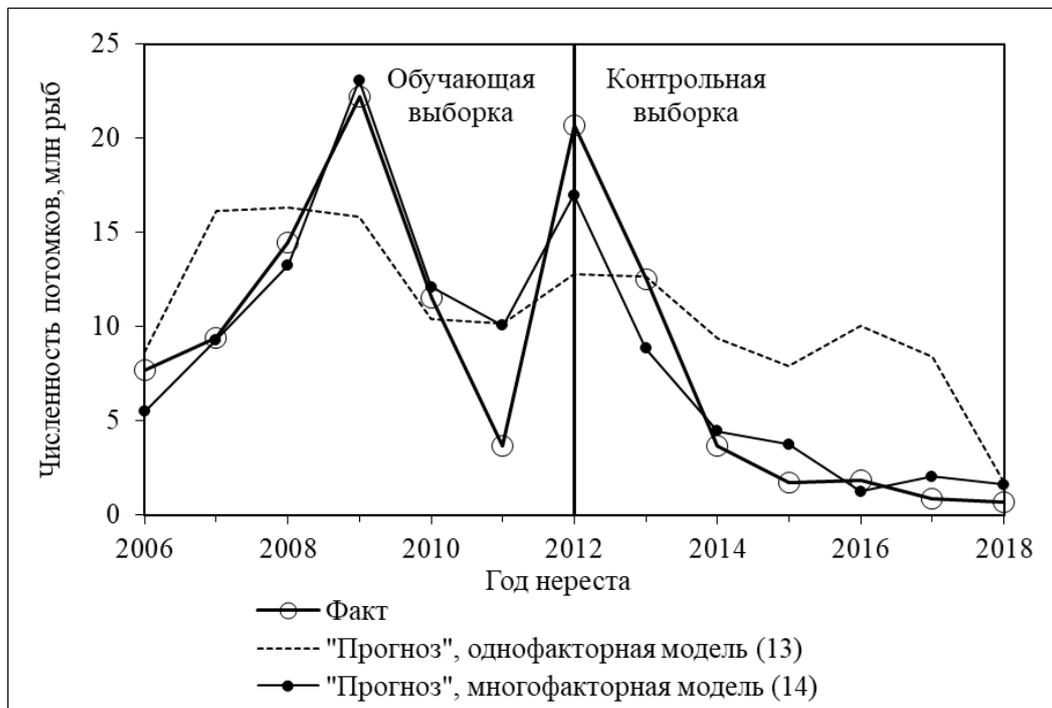


Рис. 3. Динамика фактической и «прогнозируемой» по уравнениям (13) и (14) численности потомков летней амурской кеты, пояснения в тексте

Fig. 3. Dynamics of the progeny number predicted using Equations (13) and (14) compared to actual values for summer Amur chum salmon (see explanation in the text)

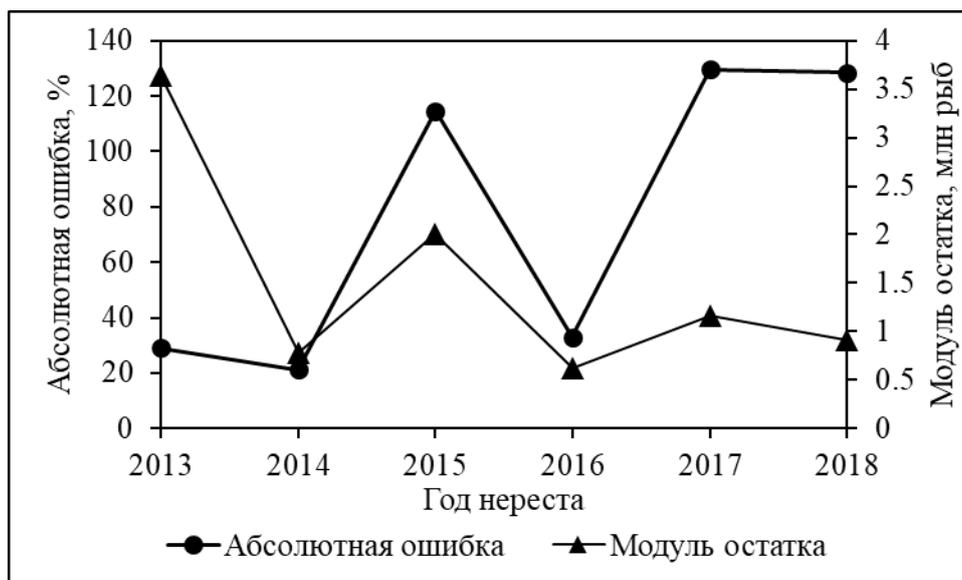


Рис. 4. Абсолютные значения разности фактической и «прогнозируемой» по уравнению (14) численности потомков летней кеты и ошибки «прогноза»

Fig. 4. Absolute values of the difference between the actual and predicted with Equation (14) number of progeny for summer chum salmon and errors of the forecast

Среднее арифметическое значение абсолютных ошибок «прогноза» за разные годы (MAPE) для рассматриваемого объекта равно 76 %, наибольший вклад в величину данного показателя вносят ошибки за те годы, в которых модуль остатка (абсолютное значение разности «прогноз–факт») относительно мал (например, 2017–2018 гг., рис. 4), а вклад лет с гораздо большим модулем остатка (например, 2013 г.) значительно меньше. Частично диспропорция между разностью «прогноз–факт» и ошибкой прогноза устраняется оценкой взвешенной ошибки, она уменьшается до 42,6 % (табл. 2), но полностью не исчезает.

На наш взгляд, более наглядно степень расхождения прогнозных и фактических значений модели отражает разность «прогноз-факт» в процентах от исторического максимума фактической численности потомков. Исторический максимум задаёт вероятностное поле событий, прогноз в процентах от максимума может занимать любое значение, в том числе и превышать максимум, абсолютная разность прогноза и факта, выраженных в процентах от максимума, соответствует ошибке прогноза, которую условно назовем ординатной.

Ординатная ошибка (рис. 5) задаёт приоритет в оценке отклонения теоретически возможному значению, оцененному на основе исторического опыта. Среднее арифметическое значение ординатной ошибки «прогноза» обучающей выборки равно 9,7 %, контрольной — 6,9 %, её величина за все годы прямо пропорциональна разности прогноза и факта по модулю, в отличие от общепринятых мер ошибок, она не создает диссонанса между очевидной (см. рис. 3) и расчетной (рис. 4) мерой расхождения прогноза и факта. Полагаем, что такой способ расчёта будет удобен для сравнения точности прогнозов различных объектов прогнозирования независимо от масштабов их фактической численности.

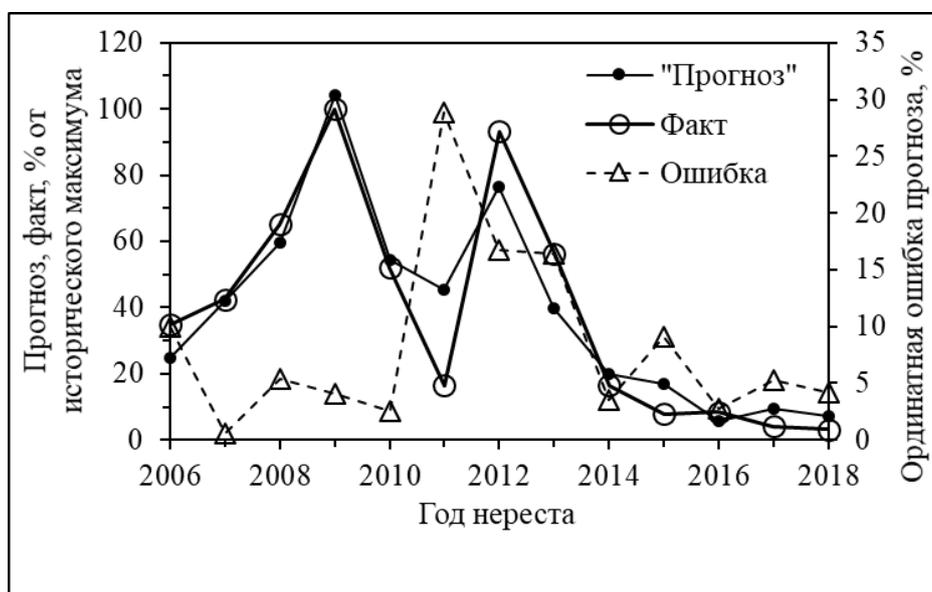


Рис. 5. Динамика фактической и «прогнозируемой по уравнению (14) численности потомков и ординатной ошибки прогноза, пояснение в тексте

Fig 5. Dynamics of the progeny number predicted using Equation (14) compared to actual values, with ordinate errors of the forecast (see explanation in the text)

Внешние факторы, влияющие на численность поколений лососей, непрерывно изменяются, одни со временем стабилизируются, их роль в формировании численности поколений ослабевает, изменчивость других и их влияние на численность увеличивается, поэтому модели нуждаются в постоянной корректировке как по перечню вовлеченных в описание факторов, так и по значениям коэффициентов. Согласно существующим регламентам разработки прогнозов, прогнозируемая величина вылова задаётся точно и часто отождествляется с точным прогнозом, в то время как в действительности прогноз имеет вероятностный характер, по определению он разрабатывается тогда, когда точные расчеты невозможны. Это не означает, что фактическая численность потомков не может в точности совпасть с прогнозируемым значением, но требование такого события можно сравнить с требованием совпадения размера первой рыбы в улове со средним размером рыб в популяции. Как справедливо считали Б.Н. Котенёв с соавторами [2006] — совпадение прогноза и факта либо случайность, либо результат манипулирования данными.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что изменчивость численности потомков удовлетворительно объяснима влиянием численности родителей и погодных факторов, действующих

в пресноводный период жизни, но вполне очевидно, что оправдываемость прогнозов не удастся существенно улучшить без надежных оценок входных данных, в том числе и метеорологических. Вероятно, качество моделей можно улучшить при наличии расширенного перечня гидрометеорологических факторов, измерения которых приближены к местам размножения конкретных самовоспроизводящихся группировок лососей. Однако полагаем, что глобальные перестройки климата приводят к корреляции значений факторов, характеризующих погоду на обширной территории. По крайней мере об этом свидетельствует сходство моделей динамики численности горбуши северной (табл. 1, уравнение (18)) и южной [Островский, Лысенко, наст. бюл.] частей подзоны Приморье, для которых использованы данные разных метеорологических пунктов, а также удовлетворительное качество модели для горбуши всей Северо-Охотоморской подзоны по данным единственной метеостанции.

Доверительный интервал среднего прогнозного значения может превышать 20 % от прогнозируемой величины, и уменьшить его невозможно без увеличения точности оценки численности родителей и потомков, чему не способствует сокращение штата сотрудников. При построении моделей значения коэффициентов уравнений подгоняются под оценки факторных переменных, которые не всегда надежны, поэтому даже детерминация модели, близкая к 1, не спасает от больших ошибок прогнозов. Так, например, согласно прогнозу подхода приморской горбуши на 2023 г., основанному на двухфакторной модели $R(P, O)$, где O — количество зимних осадков, при численности родителей, оцененной в 2021 г. в 0,1 млн рыб, в 2023 г. ожидался возврат менее 0,5 млн рыб, который по факту составил около 3,5 млн рыб, т.е. при соотношении полов, близком 1 : 1, для обеспечения такого возврата половозрелое потомство одной самки должно было составить около 70 рыб. Такая эффективность воспроизводства абсолютно нереальна, поэтому можно быть уверенным в сильно заниженной оценке численности родителей.

Из-за дефицита специалистов численность родителей и потомков вынужденно оценивается выборочным методом — численность рыб, пропущенных на нерестилища, учитывается на ограниченных участках контрольных рек с последующей экстраполяцией на все нерестилища реки, затем на нерестилища прочих рек района. Метод основан на предположении одинаковой плотности рыб во всех реках района прогнозирования и, соответственно, прямой пропорциональности численности рыб площадям нерестилищ в разных реках, хотя хорошо известно, что, например, приморская горбуша в последние годы воспроизводится в основном в реках южной части района прогнозирования, при этом нерестовые реки северной части практически пусты.

Причина ошибок оценки численности родителей может быть связана и с разницей численности рыб, пропущенных на нерестилища, и численности отнерестившихся рыб, уменьшающейся вследствие как влияния хищников, так и ННН-промысла. Кроме того, точность учета зависит от времени посещения нерестилищ — в начале нереста численность рыб на нерестилищах постепенно увеличивается, в конце уменьшается. Динамика заполнения нерестилищ в разные годы различается, она зависит как от погоды, так и от изменчивой структуры стада [Островский, 1985], поэтому заранее определить оптимальное время проведения учетных работ с заданной точностью вряд ли реально, хотя количество отнерестившихся рыб можно оценить по количеству нерестовых бугров, они хорошо видны на снимках беспилотных летательных аппаратов. Данный метод внедряется в ХабаровскНИРО, но пока не избавляет от проблемы экстраполяции из-за дефицита кадров.

В прошлом веке «всеобщего финансового равенства» профессию выбирали по интересам, в текущем — в основном по доходности. Вероятно, уровень оплаты труда ихтиологов перестал соответствовать трудозатратам, перевод научных сотрудников в разряд специалистов уменьшил не только размер их заработной платы, но и надежду на реализацию научных амбиций. Научные школы ведомственных институтов деградируют и вряд ли в ближайшие годы стоит ожидать появления учёных, по авторитету сопоставимых с корифеями изучения лососей прошлого века — И.Б. Бирманом, О.Ф. Гриценко, С.М. Коноваловым, В.Л. Костаревым, Ф.В. Крогиус, В.Я. Леванидовым и др. Таким образом, проблема повышения надежности прогнозов без решения кадрового вопроса вряд ли устранима.

Заключение

В текущем веке методы прогнозирования численности потомков тихоокеанских лососей в Хабаровском крае претерпели существенные изменения — в начале века они носили экспертный характер, позже их заменили классические аналитические модели, которые впоследствии были дополнены трендовой составляющей динамики численности. В настоящее время принципиально возможно усложнение моделей за счет их дополнения метеорологическими факторами в пресноводный период жизни. Такие модели лучше описывают динамику численности потомков по сравнению с предыдущими вариантами и подтверждают первостепенную роль пресноводного периода в формировании численности поколений. Во многих рассмотренных случаях погодные факторы пресноводного периода сильнее влияли на численность потомков, чем родителей. Из чего следует принципиальная невозможность разработки долгосрочных прогнозов. Результаты имитационного моделирования подтверждают преимущество многофакторных моделей в прогнозировании численности поколений лососей — увеличивается доля дисперсии численности потомков, объясненная влиянием факторных переменных, уменьшается ошибка прогноза, однако сокращающийся штат квалифицированных кадров не вселяет оптимизма по поводу перспектив повышения надежности прогнозов.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Выражаю глубокую признательность всем сотрудникам ХабаровскНИРО, принявшим участие в сборе первичных данных, камеральной обработке и разработке прогнозов численности лососей в Хабаровском крае.

The author is deeply grateful to all colleagues in KhabarovskNIRO who took part in collection of primary data, desk processing, and forecasting the salmon abundance in Khabarovsk Region.

Финансирование работы (FUNDING)

Работа выполнена в рамках программы научно-исследовательских работ ХабаровскВНИРО.
The study was conducted in the framework of research program of the KhabarovskNIRO.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Работа проведена без непосредственного контакта с рыбами в качестве объекта исследования. Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

The study was performed without direct contact with fish as an object of investigations. The author declares that he has no conflict of interest.

Список литературы

- Глубоковский М.К., Марченко С.Л., Темных О.С., Шевляков Е.А. Методические рекомендации по исследованию тихоокеанских лососей. — М. : ВНИРО, 2017. — 79 с.
- Дрейпер Н.Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ : моногр. — М. : Издат. дом «Вильямс», 2007. — 912 с. (Пер. с англ.)
- Дуброва Т.А. Статистические методы прогнозирования : учеб. пособие для вузов. — М. : Юнити-Дана, 2003. — 206 с.
- Коновалов С.М. Факторы, лимитирующие численность и биомассу тихоокеанских лососей // Биологические исследования лососевых. — Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1985. — С. 5–25.
- Котенев Б.Н., Гриценко О.Ф., Кловач Н.В. Об организации промысла тихоокеанских лососей. — М. : ВНИРО, 2006. — 32 с.
- Максименко В.П., Антонов Н.П. Количественные методы оценки рыбных запасов : моногр. — Петропавловск-Камчатский : КамчатНИРО, 2003. — 256 с.
- Островский В.И. Динамика захода нерки *Oncorhynchus nerka* (Walb.) озера Азабачьего на нерестилища и биологическая структура субизолятов в репродуктивный период // Биологические исследования лососевых. — Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1985. — С. 26–35.

Островский В.И. Закономерности воспроизводства горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* р. Иска // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 194. — С. 54–67. DOI:10.26428/1606-9919-2018-194-54-67.

Островский В.И. Причины изменчивости урожайности поколений амурской горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 2. — С. 264–280. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-264-280.

Островский В.И. Факторы, определяющие численность поколений кеты *Oncorhynchus keta* в Охотском районе // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 4. — С. 810–827. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-810-827.

Островский В.И., Козлова Т.В. «Неблагодарная» горбуша. Случайность или закономерность? // Бюл. № 17 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2023а. — С. 152–158. DOI: 10.26428/losos_bull17-2023-152-158.

Островский В.И., Козлова Т.В. Закономерности воспроизводства горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* в реках материкового побережья Татарского пролива // Лососевые рыбы: биология, воспроизводство, промысел : мат-лы Всесрос. науч.-практ. конф. — Мурманск, 2023б. — С. 307–314.

Островский В.И., Лысенко А.В. Закономерности воспроизводства горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* материкового побережья Японского моря // Наст. бюл.

Островский В.И., Подорожнюк Е.В., Шмигирилов А.П. Закономерности воспроизводства осенней кеты (*Oncorhynchus keta*) реки Амур // Вопр. рыб-ва. — 2022. — Т. 23, № 4. — С. 44–56. DOI: 10.36038/0234-2774-2022-23-4-44-56.

Островский В.И., Пономарев А.С. Зависимость численности потомков кеты *Oncorhynchus keta* Охотского района от численности родителей и условий воспроизводства // Изв. ТИНРО. — 2020. — Т. 200, вып. 3. — С. 605–617. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-605-617.

Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики : пер. с англ. — М. : Финансы и статистика, 1982. — 344 с.

Поступила в редакцию 22.02.2024 г.

После доработки 28.02.2024 г.

Принята к публикации 29.03.2024 г.

*The article was submitted 22.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024;
accepted for publication 29.03.2024*