

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ВЫЛОВА ТИХООКЕАНСКИХ ЛОСОСЕЙ В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ БАССЕЙНЕ РОССИИ В 1948–2020 ГГ. И ИХ ПРОГНОЗ ДО 2028 Г.

© 2021 г. Г.В. Хен, Ю.Д. Сорокин, Ю.Г. Хен

*Тихоокеанский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО), г. Владивосток, 690091
E-mail: khen46@yandex.ru*

Поступила в редакцию 18.02.2021 г.

Проводится анализ динамики российского вылова горбуши, кеты и нерки в сравнении с изменением температуры воздуха над дальневосточным бассейном. С начала 1980-х гг. наблюдался синхронный рост температуры воздуха и вылова горбуши, кеты и нерки. В 2005–2019 гг. произошла стабилизация температуры воздуха. В этот период горбуша, кета и нерка достигли максимальных выловов. В последние годы наметился их спад. Особенно сильное падение выловов всех трех видов лососей произошло в 2020-м г., когда заметно понизилась температура воздуха. Выявлена хорошая связь между температурой и выловом лососей при 4-летнем пошаговом осреднении. Прогноз по модели ARIMA показывает, что в 2021–2024 гг. средняя температура воздуха составит 1,85 °С. Соответственно среднегодовой общий вылов лососей будет на уровне 300 тыс. т. В 2025–2028 гг. температура воздуха повысится до 1,95 °С, а вылов лососей может достигнуть 400 тыс. т в год.

Ключевые слова: дальневосточный бассейн, температура воздуха, российский вылов, горбуша, кета, нерка, синхронность, прогноз.

ВВЕДЕНИЕ

Тихоокеанские лососи — одни из самых ценных и востребованных объектов промысла на Дальнем Востоке. К ним приковано пристальное внимание со стороны рыбохозяйственной науки. Проводятся многочисленные исследования по разным аспектам их жизнедеятельности. Лососи занимают важное место в экосистеме северной части Тихого океана от субарктического фронтального раздела до арктических морей, и они, как и многие другие объекты промысла, подвержены заметным межгодовым изменениям, связанным как с внешними факторами, так внутрипопуляционными причинами. В качестве внешних факторов, влияющих на динамику лососей, в литературе встречаются до

13 различных гидрометеорологических характеристик (Шунтов и др., 2019), порой мало связанных между собой.

Часто в таких работах фигурирует температура воды, причем, как глобального (Котенев и др., 2015; Кровнин и др., 2010; Радченко, 2008), так и регионального (Ванюшин и др., 2015; Бугаев, Тепнин, 2015) масштаба. Но наиболее популярными стали различные климатические индексы (Фельдман, Шевляков, 2015; Kaeriyama, Urabe, 2018; Litzowa et al., 2020; Mantua et al., 1997 и др.) или даже их мультикомплексы (Бугаев и др., 2018). Некоторые из них были специально созданы для интерпретации изменчивости лососей (Beamish, Bouillon, 1993; Hare, Francis, 1995). Многие из этих работ вполне убедительны и дают опре-

деленные представления о природе сложившихся закономерностей многолетней динамики лососей в определенный временной цикл. За его пределами закономерности могут существенно измениться, что зачастую и происходит в природе, и возникает необходимость поиска новых аргументов. Не вдаваясь в подробности возникающих проблем, важно заметить, что подобные смены закономерностей происходят во многом из-за того, что связи между природными факторами и объектами рассматриваются излишне формально. Природно-физические параметры используются механически, зачастую просто подбирая наиболее значимые из них, не учитывая большие различия их пространственных масштабов с ареалом рыб. Иногда для увеличения значимости корреляционных коэффициентов проводится взаимное смещение рядов, без объяснения сути проводимых процедур, или же в аномалиях природных индексов не учитываются их математические знаки, что совсем нелепо. Определенную ценность могут представлять только выявленные совпадения многолетних трендов, хотя и здесь сложно понять природу таких явлений.

Следует остановиться на одной работе, имевшей в свое время большую популярность и многократно цитированной в статьях. Это монография Л.Б. Кляшторина и А.А. Любушина (2005). Авторы провели многофакторное исследование природных циклов на основе анализа глобальной температуры, атмосферных процессов, климатических индексов, были использованы даже палеоклиматические данные, с целью поиска доминирующего составляющего в многолетнем колебании. Было выявлено, что преобладающими являются волны периодичностью 60–70 лет. А так как, по мнению авторов, наблюдается

«сходство долгопериодной динамики численности ряда массовых пелагических рыб и изменений климата», то есть возможность долгосрочного прогнозирования промысловых запасов ряда массовых рыб. Взяв за основу 60-летнюю цикличность, авторы дали прогноз на постепенное уменьшение численности лососей в XXI столетии с минимумом в 2020 г.

В действительности уловы лососей с началом нового столетия резко возросли и в 2018 г. достигли своего максимума (Найденко и Темных, 2019; Шунтов и др., 2019), т.е. полностью опровергается прогноз вышеупомянутых авторов. Следует помнить, что любая природная цикличность проявляется на определенном климатическом временном отрезке, затем происходит ее резкая смена, чтобы опять возродиться по истечении некоторого, а точнее неопределенного срока. Наряду с основным циклом в спектре периодической флуктуации всегда присутствуют другие циклические составляющие. Некоторые из них могут вносить существенный вклад в результирующую гармонику. Дополнительную сложность вносят несоразмерность масштабов площадей используемых в исследованиях климатических показателей с ареалами биологических объектов. Разница может достигнуть одного-двух порядков, а иногда и более. Разумеется, глобальные процессы оказывают свое влияние на условия жизни морских объектов, но, скорее всего, это происходит на определенном отрезке времени или даже точечно, т.е. в течение одного-трех лет. Каждый такой случай следует исследовать отдельно, т.к. механизмы влияния могут сильно различаться.

В данной работе для анализа динамики численности тихоокеанских лососей используется температура воздуха над дальневосточным бассейном, где не-

рестятся и развиваются лососи, т.е. привлекалась региональная (местная) характеристика, которая, возможно, имеет более важное значение в понимании условий воспроизводства, обитания и выживания рыб, чем глобальные процессы. Дополнительно привлекались определенные климатические индексы, выбранные с учетом их связей с температурой воды в местах обитания лососей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Данные по температуре воздуха над дальневосточным бассейном (Та) были взяты с сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html>. Выборка данных производилась для области 42–60° с.ш., 135–170° в.д., где сосредоточены основные места воспроизводства, развития, нагула и промысла всех видов лососей России. По среднемесячным данным, представленным на сайте в узлах сетки 2,5×2,5°, были рассчитаны среднегодовые значения для всей области за период 1948–2020 гг. Последнее обновление включает данные за октябрь 2020 г. Чтобы рассчитать годовые значения в 2020 г. для ноября и декабря были проведены осреднения за 2010–2019 гг.

При выборе нужного временного интервала осреднения температуры следует учитывать большую амплитуду ее сезонных колебаний, перекрывающий размах межгодовых изменений, и муссонный климат региона с резкими полугодовыми переменами природных условий. Поэтому необходимо провести проверку наличия сезонных различий закономерностей многолетних колебаний. Было проведено сравнение температур при годовом и 6-месячном осреднении: холодного (ноябрь–апрель) и теплого (май–октябрь) полугодий. Коэффициенты корреляции R составили: при сравнении годовых осреднений с холодным по-

лугодием +0,79; при сравнении годовых осреднений с теплым полугодием +0,80. Корреляция достаточно высокая, и показывает их тесную связь, что дает основание использовать годовую температуру как универсальную временную характеристику, отражающую и сезонные условия.

Выборка данных по температуре воды на поверхности моря (ТПМ) сформирована на основе баз данных Японского метеорологического агентства (JMA), доступ к которым предоставлен в рамках международного проекта NEAR-GOOS (<https://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/rrtdb/jma-pro.html>) с иностранным разрешением 1x1°.

Значения климатических индексов были выбраны из популярного среди климатологов сайта <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>. Из множества глобальных и региональных индексов были выбраны следующие: Арктического колебания (АО), Эль-Ниньо/Южного колебания (ENSO), Тихоокеанского десятилетия колебания (PDO), Сибирского антициклона (SHI), Северо-Тихоокеанский (NPI), Западно-Тихоокеанский (WP). При этом был сделан выбор в пользу зимних индексов, осредненных за ноябрь–март, как наиболее информативных для характеристики природных процессов (Хен и др., 2019).

Данные по вылову лососей суммируются Северо-Тихоокеанской комиссией по анадромным рыбам (NPAFC) из информации, предоставляемых всеми странами комиссии в конце года и выставляемой на сайте <https://npafc.org/statistics> в середине следующего года. Статистика по вылову Россией включает данные с 1925 г. по настоящее время. Сведения по прогнозу и вылову горбуши за последние годы были предоставлены сотрудником ТИПРО В.А. Шевляковым. Вылов горбуши

США за 2020 г. был любезно предоставлен В.И. Радченко.

Прогноз Та методом интегрированной модели авторегрессии — скользящего среднего ARIMA (autoregressive moving average). ARIMA(p, d, q) состоит из следующих частей (Елисеева и др., 2006): AR (*autoregressive*) — регрессионная модель, которая использует зависимость между наблюдениями и число интегрированных наблюдений (p); I (*integrated*) — для обеспечения стационарности путем взятия разностей временного ряда (d); MA (*moving average*) — подход, анализирующий зависимость между наблюдениями и остатками при применении модели к интегрированным наблюдениям (q).

Комбинация AR и MA дает нам модель ARIMA порядка (p, q) и описывается формулой:

$$x_t = c + \sum_{i=1}^p \varphi_i x_{t-i} + a_t + \sum_{i=0}^q \theta_i a_{t-i},$$

где x_t — стационарная переменная; c — константа; φ_i — коэффициенты автокорреляции; a_t — белый шум с нулевым средним; θ_i — свободный член.

Порядок построения прогноза:

а) определение p, d, q для базовой модели;

б) тестирование базовой модели с оценкой ее качества с помощью пока-

зателя RMSE (Root Mean Square Error). Он измеряет разницу между истинным и предсказанным значением (Hyndman, Athanasopoulos, 2018);

в) тестирование моделей с различными параметрами (p, d, q) и нахождение модели с лучшим показателем RMSE;

г) прогноз с использованием модели ARIMA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Динамика вылова лососей в соответствии с изменением температуры воздуха над Дальневосточным бассейном

Прежде всего, определим наиболее информативный для тихоокеанских лососей России климатический параметр. Для этого проведем корреляционный анализ между численностью трех наиболее многочисленных видов лососей (горбуши, кеты и нерки) и упомянутыми выше природными характеристиками (климатическими индексами и Та) за период с 1948 г. (начало формирования базы Та) по 2020 г. (табл. 1). Динамика численности всех трех видов лососей наиболее тесно связаны с Та. С климатическими индексами лосося связаны слабо, за исключением WP, но по уровню значимости этот параметр заметно уступает Та.

Таблица 1. Корреляция между климатическими характеристиками и с суммарным подходом горбуши, нерки и кеты к побережьям России.

	Та	АО	ENSO	PDO	NPI	SHI	WP
Та	1	0,33	-0,26	-0,18	0,16	0,00	-0,14
Горбуша	0,48	0,22	-0,02	-0,15	0,15	0,01	0,42
Нерка	0,59	0,30	0,07	0,00	0,03	-0,07	0,36
Кета	0,63	0,16	-0,02	-0,12	0,18	0,14	0,22

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые ($R \geq 0,3$) связи при $p=0,01$. Подчеркнуты сильные связи.

Далее рассмотрим многолетний ход вылова трех видов лососей на фоне изменчивости T_a (левая панель на рис. 1). Значимые связи лососей и T_a (табл. 1) в основном образуются за счет вклада трендовых оставляющих. При их вы-

лении связи становятся слабыми не превышающими 0,3. Обратимся к полиномиальному тренду 4-й степени, показывающему не прямую линию, а параболическую кривую с длительными спадами и подъемами. Полиномиаль-

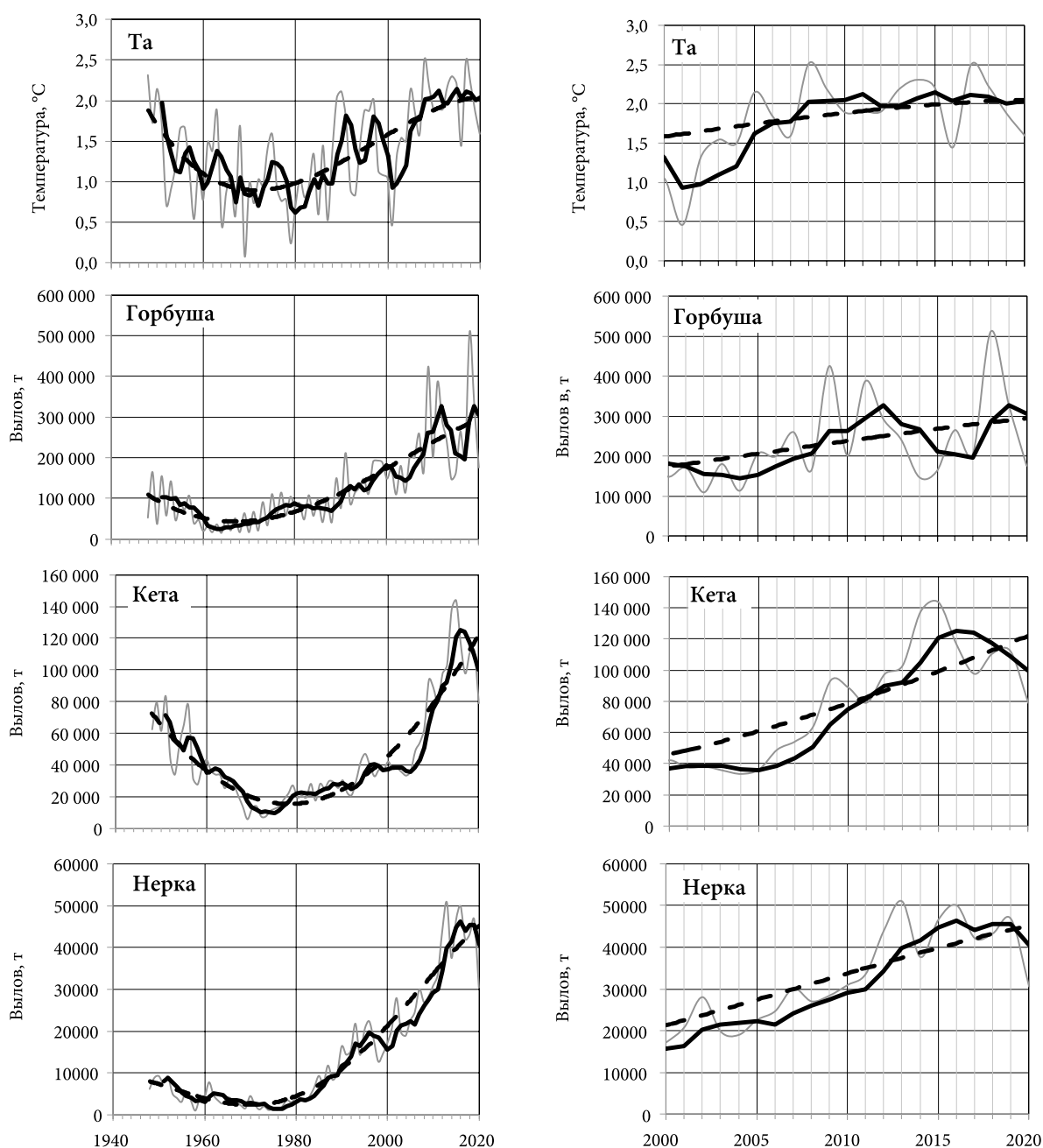


Рис. 1. Многолетние изменения приземной температуры воздуха над дальневосточным бассейном (T_a) и российский вылов горбуши, нерки и кеты. Левая панель — с 1948 по 2020 гг.; правая панель — с 2000 по 2020 гг. Тонкая серая линия — ежегодный ход; жирная сплошная линия — 4-летний скользящий ход; жирная пунктирная линия — полиномиальный тренд 4-й степени.

ные тренды 5 и 6 степени имеют сходные конфигурации. Полиномиальные тренды Та и лососей очень близки друг другу, в особенности Та — горбуша. Уровень корреляции превышает +0,75.

Общим для Та и лососей является спад с конца 1940-х гг. до середины 1970-х гг., затем резкий подъем с начала 1980-х гг. по настоящее время. Возникает вопрос: связано ли увеличение численности лососей с устойчивым потеплением последних десятилетий? Пока этому нет убедительного объяснения. Неясны основные механизмы способствующие повышению численности рыб. Возможно, главная причина кроется в благоприятных условиях на ранних стадиях развития, наиболее уязвимого периода жизни. Но пока не удалось достигнуть большого прогресса в этом вопросе, хотя попытки были (Бугаев, Тепнин. 2015; Шатилина и др., 2018; Farley et al., 2020; Ruggerone, Goetz, 2004).

Для детализации многолетних колебаний были проведены 4-летние скользящие осреднения, необходимые для

филтрации 2-летних циклов, ярко проявляемых у горбуши. Для надежности были соединены два 2-х летних цикла. На спаде численностей лососей и Та их колебания не совпадают. Отдельные соотвествия, как, например, противофазность Та-кета в 1970-е гг., скорее всего, случайное совпадение. С повышением Та и увеличением вылова лососей в начале 1980-е гг. совпадений становится больше и просматривается на графике в явном виде. Так, наряду с понижением температуры воздуха в начале 2000-х гг. произошло падение численностей горбуши, кеты и нерки. Перед этим периодом наблюдалось десятилетие высокой численности рыб, сопровождавшееся заметным потеплением над регионом. Последующее резкое потепление, происходившее в течение первого десятилетия XXI столетия, возможно, спровоцировало ускорение темпов увеличения численности лососей, что привело к рекордным выловам в последнее пятилетие.

В середине 2000-х гг. температура воздуха стабилизировалась и до 2019 г.

Таблица 2. Значения приземной температуры воздуха над дальневосточным бассейном (Та) с 2010 по 2020 гг.

Годы	Средняя годовая	Январь-март	Май-июль
2010	1,89	-8,14	8,23
2011	1,91	-6,84	7,82
2012	1,90	-9,16	8,39
2013	2,18	-8,09	8,25
2014	2,30	-6,96	8,14
2015	2,20	-5,09	7,39
2016	1,44	-8,78	8,25
2017	2,49	-5,16	8,07
2018	2,21	-6,88	7,81
2019	1,87	-7,94	7,96
2020	1,59	-8,45	7,49

Примечание. Жирные подчеркнутые цифры — самые низкие температуры.

держалась на среднем уровне 2,0–2,2 °C (рис. 1, правая панель). У горбуши в этот период были два пика вылова: в 2009 г. — 424 тыс. т. и 2018 г. — 511 тыс. т. В промежуточные годы вылов колебался в пределах 150–300 тыс. т., т.е. ее вылов не рос, а колебался вокруг среднего для XXI столетия уровня (237 тыс. т). Кета и нерка в середине 2010-х гг. достигли своего пика, и в последние годы наметился их спад. Особенно сильное падение выловов всех трех видов лососей произошло в последнем 2020-м г. (рис. 1, правая панель).

Следует заметить, что этот год стал одним из самых холодных с начала XXI столетия (табл. 2). Причем не только при годовом осреднении, но также зимой, весной и начале лета. Но вряд ли данное похолодание стало причиной снижения уловов лососей. Возможно, произошло совпадение событий в природной среде и лососевом сообществе. С другой стороны нельзя исключать и возможное начало обратного хода температуры и численности лососей в течение следующих лет или даже десятилетий.

Предполагаемые природные условия снижения численности горбуши в середине 2010-х и 2020 гг.

В 2014–2015 гг. на фоне стабилизации T_a и высокого уровня численности

кеты и нерки произошло заметное (более чем на 100 тыс. т) снижение вылова горбуши по сравнению с началом 2010-х гг. В следующие два года вылов горбуши увеличился, но не достиг уровня начала десятилетия. Затем в течение одного года произошел ее резкий подъем на 300 тыс. т.

Провалы выловов горбуши в середине 2010-х и 2020 гг. могли быть совпадениями, а могли быть результатами определенных событий в природной среде. Действительно в эти годы в северо-восточной части Тихого океана наблюдались большие положительные аномалии температуры, связанные с возникновением необычайно теплой области в зал. Аляска. В публикациях она известна под названиями «Blob» (Bond et al., 2015) для 2013–2016 гг. и «Blob 2» (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS> для 2020 г. Аномалии температуры в них превышали +3 °C. Такие области возникают в результате сильных отклонений в формировании и развитии приземной атмосферы в северной части Тихого океана, что происходит довольно редко. Так, упомянутые случаи были единственными с начала 1990-х гг.

В годы развития «Blob» и «Blob 2» вылов горбуши в водах России резко снижался (рис. 2) до 148–163 тыс. т.

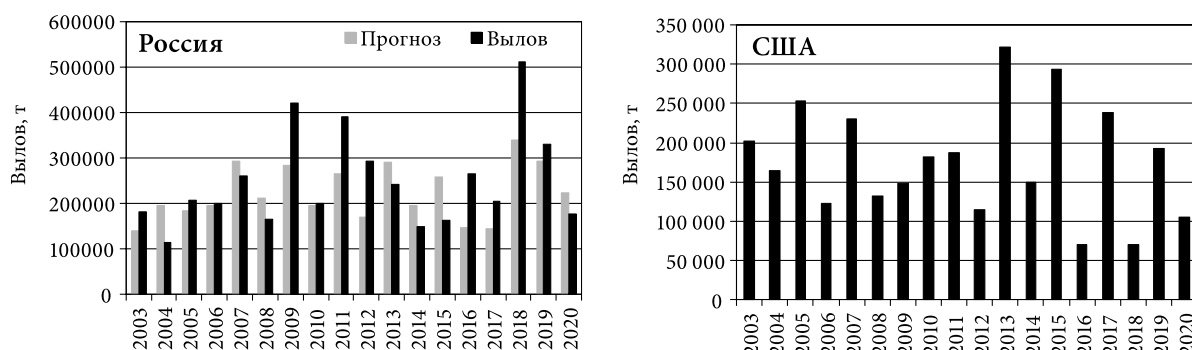


Рис. 2. Прогноз и вылов горбуши в России и вылов горбуши в США в 2003 г. XXI столетия — 2020 гг.

в 2014–2015 гг. и 176 тыс. т. в 2020 г., что на 100–150 тыс. т. меньше, чем в предыдущие годы. Причем, прогнозные цифры были значительно выше объемов вылова: в 2014–2015 гг. — на 24,0–36,6%; в 2020 г. — на 21,1%. В другие годы, наоборот, прогнозы были меньше итоговых изъятий. Нередки были случаи недоучета на 50–80%, что может свидетельствовать о несовершенстве современных методов прогноза из-за недостатка различной информации, в том числе о степени влияния природных условий, либо в результате осторожного подхода при прогнозировании. Можно предположить, что в годы развития «Blob» и «Blob 2» численность возвращающейся горбуши сильно зависела от сложившихся условий зимовки в океане, ставших негативными для выживаемости рыб.

Если опираться на данное предположение, то горбуша, подходящая к берегам США, пострадала бы в большей степени, т.к. ее зимовка проходит восточнее линии перемены дат непосредственно в зоне распространения аномально теплых областей «Blob» и «Blob 2». Наша горбуша не заходит восточнее 170° в.д. (Myers et al., 2007), что достаточно далеко от этих областей. Однако в годы зарождения аномально теплых областей уловы горбуши в США были рекордно высокими для нечетных лет (в 2013

и 2015 гг.), а в 2014 и 2020 гг. выше ближайших четных лет (рис. 2). Почему же только Российская горбуша провалилась в рассматриваемые годы, хотя она зимует далеко от аномальных областей?

Обратимся к климатическим индексам и проведем их сравнения с восточно-камчатским (ВК) и западно-камчатским (ЗК) стадами горбуши. Они наиболее многочисленны и составляют основу вылова России (Найденко, Темных, 2019). При этом следует иметь в виду, что роли индексов в динамике морских организмов скорее опосредованные. Их влияние передается через водную среду. Поэтому предварительно проведем оценку влияния индексов на гидрологию прибрежных вод, определяющую условия ската сеголеток и развитие молоди горбуши с конца зимы до начала посткатадромной миграции. На термические условия ВК наиболее сильное влияние оказывает PDO, на ЗК — АО (табл. 3).

Проведем соответствующие графические сравнения 4-летних скользящих осреднений (рис. 3). При этом, для того чтобы привести в соответствие годы индексов и ската лососей, вылов смещен на один год назад. Не вдаваясь в подробности межгодовых изменений, заметим периоды противофазностей между горбушей и индексами. Провал числен-

Таблица 3. Связи климатических индексов с сезонной температурой воды на поверхности

Районы	Сезоны	АО	ENSO	PDO	NPI	SHI	WP
ВК	зима	<u>0,307</u>	0,112	<u>0,451</u>	-0,239	<u>-0,347</u>	0,265
	весна	0,249	0,192	<u>0,365</u>	-0,131	-0,217	0,262
	лето	0,074	0,105	0,196	-0,011	-0,031	0,265
ЗК	зима	<u>0,356</u>	0,121	<u>0,448</u>	-0,243	-0,271	0,251
	весна	<u>0,367</u>	0,006	0,291	-0,100	-0,284	0,035
	лето	0,226	-0,020	0,058	0,070	0,008	-0,051

Примечание. Жирные подчеркнутые цифры — значимые связи при $p=0,01$.

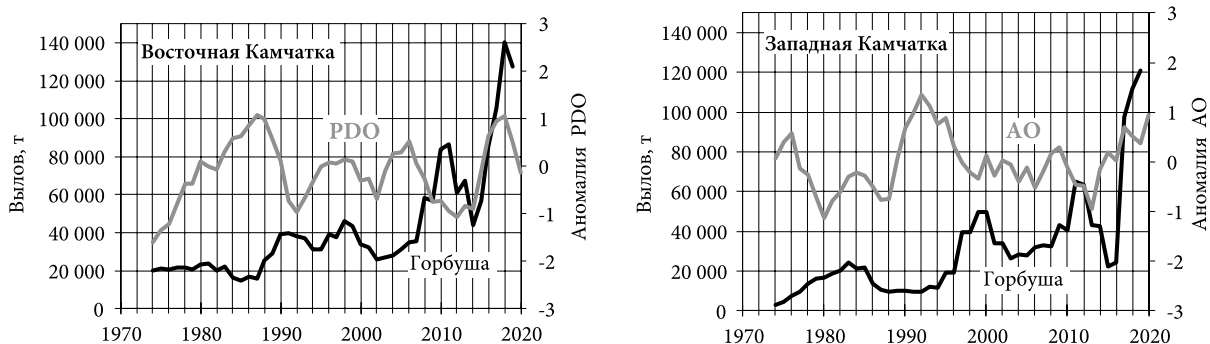


Рис. 3. Многолетние изменения зимних климатических индексов и вылова отдельных стад горбуши со сдвигом на один год назад при 4-х летнем скользящем осреднении.

ности горбуши совпадал с пиком климатических индексов и, наоборот, пик численности приходился на минимуме индексов. Противопозности наблюдались до середины 2010-х гг., затем они были нарушены. Так, на минимуме вылова горбуши в середине 2010-х гг. PDO и АО были на стадии роста и своих вершин достигли только в конце десятилетия, т.е. со сдвигом в 2–3 года вперед. Возможно, в дальнейшем произойдет синхронизация индексов и вылова горбуши в одной фазе.

Сравнительный анализ вылова горбуши с колебаниями климатических индексов показывает, что спад в середине 2010-х гг. имеет циклическую природу. Но с нарушением ритма циклов во второй половине десятилетия, скорее всего у горбуши, предположение о связи с индексами нельзя считать достаточно надежным. Не исключено и то, что причины снижения численности лососей имеют иную природу, а климатические факторы могут быть только ориентирами для их поиска и исследования.

Далее рассмотрим термические условия прибрежных вод, куда весной скатывается молодь лососей, а также открытых вод Охотского и Берингова моря, где летом нагуливается и активно питается подросшая, но еще неполовозрелая, горбуша западной и восточной

Камчатки. На рисунке 4 вылов горбуши сдвинут на один год назад, чтобы совместить продуктивность ее поколений с температурой в периоды ската и посткатадромной миграции, наиболее уязвимо-го этапа жизни горбуши.

В начале 2000-х гг. во всех четырех рассматриваемых областях температура воды, как и T_a , сильно понижалась. Данное событие тесно связано с глубоким и продолжительным Ла-Нинья, имевшим планетарное последствие (Glantz, 2002). В течение нескольких последующих лет вылов горбуши на восточной и западной Камчатке незначительно снизился. Как было отмечено выше, уменьшился и общий российский вылов. С середины 2010-х гг. температура воды во всех областях повысилась, соответственно резко вырос улов обеих группировок.

Следующее уменьшение вылова горбуши наблюдалось в середине 2010-х гг. но не подтверждается ходом температуры воды. С середины 2010-х гг. температура воды с небольшими колебаниями держится на определенном уровне. Сильных отклонений от средней величины не происходило, за исключением похолодания прибрежных вод восточной Камчатки в 2012 и 2013 гг. Однако похолодание было не таким сильным, как в начале 2000-х гг., и вряд могло

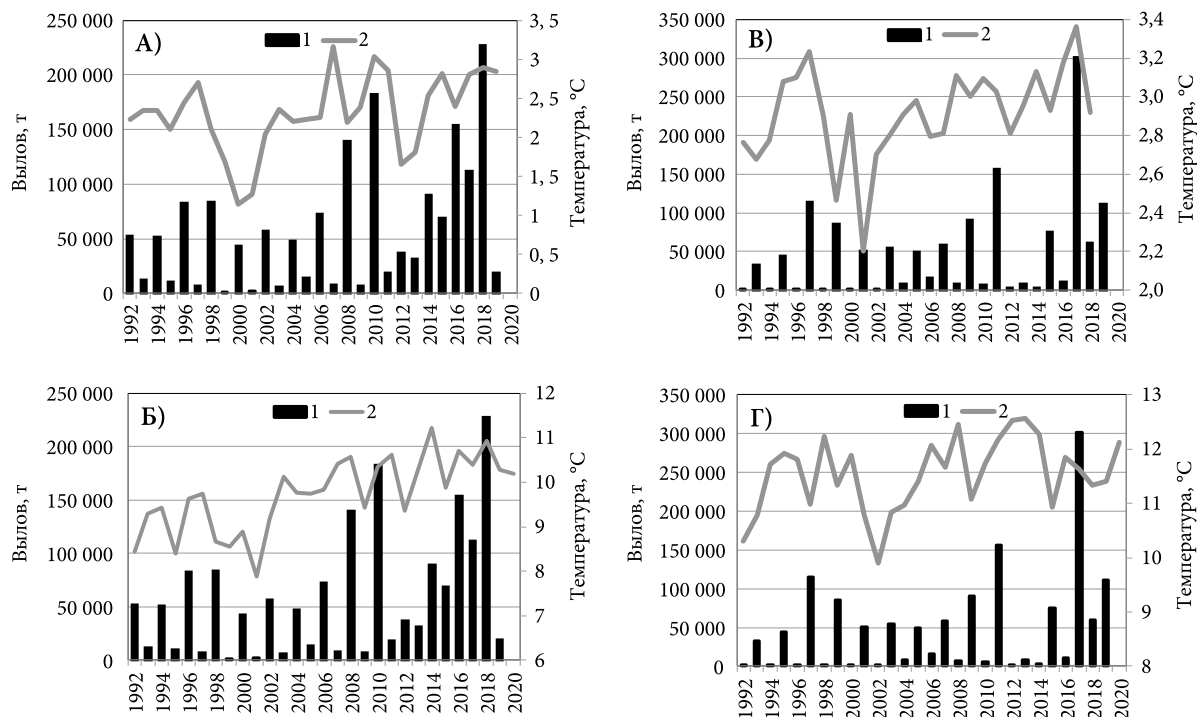


Рис. 4. Вылов горбуши со смещением на один год назад (1) и температура воды (2) весной (апрель–июнь) у побережий восточной (А) и западной Камчатки (В), летом (июль–сентябрь) в глубоководных частях запада Берингова (Б) и юга Охотского морей (Г).

сильно повлиять на численность горбуши. В 2019 г. в периоды ската и посткатадромной миграции горбуши (поколения провального вылова в 2020 г.) температура воды весной у побережий и летом в открытом море была на уровне предыдущих нескольких теплых лет. Значит, нет основания считать, что термические условия во время ската и посткатадромной миграции могли сыграть решающую роль в снижении биомассы горбуши.

Таким образом, рассмотренные природные параметры не дают достаточно надежного понимания в снижении вылова рыб в середине 2010-х гг. Необходимо привлечение других параметров, причем с обязательным включением характеристик биологических направлений. Возможно, поможет комбинированный подход, с привлечением разноплановых параметров. Понятно, что удачное решение данной проблемы, позволит выйти на новый уровень в пони-

мании динамики численности лососей, и поможет составлять более аргументированные и точные прогнозы.

Прогноз температуры воздуха над Дальневосточным бассейном до 2028 г. и ожидаемый вылов лососей

Предварительно рассмотрим изменения в динамике лососей на фоне колебаний T_a при 4-х летнем пошаговом осреднении (рис. 5). Всего в промежутке 1949–2020 гг. уложились 18 таких шагов. Левый верхний рисунок в целом соответствует кривым 4-летнего скользящего осреднения, отображенным на рисунке 1. Остальные три графика на рисунке 4 показывают высокий уровень связей между T_a и лососями. Величины достоверности составляют $R^2 = 0,59–0,66$, т.е. достаточно надежные, чтобы доверять этим связям. С определенными допущениями их можно использовать даже в прогностических задачах.

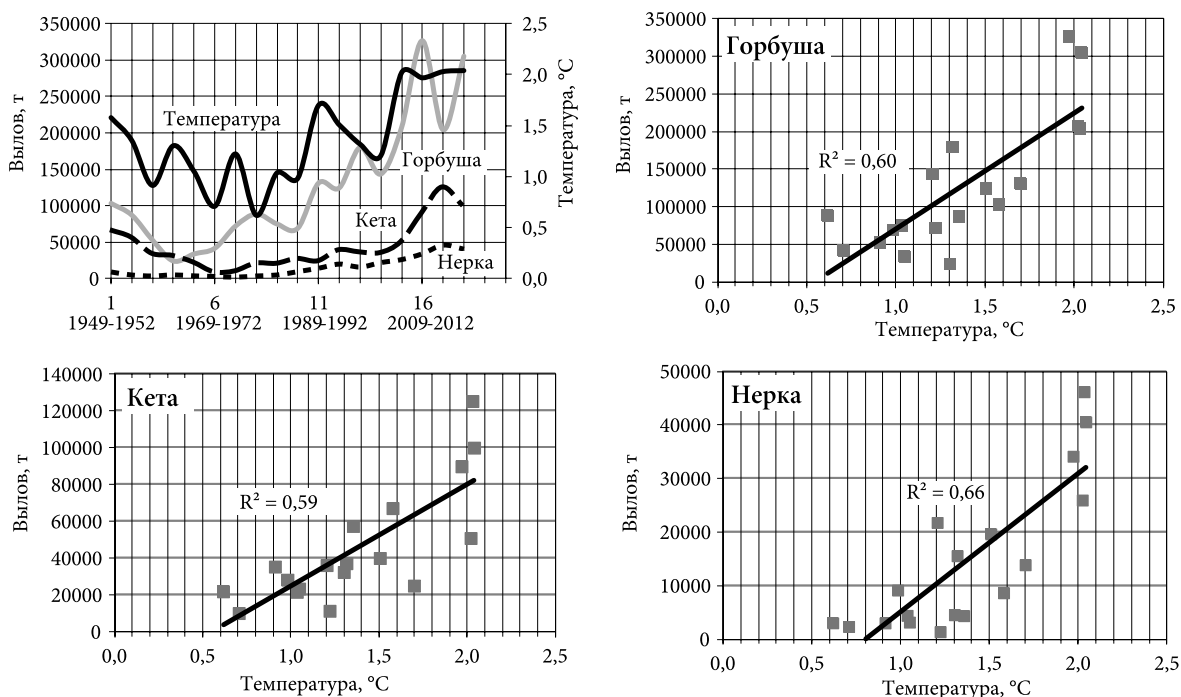


Рис. 5. Изменения годовой температуры воздуха над дальневосточным бассейном и российского вылова трех видов лососей при 4-х летнем пошаговом осреднении (верхний левый рисунок) и связи выловов горбуши, кеты и нерки с T_a . В левом верхнем рисунке на горизонтальной оси: верхние цифры — номера 4-х летних шагов, нижние цифры — периоды лет для 1, 6, 11, 16 шагов.

Из графиков связей можно сделать два важных вывода. Первый, при температуре ниже $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ средний за 4 года вылов горбуши всегда ниже 100 тыс. т., кеты ниже 40 тыс. т., нерки ниже 10 тыс. т. Второй, при температуре ниже $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ вылов горбуши всегда ниже 200 тыс. т., кеты ниже 80 тыс. т., нерки ниже 30 тыс. т.

Далее будут составлены два варианта прогноза T_a до 2028 г. по методу ARIMA. При этом было принято, что изменения температуры воздуха контролируются естественными факторами и в них преобладают циклические колебания, связанные с атмосферной циркуляцией, солнечной радиацией и теплоемкостью океана. При этом важное значение имеет авторегрессия, в которой значение временного ряда в данный момент времени может быть выражено в виде линейной комбинации пре-

дыдущих значений этого же ряда и случайной ошибки, обладающей свойством «белого шума». Антропогенные и техногенные влияния вторичны и не вносят существенный вклад. К такому заключению пришли многие ученые на основании наблюдаемого снижения темпа, или даже прекращения, глобального потепления в последние годы (Easterling, Wehner, 2009; Fyfe et al., 2013; Mao et al., 2019 и др.). Как было отмечено выше над дальневосточным бассейном T_a стабилизировалась с середины 2000-х гг., т.е. глобальный процесс отразился и в нашем регионе.

Прогноз T_a был проведен двумя способами: первый — по ежегодным данным; второй — с 4-летним скользящим осреднением. Тестовая проверка на ряде с 1996–2020 гг. показала, что первый способ не внушает доверия, коэффициент корреляции R между реальны-

ми и прогнозными данными составляет 0,5, что недостаточно для принятия прогноза. Второй способ с $R=0,95$ более надежен и может быть использован в прогнозных заключениях.

Результат прогноза T_a до 2028 г. с использованием 4-х летних скользящих осреднений показан на рисунке 6. В течение нескольких ближайших лет T_a незначительно понизится и составит 1,8–1,9 °C. Затем ожидается ее стабилизация на уровне 1,9–1,95 °C

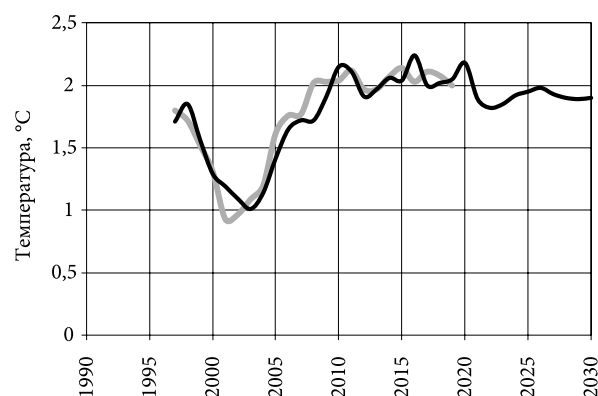


Рис. 6. Температуры воздуха над дальневосточным бассейном при 4-х летнем скользящем осреднении (серая линия) и кривая функции ее подгонки с прогнозом до 2030 г. (черная линия) по методу ARIMA.

По нашему прогнозу в следующие 4 года (2021–2024 гг.) средняя температура воздуха составит 1,85 °C, что практически соответствует пороговому значению для формирования средних по численности поколений горбуши, кеты и нерки (рис. 5). Их ожидаемый среднегодовой вылов составит 200, 75, 25 тыс. т. соответственно, т.е. меньше, чем в последние три 4-х летия (16, 17, 18 шаги на рис. 5). В 2025–2028 гг. среднегодовая температура воздуха составит 1,95 °C, что предполагает возможность небольшого увеличения запасов лососей, но их суммарный ежегодный вылов будет на уровне 300–400 тыс. т. Вероятность повторения рекордных выловов второй

половины 2010 г. у российского промысла невелика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ годовой температуры воздуха над дальневосточным бассейном с 1948 по 2000 гг. выявил начало резкого потепления на старте 1980-х гг., и соответствует глобальному климатическому процессу. Оно последовало вслед за известным климатическим сдвигом в конце 1970-х гг. (Mantua et al., 1997; Minobe, 1999 и др.), отразившимся на многих природных и биологических показателях. Численности горбуши, кеты и нерки в российских водах начали быстро расти, и во второй половине 2010-х гг. их выловы достигли исторических максимумов.

В начале 2000-х гг. на фоне общего повышения температуры произошло кратковременное похолодание, следовавшее вслед за крупным Ла-Нинья в 1998–2000 гг. (Glantz, 2002). В этот период приостановился рост численности лососей и в течение нескольких лет их уловы незначительно уменьшились по сравнению с предыдущими годами. С окончанием Ла-Нинья температура воздуха вновь стала повышаться, и соответственно увеличивался вылов лососей.

В середине 2000-х гг. произошла стабилизация годовой температуры воздуха над дальневосточным бассейном. У горбуши в этот период были два пика вылова: в 2009 г. с выловом 424 тыс. т. и 2018 г. с выловом 511 тыс. т. В промежуточные годы вылов колебался в пределах 150–300 тыс. т., т.е. ее биомасса не росла, а колебалась вокруг среднего для XXI-го столетия уровня (237 тыс. т). Кета и нерка в середине 2010-х гг. достигли своего пика, и в последние годы наметился их спад. Особенно сильное падение выловов всех трех видов лосо-

сей произошло в 2020-м г., когда заметно понизилась температура воздуха.

Возможно, понижение температуры воздуха в 2020 г. показывает начало последующего похолодания, прогнозируемого при использовании метода интегрированной модели авторегрессии — скользящего среднего *ARIMA*. В ближайшие 4 года (2021–2024 гг.) средняя температура воздуха составит 1,85 °С, что ниже показателей предыдущего срока (2017–2020 гг.) на 0,2 °С. Вполне возможно, что прогноз оправдается, и основания для этого имеются, что подтверждается исследованиями отдельных климатологов (например, Мао et al., 2019). Даже известная Международная группа экспертов по изменению климата (IPCC, 2014) в своем пятом отчете 2014 г. как один из вариантов развития климата предложила стабилизацию глобальной температуры в ближайшие два десятилетия. На основе выявленных связей между T_a и выловом лососей можно предположить, что в 2021–2024 гг. средние уловы упадут и составят: для горбуши — 200, кеты — 75, нерки — 25 тыс. т., что меньше, чем во второй половине 2010-х гг. В следующее 4-летие (2025–2028 гг.) предполагается повышение T_a до 1,95 °С. Соответственно уловы тихоокеанских лососей могут достигнуть 400 тыс. т в год.

В середине 2010-х гг. произошло падение вылова горбуши, тогда как численность кеты и нерки продолжала увеличиваться. T_a над дальневосточным бассейном в этот период держалась на высоком уровне без резких понижений. Был проведен поиск аномальных проявлений параметров природной среды в эти годы. Наиболее существенным было формирование необычайно теплой области на северо-востоке Тихого океана с аномалиями температуры выше +3 °С. Она сохранялась с конца

2013 до начала 2016 гг. Летом 2019 г. на северо-востоке Тихого океана вновь образовалась аномально теплая область, влияние которой продолжалось и зимой 2020 г. Синхронно упали теперь выловы не только горбуши, но и кеты, и нерки.

Можно было бы развить данное направление для выяснения промежуточных звеньев между средой и лососями: плотности, кормовой обеспеченности, хищничества и т.д. Но статистика вылова горбуши в водах США ставит под большое сомнение наши предварительные выводы. В годы зарождения теплых областей в США уловы горбуши были рекордно высокими для нечетных лет (в 2013 и 2015 гг.), а в 2014 и 2020 гг. выше ближайших четных лет.

Были попытки найти решения в климатических индексах и температуре воды в прибрежных районах, куда скатывается молодь лососей. Но найти убедительный ответ пока не удастся. Вопрос о причине спада вылова горбуши в середине 2010-х гг. пока остается открытым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2018. Вып. 49. С. 5–49.

Ванюшин Г.П., Царева В.А., Углова Т.Ю., Кружалов М.Ю. Сравнительная оценка результатов промысла горбуши и температурных условий морской среды, определяемых по спутниковым данным в районе южных Курильских островов // Тр. ВНИРО. 2015. Т. 158. С. 112–120.

Елисеева И.И., Курышева С.В. Костеева Т.В., Бабаева И.В., Михайлов Б.А. Экономика. Учебник/ Под. ред. И.И. Елисеевой. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 2006. 576 с.

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

Котенев Б.Н., Кровнин А.С., Кловач Н.В., Мордасова Н.В., Мурый Г.П. Влияние климато-океанологических факторов на состояние основных запасов горбуши в 1950–2015 гг. // Тр. ВНИРО. 2015. Т. 158. С. 143–161.

Кровнин А.С., Кловач Н.В., Котенев Б.Н., Мурый Г.П. Связь уловов западно-камчатской горбуши и нерки с температурой поверхности океана в Северном полушарии и прогноз их вылова на 2010 г. // Рыбн. хоз-во. 2010. № 3. С. 43–46

Найденко С.В., Темных О.С. Современное состояние лососевых стад Дальнего Востока // Рыба. 2019. № 1(22). С. 48–52.

Радченко В.И. О корреляции российского вылова горбуши с динамикой теплового баланса Мирового океана // Бюллетень № 3 реализации «Концепции дальневосточной программы изучения тихоокеанских лососей». Владивосток: Изд-во ТИНРО-Центра, 2008. С. 230–235.

Фельдман М.Г., Шевляков Е.А. Выживаемость камчатской горбуши как результат совокупного воздействия плотностной регуляции и внешних факторов среды // Известия ТИНРО. 2015. Т. 182. С. 88–114.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Изменчивость и взаимосвязь основных климатических индексов для северной части Тихого океана: тренды, климатические сдвиги, спектры, корреляции // Изв. ТИНРО. 2019. Т. 199. С. 163–178.

Шатилина Т.А., Великанов А.Я., Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Аномальные гидрометеорологические условия в эстуарно-прибрежный период жизни горбуши Восточного Сахалина // Тр. ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 181–192.

Шунтов В.П., Темных О.С., Найденко С.В. Ещё раз о факторах, лимитирующих численность тихоокеанских лососей (*Oncorhynchus* spp., сем. Salmonidae) в океанический период их жизни // Изв. ТИНРО. 2019. Т. 196. С. 3–12.

Beamish R.J., Bouillon D.R. Pacific salmon production trends in relation to climate // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1993. V. 50. N. 5. P. 1002–1016.

Bond N.A., Cronin M.F., Freeland H., Mantua N. Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 3414–3420, doi:10.1002/2015GL06330.

Easterling D.R., Wehner M.F. Is the climate warming or cooling? // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. Article ID: L08706, <https://doi.org/10.1029/2009GL037810>.

Farley Jr. E.V., Murphy J.M., Cieciel K., Yasumiishi E.M., Dunmall K., Sformo T., Rand P. Response of Pink salmon to climate warming in the northern Bering Sea // Deep-Sea Research II. 2020. V. 177. <http://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104830>.

Fyfe J.C., Gillett N.P., Zwiers F.W. Overestimated global warming over the past 20 years // Nature Climate Change. 2013. V. 3. P. 767–769. <https://doi.org/10.1038/nclimate1972>.

Glantz M.H. La Niña and its impacts: facts and speculations. Publ. The United Nations University, New York, 2002. 271 p.

Hare S.R., Francis R.C. Climate change and salmon production in the northeast Pacific Ocean // Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 1995. № 121. P. 357–372.

Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and practice. 2nd edition. Melbourne, Australia: OTexts, 2018. 382 p.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing T., Pachauri R.K., Meyer L.A. (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

Kaeriyama M., Urabe Y. Global Warming Effect for Migration Route of Japanese Chum

Salmon // NPAFC Technical Report. 2018. N. 11. P. 91–95.

Litzowa M.A., Hunsickerb M.E., Bond N.A., et al. The changing physical and ecological meanings of North Pacific Ocean climate indices // PNAS. 2020. V. 117. N. 14. P. 7665–7671.

Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1997. V. 78. P. 1069–1079.

Mao Y., Tan J., Chen B., Fan H. The «ocean stabilization machine» may represent a primary factor underlying the effect of «global warming on climate change» // Atmospheric and Climate Sciences. 2019. V. 9. P. 135–145 <https://doi.org/10.4236/acs.2019.91009>

Minobe S. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 855–858.

Myers K.W., Klovach N.V., Gritsenko O.F., Urawa S., Royer T.C. Stock-Specific Distributions of Asian and North American Salmon in the Open Ocean, Interannual Changes, and Oceanographic Conditions // NPAFC Bulletin. 2007. N. 4. P. 159–177.

Ruggerone G.T., Goetz F.A. Survival of Puget Sound chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in response to climate-induced competition with pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 2004. N. 61. P. 1756–17

DYNAMICS OF ABUNDANCE

CHANGES IN AIR TEMPERATURE OVER THE FAR EASTERN BASIN AND CATCHING OF PACIFIC SALMON IN RUSSIA IN 1948–2020 AND THEIR FORECAST UNTIL 2028

© 2021 y. G.V. Khen, Ju.D. Sorokin, Ju.G. Khen

The Pacific branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Vladivostok, 690091

The analysis of the dynamics of the Russian catch of pink salmon, chum salmon and sockeye salmon in comparison with changes in air temperature over the Far East basin is carried out. Since the early 1980s there was a synchronous rise in air temperature and catch of pink salmon, chum salmon and sockeye salmon. In 2005–2019, the air temperature stabilized. During this period, pink salmon, chum salmon and sockeye salmon reached their maximum catches. In recent years, there has been a decline. An especially strong drop in catches of all three types of salmon occurred in 2020, when the air temperature dropped noticeably. A good relationship was found between temperature and salmon catch at 4-year stepwise averaging. ARIMA model forecasting shows that the average air temperature will be 1,85 °C in 2021–2024. Accordingly, the total salmon catch will be approximately 300 thousand tons per year.

Key words: Far Eastern basin, air temperature, Russian catch, pink salmon, chum salmon, sockeye salmon, synchronicity, forecast.