

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЗАПАСАМИ ГОРБУШИ *ONCORHYNCHUS GORBUSCHA*
КАМЧАТСКОГО КРАЯ (ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ,
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОМЫСЛА)**

© 2021 г. М.Г. Фельдман, А.В. Бугаев

*Камчатский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии (КамчатНИРО),
г. Петропавловск-Камчатский, 683600 (КамчатНИРО),
г. Петропавловск-Камчатский, 683600
E-mail: feldman.m.g@kamniro.ru*

Поступила в редакцию 23.08.2021

Динамика подходов горбуши Камчатки в 2010-х гг. претерпела значительные изменения. Рост численности подходов происходит одновременно с увеличением диапазона изменчивости промыслового запаса, что требует постоянного совершенствования методики прогнозирования подходов. Рассмотрены основные современные методы прогнозирования данного вида, применяемые в КамчатНИРО. С учетом больших флуктуаций численности запасов предложено правило регулирования промысла, основанное на предосторожных ориентирах управления.

Ключевые слова: горбуша, *Oncorhynchus gorbuscha*, динамика численности, запас-пополнение, прогнозирование, правила регулирования промысла.

ВВЕДЕНИЕ

В пределах камчатского ареала горбуша является доминирующим видом, ежегодный вылов которой в первые два десятилетия XXI в. в среднем соответствовал 120 тыс. т (65% от добычи всех видов лососей на Камчатке). В 2011–2020 гг. уловы вида на Камчатке увеличились в среднем до 167 тыс. т, что составляло более 60% от добычи горбуши на всем Дальнем Востоке. Причем, в период 2016–2020 гг. этот показатель достиг порядка 75%. В значительной степени рост численности камчатской горбуши во второй половине второго десятилетия XXI в. связан с выходом ранее неурожайных поколений горбуши на высокопродуктивный уровень. В 2016 и 2018 гг. увеличились подходы горбуши

к северо-восточному побережью Камчатки, а в 2019 г. — к западному побережью полуострова.

Отмеченные изменения численности и структуры запасов горбуши Камчатки обусловили многоуровневый подход для прогнозирования ее динамики численности. В настоящее время прогноз возвратов (подходов) горбуши основывается на теоретических положениях, реализованных в результате оценки взаимосвязи представленной в стратифицированной модели на базе классической зависимости «родители — потомство» (Ricker, 1954; Shepherd, 1982), а также регрессионного моделирования с применением климатических индексов (PDO — Тихоокеанская декадная осцилляция, WP — индекс, характери-

зующий циклоническую активность) (Фельдман, Шевляков, 2015) и классификационного анализа (метод случайный лес деревьев решений) (Breiman, 2001). В качестве индикаторной информации в прогнозах обязательно учитываются данные учетно-мальковых работ по скату горбуши из реперных рек Восточной и Западной Камчатки. Кроме того, прогноз ориентируется на оценки численности горбуши, полученные в результате проведения специалистами «ТИНРО» и «КамчатНИРО» учетных траловых съемок во время осенней откочевки молоди в открытые воды Берингова и Охотского морей.

Современные представления о ведении эффективного рыбного хозяйства (обеспечении устойчивости воспроизводства горбуши и промысла ее запасов, а также надежности прогнозирования ее подходов) обусловили формирование стратегии управления рыбными запасами, базирующейся на ретроспективной оценке динамики численности, их прогнозирования и ведении промысла, согласно специальным правилам регулирования промысла (ПРП). Соответственно, сложившаяся во втором десятилетии XXI в. динамика численности горбуши Камчатки, требует постоянного совершенствования методики прогнозирования ее подходов. В рамках представленной работы рассмотрены основные современные методы прогнозирования данного вида, применяемые в «КамчатНИРО». С учетом возросших флуктуаций численности запасов вида предложены новые ПРП, основанные на предосторожных ориентирах управления.

Целью настоящей работы является обзор новейших методических принципов прогнозирования горбуши Камчатки для выработки единой многоуровневой системы управления запасами вида.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности динамики численности камчатской горбуши в современный период

Современные запасы горбуши Камчатки (2010-е гг.) находятся на максимальном по численности уровне за весь имеющийся период наблюдений XX и XXI вв. Начиная с 1990-х годов, подходы этого вида последовательно возрастали. При этом, в последние годы, на восточном побережье на высокопродуктивный уровень стали выходить поколения чётных лет (2016 и 2018 гг.), а на западном побережье — нечётных лет (2019 г.).

В течение 1990–2000-х гг. подходы урожайных поколений горбуши обоих побережий были сопоставимыми. На восточном побережье численность в нечётные годы колебалась от 40 до 100 млн в среднем составляя 80 млн рыб, а на западном в чётные годы — от 67 до 128 млн в среднем 91 млн рыб. Смежные линии неурожайных поколений горбуши оставались малочисленными, но с разными уровнями динамики запасов. На западном побережье линия нечётных лет в 1990-е гг. была в депрессивном состоянии, ее подходы оценивали в пределах 1 млн экз. В середине 2000-х было небольшое увеличение численности подходов (2003–2007 гг.), но потом данная генерация снова вернулась в депрессию вплоть до 2015 г. В этот же период горбуша восточного побережья линии чётных лет воспроизводства, напротив, была хоть и малочисленной, но не являлась депрессивной по отношению к среднегодовым показателям возвратов, составляя в разные годы от 2 до 33 млн экз.

С начала 2010-х гг. наметились перемены в тенденциях динамики численности у урожайных поколений горбуши

для обоих побережий Камчатки. В 2009 и 2011 гг. подходы на восточном побережье резко возросли, составив более 180 млн экз. Соответственно, аналогичная ситуация наблюдалась и на западном побережье в 2012 г., когда численность подхода горбуши преодолела рубеж в 150 млн рыб. В дальнейшем подходы резко сократились и стали сопоставимыми со смежными неурожайными линиями — на восточном побережье в 2013 г., а на западном — в 2014 г. Однако уже со следующего поколения снова пошел рост численности. На восточном побережье уровень подходов в 2015 г. составил 185 млн рыб, в 2017 г. — 180 млн рыб, а в 2019 г. — 310 млн рыб (исторический максимум для данного региона). Тем не менее, в 2020 г., несмотря на ожидание высоких подходов, численность горбуши в возвратах была близка к среднемуголетним показателям, характерным для неурожайных лет. На западном побережье, после провала 2014 г., численность подходов снова возросла, а в 2018 г. достигла рекордных 350 млн рыб. При этом возросла численность подходов и смежных неурожайных поколений — на Восточной Камчатке до 104 млн рыб в 2018 г. и на Западной Камчатке до 62 млн рыб в 2019 г.

В целом динамика численности западнокамчатской горбуши повторяет таковую у восточнокамчатской с задержкой на 1 год (Котенев и др., 2015; Фельдман, Шевляков, 2015). Более наглядно это можно представить, если несколько сгладить ряды с помощью 3-летнего скользящего среднего (рис. 1).

Сходство тенденций динамики численности горбуши Восточной и Западной Камчатки, говорит о том, что на формирование запасов обеих региональных группировок стад влияет один и тот же комплекс факторов внешней среды. Влияние восточнокамчатской



Рис. 1. Сравнительные тренды динамики численности у восточнокамчатской и западнокамчатской горбуши с годовым отставанием, млн экз.

горбуши на западнокамчатскую, можно исключить, так как во время осенней откочевки, когда формируется численность запасов вида, обе группировки стад имеют географически изолированные районы нагула.

Методы прогнозирования подходов камчатской горбуши

Традиционным методом для определения величины поколений и впоследствии подходов является зависимость между количеством родителей и потомков (Ricker, 1954). В оценке зависимости пополнения от запаса использовались наблюдения по пропуску производителей и возврату потомков с 1990 г. по настоящее время обеих линий воспроизводства.

В прогнозе пополнения используется резонансная модель (Фельдман, Шевляков, 2015), особенностью которой является наличие максимума выживаемости поколений в зависимости от плотности. Вместе с тем, структурная форма данной модели совпадает с общей структурой моделей «запас — пополнение», показанной Дж. Шепардом (Shepherd, 1982):

$$R = \frac{aS^2}{\sqrt{(S_0^2 - S^2)^2 + b^2S^2}}, \quad (1)$$

где a — предел численности пополнения при неограниченном нерестовом запасе; b — нерестовый запас, необходимый для продуцирования пополнения, а при максимальной выживаемости и S_0 — нерестовый запас, обеспечивающий максимальную выживаемость потомков.

Основным методом проверки адекватности модели является анализ ее отклонений от наблюдаемых значений с помощью проверки распределения остатков на нормальность. Поскольку оценки родителей и потомков величины неотрицательные, то и распределение этих оценок подчиняется предположительно логнормальному закону, следовательно, необходимо оценивать распределение отклонений между логарифмами фактического и модельного пополнения. Даже визуальный анализ распределения показывает его далекое от нормальности состояние: наличие как минимум трех мод. С помощью метода ЕМ-кластеризации (Dempster et al., 1977) исходное распределение, за исключением нескольких выбросов, можно разбить на три значимых кластера (рис. 2). Соответственно им, исходные

данные были разбиты на три уровня численности (страты), каждый из которых описывается своей моделью (рис. 3).

Для оценки терминального значения запаса (прогноз подхода будущего поколения) реализуются два пути. Прогноз уровня численности по стратифицированной резонансной модели, где данные по запасу и пополнению разбиты на уровни (страты) т. е., по сути, решением задачи на классификацию. Для этого пути используются мощный современный метод машинного обучения: случайный лес деревьев решений — *Random Forest* (Breiman, 2001), основанный на использовании множества простых моделей-классификаторов (деревьев решений), каждое из которых выращено на собственной бутстреп-выборке наблюдений с замещением.

Цель данного метода определить уровень терминального поколения, иначе говоря, какую из трех моделей «запас — пополнение», нужно применить для прогноза численности будущего подхода. В качестве предикторов использованы помесечные данные климатических индикаторов, а в качестве

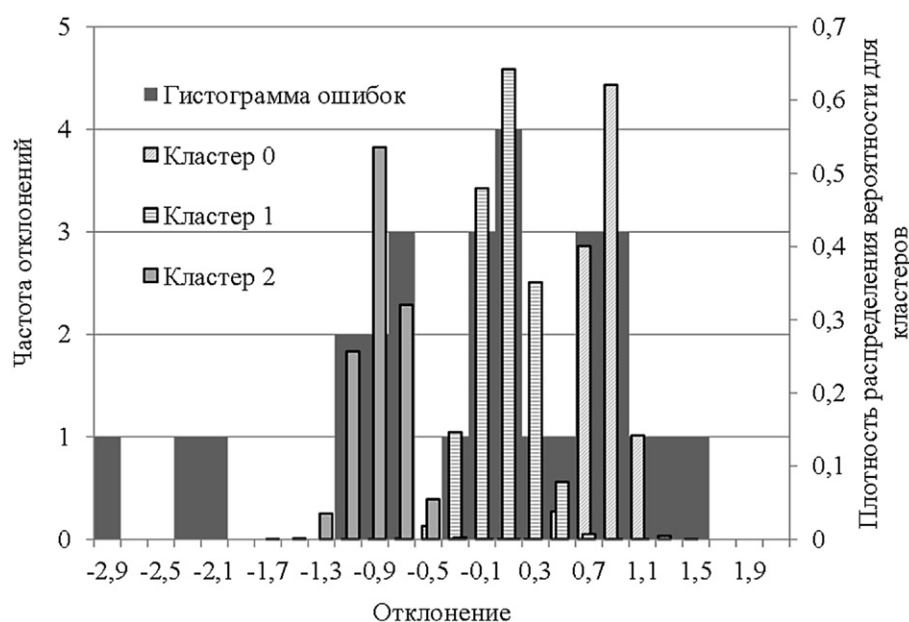


Рис. 2. Результаты ЕМ-кластеризации распределения остатков модели «запас — пополнение»

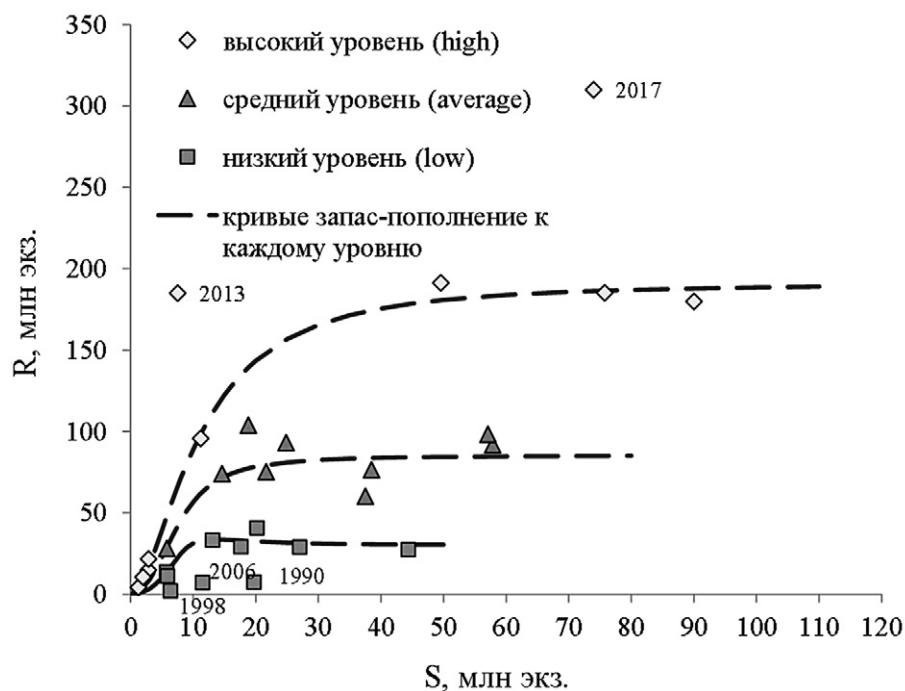


Рис. 3. Стратифицированная модель «запас — пополнение» для горбуши Восточной Камчатки

отклика уровни численности, полученные в результате ЕМ-кластеризации. На основе такого обучающего набора формируется ансамбль деревьев решений, который способен определить, к какому кластеру отнести терминальное поколение. При этом отбор значимых предикторов можно провести циклически, итеративно исключая незначимые признаки (Фельдман, 2020).

Прогноз уровня численности определяется простым большинством голосов базовых моделей в ансамбле. Причем наименьшая ошибка будет зависеть от достаточного количества деревьев, как правило, она стабилизируется при количестве около 100 деревьев и выше. На рисунке 4 показана доля ошибок вне выборки (out of bag или ООВ), которые эквивалентны тестовой ошибке (Джеймс и др., 2016; Шитиков, Мастицкий, 2017).

Второй путь — непосредственная оценка подхода с помощью методологии общей регрессионной модели (ОРМ) (Neter et al., 1990), в которой в качестве

предикторов выступают смоделированные по резонансной модели типа «запас — пополнение» значения выживаемости каждого поколения горбуши, а также показания климатических индикаторов в критические периоды онтогенеза (Фельдман, Шевляков, 2015).

Оба данных метода позволяют суммировать влияние различных факторов среды на численность горбуши в течение всего ее жизненного цикла, начиная с периода нереста родительского поколения. Вместе с тем, мы оцениваем и промежуточную численность поколения: в период покатной миграции на контрольных реках и в период откочевки молоди в открытое море к местам нагула. При этом оценки покатной миграции не проводятся тотально, а только на реперных (контрольных) водных объектах: Восточная Камчатка — реки Хайлюля и Кичига, Западная Камчатка — реки Большая, Утка, Кихчик, Пымта и Колпакова. Соответственно, данные по скату на востоке не могут использоваться для моделирования возврата по всему побережью

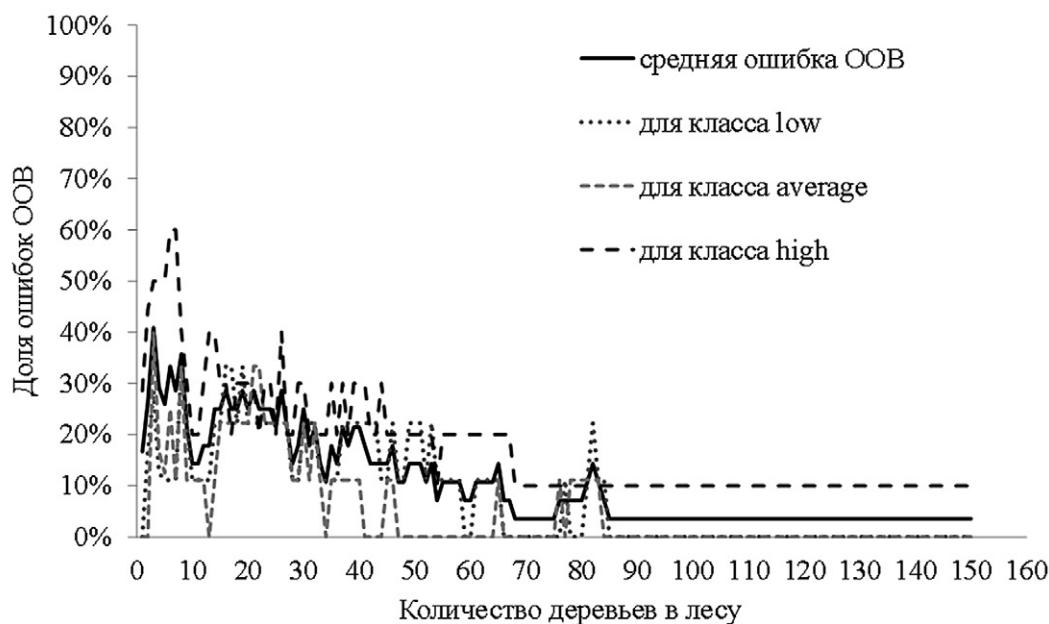


Рис. 4. Снижение доли ошибок ООВ в зависимости от количества деревьев в ансамбле для каждого уровня численности.

из-за малого количества контрольных рек. Для западного побережья, несмотря на то, что реперных рек больше, достаточные продолжительные ряды наблюдений имеются только для рек Большая и Утка, а по оставшимся трем рекам, наблюдения проводятся только четвертый год. Поэтому данные мальково-учетных работ при прогнозировании возвратов в большей степени рассматриваются в качестве индикаторной информации.

Наиболее объективной будет являться прогнозная оценка возврата горбуши по данным учетных траловых съёмов во время осенней откочёвки молоди от побережий Камчатки. В основном это связано с тем, что критические периоды её онтогенеза (инкубация икры, смолтификация и адаптация в прибрежной зоне) на данном этапе уже интегрированы в оценку учтённой численности молоди в открытом море. Кроме того, в настоящее время накоплены достаточно продолжительные временные ряды для построения простой регрессионной зависимости возврата горбуши от учтенной молоди.

Регулирование промысла

После определения прогноза возврата, доля изъятия, а, следовательно, и прогнозный вылов, рассчитывают с помощью правила регулирования промысла (ПРП). Для запасов горбуши Камчатского края приняты характерные для тихоокеанских лососей нелинейные ПРП, основанные на предосторожных оценках граничных ориентиров пропуска и эксплуатации (Бабаян, 2000), или иначе, буферных ориентирах по пропуску (S_{buf}) и эксплуатации (E_{buf}), подтвержденных тестированием на бутстреп-выборках (рис. 5).

Поскольку буферные ориентиры являются параметрами ПРП, то при их тестировании рассматриваются различные стратегии промыслового изъятия, из которых выбирается наиболее соответствующий целям управления режима промысла (рис. 6). Например, если поставлена цель максимизации вылова при минимальном риске, то с помощью изоплетных диаграмм различных характеристик запаса в зависимости от параметров ПРП можно выбрать нужные

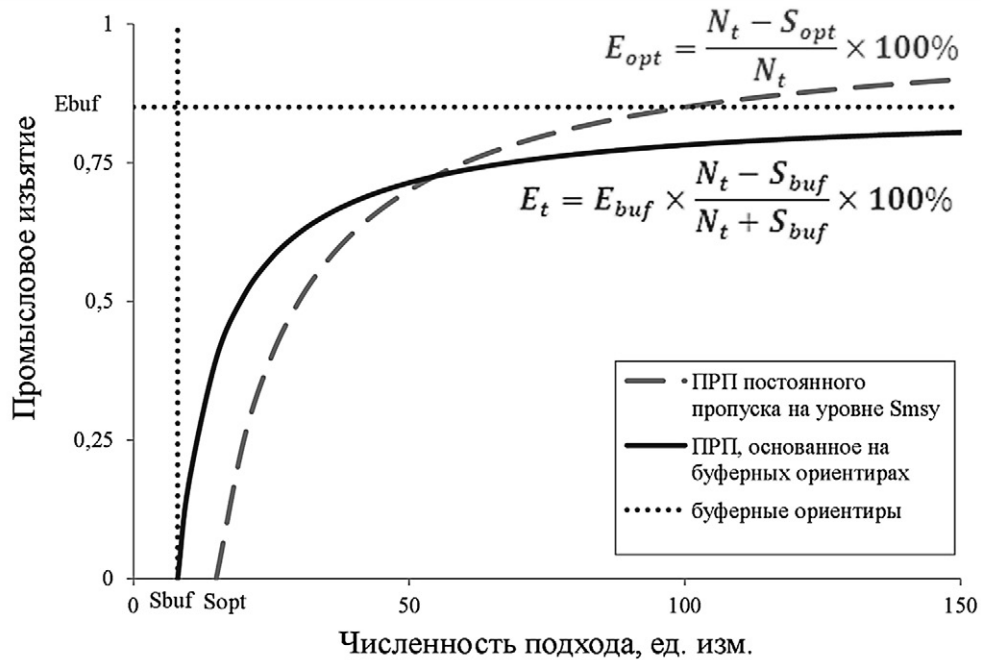


Рис. 5. Правило регулирования промысла (ПРП) с учетом предосторожного подхода (буферные ориентиры).

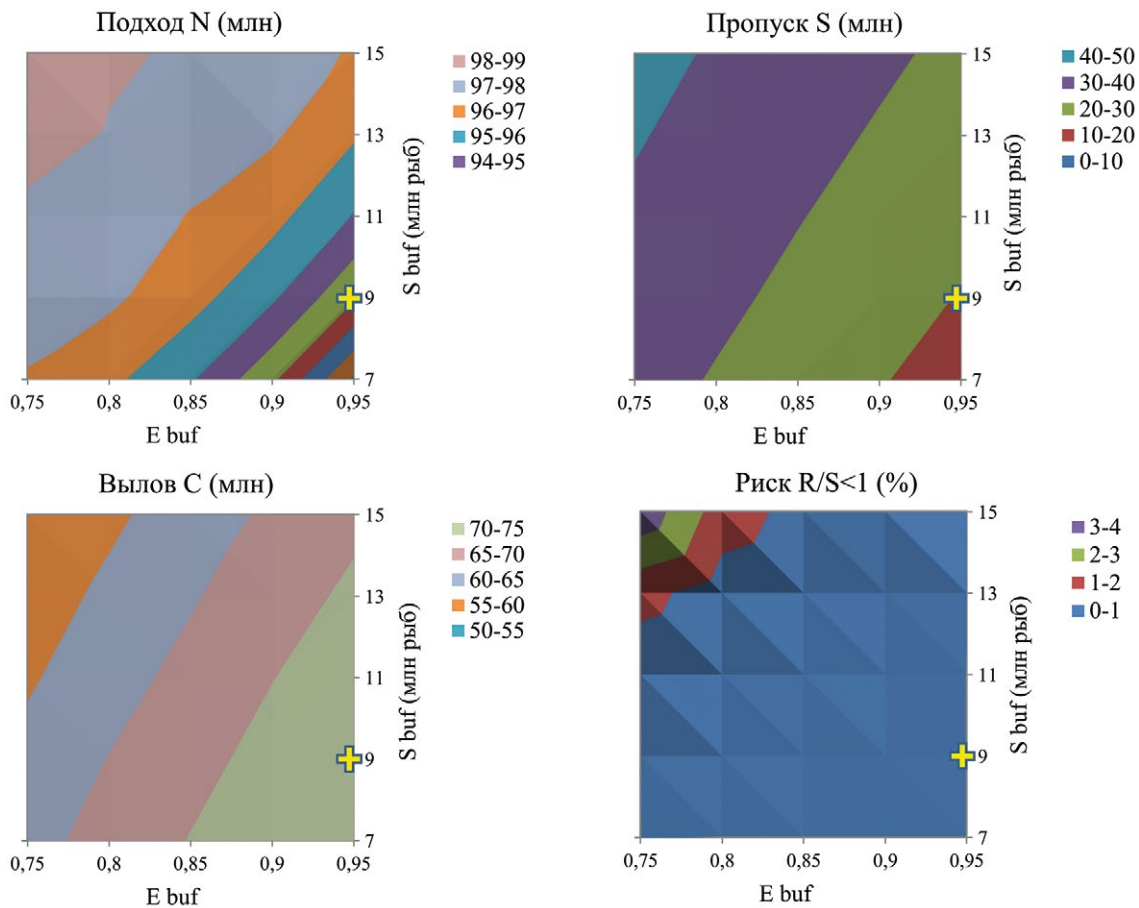


Рис. 6. Тестирование параметров ПРП (буферных ориентиров) и выбор режима управления (отмечено крестом) в соответствии с поставленной целью.

ориентиры управления $S_{buf} = 9$ млн рыб и $E_{buf} = 0,95$ (отмечено на диаграммах крестом). Устойчивость выбранного режима промысла позволяет определить имитация долгосрочной динамики запасов.

Установленный с помощью ПРП уровень промыслового изъятия в Камчатском крае регулируется с помощью соответствующего количества проходных дней. Если режим проходных дней в прибрежье и в реках сбалансирован правильным образом, то достаточно введение одного проходного дня в неделю на морских рыболовных участках, что обеспечивает пропуск 14% (1/7 недели) от общего подхода лососей (Шевляков и др., 2019). Соответственно два проходных дня позволяют пропустить около 29% (2/7 недели), а три дня — до 43% (3/7 недели). Однако в период рунного хода урожайных поколений горбуши в Камчатском крае, решением региональной Комиссии по регулированию добычи (вылова) анадромных видов рыб, проходные дни на морских рыболовных участках отменяют, чтобы не допустить переполнения нерестилищ.

На речных рыболовных участках режим проходных дней может не меняться в течение путины, составляя 2–3 дня. Представленная система проходных дней вполне достаточна для обеспечения необходимого уровня пропуска производителей для устойчивого воспроизводства, так как порядка 80–90% вылова камчатской горбуши осуществляется на морских участках.

Основанием разработки оперативной корректировки прогнозируемого вылова может являться более высокий уровень фактических подходов горбуши в тот или иной центр воспроизводства. Для этих целей, как правило, сравнивается динамика нарастающих уловов в текущий год со среднемноголет-

ними показателями предыдущих лет (например, за последние 5 лет) в соответствии с объемами предварительного прогноза. В случае с горбушей речь идет о терминальных поколениях урожайной или неурожайной линии лет. Как правило, в процессе подготовок корректировок используется информация по годам-аналогам, когда характер динамики промысла был сходен с текущим годом. Объем корректировки прогнозируемого вылова определяется, исходя из расчетной кривой нарастающих уловов и предполагаемых сроков окончания промысла.

В случае если фактический возврат производителей меньше прогнозируемого, включается другой механизм регулирования промысла. В основном увеличивается количество проходных дней для обеспечения необходимого пропуска производителей на нерестилища. В экстренных случаях происходит закрытие промысла по решению региональной Комиссии по регулированию добычи (вылова) анадромных рыб.

Планируется усиление информационной базы подготовки корректировок прогнозируемого вылова горбуши на основе данных учетных траловых съёмок ТИНРО в юго-западной части Берингова моря в июне 2021 г. Это позволит получить актуальную информацию о численности подхода горбуши северо-востока Камчатки (Карагинская подзона) непосредственно перед началом лососевой путины. Аналогичная съёмка для западнокамчатской горбуши традиционно проводится в прикурильских водах северо-западной части Тихого океана в июне — начале июля. Вся, оперативно поступающая информация о численности половозрелой горбуши, послужит одним из базовых компонентов потенциальных корректировок регионального вылова этого вида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численность подходов камчатской горбуши в последнее десятилетие достигла максимальных величин, вместе с тем возросли и ее флуктуации. Сходство трендов динамики подходов горбуши на обоих побережьях Камчатки говорит о масштабном воздействии факторов окружающей среды, испытываемой в настоящее время существенные перестройки вследствие эффекта глобального потепления. Что, естественно, затрудняет прогнозирование данного вида. Вследствие этого прогноз численности подходов горбуши базируется на различных моделях (регрессионные, ансамблевые), теоретически снижающих возможную дисперсию ошибки прогнозирования. Применяемые правила регулирования промысла адаптированы к реальным условиям и основаны на предосторожном подходе, призванном обеспечить максимальную устойчивость запасов к промысловому воздействию и эффективному воспроизводству.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабаян В.К. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ): Анализ и рекомендации по применению: монография. М.: ВНИРО, 2000. 192 с.

Джеймс Г., Уиттон Д., Хастис Т., Тибиш-рани Р. Введение в статистическое обучение с примерами на языке R (пер. С.Э. Мاستицкого). М.: ДМК Пресс, 2016. 450 с.

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

Фельдман М.Г. Использование метода случайных лесов деревьев решений RandomForest в целях прогнозирования подходов горбуши северо-востока Камчатки // Иссл. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-запад. части Тихого океана. 2020. Вып. 59. С. 76–96.

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.

Шевляков Е.А., Фельдман М.Г., Островский В.И. и др. Ориентиры и оперативная оценка пропуска производителей на нерестилища как инструменты перспективного и краткосрочного управления запасами тихоокеанских лососей в реках Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна // Изв. ТИНРО. 2019. Т. 196. С. 23–62

Шитиков В.К., Мастыцкий С.Э. Классификация, регрессия, алгоритмы DataMining с использованием R. Электронная книга, 2017. Адрес доступа: <https://github.com/ranalytics/data-mining>.

Breiman L. «Random Forests» // Machine Learning. 2001. № 45 (1). P. 5–32.

Dempster A.P., Laird N.M., Rubin D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // J. of the royal statistical society. Series B. 1977. № 39 (1). P. 1–38.

Neter J., Wasserman W., Kutner M.H. Applied linear statistical models: regression, analysis of variance, and experimental designs (3rd ed.). Burr Ridge: Irwin, 1990. 1181 с.

Ricker W. Stock and recruitment // J. of the fisheries research board of Canada. 1954. V. 11. № 5. P. 559–623.

Shepherd J.G. A family of general production curves for exploited populations // Math. Biosci. 1982. V. 59. P. 77–93.

DYNAMICS OF ABUNDANCE

MODERN PRINCIPLES OF PINK SALMON (*ONCORHYNCHUS GORBUSCHA*) STOCKS MANAGEMENT IN THE KAMCHATKA REGION (POPULATION DYNAMICS, FORECASTING, FISHING REGULATION)

© 2021 y. M.G. Feldman, A.V. Bugaev

Kamchatka branch Russian Federal research institute of the Fisheries and Oceanography, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683600

The dynamics of the approaches of the pink salmon of the Kamchatka region has undergone significant changes in 2010 years. The increase in the number of runs (catch + escapement) approaches occurs simultaneously with an increase in the range of variability of fluctuations in the fishing stock, which requires constant improvement of the methodology for forecasting approaches. The main forecasting methods of this type used in Kamchatka are considered. Taking into account the large fluctuations in the stock, the rules for regulating the fishery are proposed, based on precautionary management guidelines.

Keywords: pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha*, population dynamics, recruitment, forecasting, fishing management rule.