

Научная статья / Original article  
УДК 597.552.511–116:639.2.03  
doi:10.15853/2072-8212.2022.64.5-34



## ОБОСНОВАНИЕ ПРАВИЛ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛОСОСЕВОГО ПРОМЫСЛА КАМЧАТКИ С УЧЕТОМ КОНЦЕПЦИИ ПРЕДОСТОРОЖНОГО ПОДХОДА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО УСТОЙЧИВОГО ВЫЛОВА

Фельдман Марк Геннадьевич<sup>✉</sup>, Бугаев Александр Викторович, Зикунова Ольга Владимировна, Шубкин Сергей Викторович, Дубынин Владимир Александрович

Камчатский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («КамчатНИРО»), Петропавловск-Камчатский, Россия, [feldman.m.g@kamniro.ru](mailto:feldman.m.g@kamniro.ru)<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Проведенные исследования динамики численности тихоокеанских лососей Камчатки позволили разработать единую схему правил регулирования промысла (ПРП) для наиболее значимых региональных единиц запасов. В качестве первичных рядов наблюдений использованы данные о подходах, пропуске и вылове лососей в 1990–2010-е гг. В работе представлены теоретические и математические принципы разработки ПРП, основанные на использовании моделей «запас – пополнение». Моделирование ПРП выполнено с учетом предосторожного подхода воздействия на лососевые запасы, что обеспечивает сохранение нерестового фонда и поддержание численности подходов (возвратов) выше критической отметки (буферного ориентира). Последнее позволяет формировать условия для достижения максимального устойчивого вылова (MSY) тихоокеанских лососей Камчатки. В настоящее время подобный подход к управлению промыслом является неперменной экологической нормой международных принципов рационального использования водных биологических ресурсов. Кроме того, в статье показаны варианты практического применения разработанных моделей ПРП на примере прогнозных материалов по оценке возвратов крупнейших единиц лососевых запасов Камчатки в 2022 г.

**Ключевые слова:** тихоокеанские лососи Камчатки, регулирование промысла, модели «запас-пополнение», максимальный устойчивый вылов

**Для цитирования:** Фельдман М.Г., Бугаев А.В., Зикунова О.В., Шубкин С.В., Дубынин В.А. Обоснование правил регулирования лососевого промысла Камчатки с учетом концепции предосторожного подхода и обеспечения максимального устойчивого вылова // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. № 64. С. 5–34.

## SUBSTANTIATION OF THE HARVEST CONTROL RULES FOR SALMON FISHERY IN KAMCHATKA IN VIEW OF THE CONCEPT OF PRECAUTIONARY APPROUCH AND PROVIDING THE MAXIMUM SUSTAINABLE YIELD

Mark G. Feldman<sup>✉</sup>, Alexandr V. Bugaev, Olga V. Zikunova, Sergey V. Shubkin, Vladimir A. Dubynin

Kamchatka Branch of Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (“KamchatNIRO”), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, [feldman.m.g@kamniro.ru](mailto:feldman.m.g@kamniro.ru)<sup>✉</sup>

**Abstract.** The provided researches on the stock abundance dynamics of Pacific salmon in Kamchatka allowed to work out a unite scheme of harvest control rules (HCR) for the most important regional stock utits. The basis data used included the run, escapement and catch in the 1990–2010s. Theoretical and mathematical principles of substantiation the HCR, based on the use of models “stock recruitment”, are demonstrated in the article. Modeling the HCRs is made in view of precautional approach to effects on salmon stocks, what provides keeping safe the spawning stock and supporting the runs (returns) above the critical mark (buffer reference point). The latter allows to form conditions for the maximum sustainable yield (MSY) of Pacific salmon in Kamchatka. For now similar approach to the fishery management is indispensable environmental standard of international principles of the rational use of aquatic biological resources. Moreover practical applications of the HCR models suggested are demonstrated in examples of predicted estimates of the returns of the biggest units of salmon stocks of Kamchatka in 2022.

**Keywords:** Kamchatka pacific salmon, fishery management, “stock-recruitment” models, maximum sustainable yield

**For citation:** Feldman M.G., Bugaev A.V., Zikunova O.V., Shubkin S.V., Dubynin V.A. Substantiation of the harvest control rules for salmon fishery in Kamchatka in view of the concept of precautionary approach and providing the maximum sustainable yield. The researchers of the aquatic biological resources of Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean. 2022. Vol. 64. P. 5–34. (In Russian)

В конце XX в. была разработана концепция предосторожного подхода для регулирования рыболовства (Бабаян, 2000). В начале XXI в. предложенную меру в качестве обязательного методического подхода приняли для определения общего допустимого улова (ОДУ) водных биологических ресурсов как в Российской Федерации, так и в других странах. В значительной степени введение концепции предосторожного подхода связано с необходимостью управления трансграничными рыбными запасами в различных районах Мирового океана. В связи с этим в 1995 г. на международном уровне приняли «Кодекс ведения ответственного рыболовства» (FAO, 1995), в котором была представлена рекомендация о применении предосторожного подхода к управлению запасами на все без исключения водные биологические ресурсы. В тот же год приняли «Соглашение об осуществлении положений Конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву от 10 декабря 1982 г., которые касаются сохранения трансграничных рыбных запасов и запасов далеко мигрирующих рыб и управления ими» (UN, 1995). В России данный документ ратифицировали Федеральным законом № 69-ФЗ от 26.04.1997. В указанном Соглашении уже был узаконен ряд экологических и рыболовных ограничений, которые впоследствии предусматривались концепцией предосторожного подхода подготовки ОДУ.

Одним из базисов предосторожного подхода является учет неопределенностей, связанных как с антропогенным воздействием, так и с природными процессами. Первоначально, применительно к стратегии изъятия водных биоресурсов, предосторожный подход заключался в использовании в правилах регулирования промысла двух основных ориентиров — целевых и граничных (Бабаян, 2000). Целевые ориентиры — ориентиры управления, характеризующие оптимальное состояние системы «запас — промысел» по биомассе/численности и интенсивности рыболовства относительно выбранной цели регулирования. Используются для обозначения уровневого показателя необходимого нерестового запаса, обеспечивающего максимальный устойчивый вылов (по международной терминологии — Maximum Sustainable Yield (MSY)). Граничные ориентиры — ориентиры управления, определяющие область биологически безопасного управления по биомассе/численности и интенсивности промысла без учета неопределенностей. Даль-

нейшая эволюция теоретических принципов формирования предосторожного подхода управления запасами привела к переориентации целевых или граничных ориентиров к буферным (или пороговым) критериям. Это позволило учитывать возможные неопределенности при использовании той или иной модели промысла.

Концепция MSY стала одной из наиболее распространенных моделей промысла в мировой практике. Она предусматривала промысловую эксплуатацию запасов диких гидробионтов путем максимизации среднемноголетнего улова. Первоначально эта концепция строилась на предположении об относительной устойчивости среды их обитания. Однако в современной интерпретации допускаются изменения жизненно важных внешних факторов и, следовательно, варьирование связанных с ними биологических параметров эксплуатируемого запаса.

До середины 2010-х гг. концепции предосторожного подхода и MSY использовали только для видов водных биоресурсов, управление запасами которых осуществляли на основе прогнозов ОДУ. Как правило, в большинстве случаев речь шла о морских гидробионтах, и в меньшей степени — о пресноводных. Именно для данной группы водных биоресурсов были разработаны различные модели правил регулирования промысла (ППП), которые позволили внедрить в практику концепции управления запасами с помощью предосторожного подхода и MSY.

В отношении анадромных видов рыб подобные исследования начали позднее. В основном это было связано с тем, что современная форма регулирования промысла данной группы гидробионтов предусматривала корректировку объемов прогнозируемого вылова (ПВ) в течение путины по мере накопления актуальной информации о фактических подходах (возвратах) производителей к нерестовым водоемам. Однако усилившиеся требования к созданию условий для обеспечения устойчивого рыболовства привели к необходимости обоснования ППП в рамках концепций предосторожного подхода управления запасами и MSY также и для анадромных видов рыб. В основном речь идет о наиболее ценной и многочисленной части их запасов — тихоокеанских лососях.

В 2016 г. специалистами КамчатНИРО были выполнены первые методические разработки ППП для предосторожного подхода управления

запасами тихоокеанских лососей Камчатского края. В данном случае биологические ориентиры управления строили, исходя из базовых связей «родители – потомство», полученных для различных временных уровней численности отдельных видовых единиц запасов. При этом концепция предосторожного подхода фактически обосновывает использование предосторожных или буферных ориентиров пропуски производителей тихоокеанских лососей на нерест в основные промыслово-значимые водные объекты Камчатки, что в перспективе обеспечивает соответствующий MSY (Фельдман и др., 2016, 2018, 2019). На основе результатов этих исследований в 2017–2021 гг. в практике прогнозирования численности камчатских лососей стали применять адаптивные модели ПРП с использованием буферных ориентиров управления. В настоящее время аналогичный подход применен и при разработке ПРП для крупнейших стад кеты и нерки Чукотки (Шевляков и др., 2021).

Тем не менее непосредственно в отношении запасов тихоокеанских лососей Камчатского края представленная тематическая работа является первой, где обобщены накопленные теоретические и практические результаты моделирования ПРП. Учитывая, что в 2010-е гг. в данном регионе добывали порядка 60–70% лососей Дальнего Востока России (Бугаев и др., 2020), можно утверждать, что представленные результаты исследований по формированию ПРП имеют большое значение не только для лососевых запасов Камчатского края, но и в целом для Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна.

Цель настоящей работы — представить результаты методической разработки модельных принципов и обоснование ПРП для основных единиц запасов тихоокеанских лососей Камчатского края.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе использованы временные ряды статистики промысла и оценок заполнения нерестилищ тихоокеанских лососей Камчатского края за период 1992–2020 гг. Данные о вылове предоставлены Северо-Восточным территориальным управлением Росрыболовства. Оценки заполнения нерестилищ тихоокеанских лососей получены по данным авиаучетных съемок, ежегодно выполняемых специалистами КамчатНИРО. Аэровизуальный учет нерестовых запасов лососей в реках Камчатки

базируется на единой методике, разработанной в конце 1950-х гг. (Остроумов, 1962, 1975). Общее положение данной методики включает использование площадного зонирования оконтуренных нерестовых скоплений производителей на нерестилищах в бассейнах исследуемых рек. В 2010-е гг. методика авиаучета была скорректирована с ориентацией на проведение целевых исследований на нерестилищах наиболее промыслово-значимых (реперных) водных объектов (Шевляков, Маслов, 2011). Это позволило значительно сократить финансовые затраты и время на проведение данных работ без существенной потери уровня информационной обеспеченности, так как в реперных водных объектах воспроизводится порядка 80% запасов тихоокеанских лососей Камчатского края.

Определение целевых и граничных ориентиров по пропуску на нерест у большинства камчатских лососей основано на адаптированных классических моделях типа «запас – пополнение» (Ricker, 1954; Shepherd, 1982). В случае с горбушей использовали стратифицированные модели, которые базируются на аналогичной зависимости, но с учетом изменчивости численности основных единиц запасов вида, что позволяет выделить отдельные временные уровни состояния запасов (Фельдман, Шевляков, 2015; Фельдман, Бугаев, 2021).

Статистическая и графическая обработка данных, а также моделирование ПРП выполнены с использованием математического пакета программы MS Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная работа отражает результаты двух направлений исследований — методического и оценочного. Поэтому результаты включают разработку модельной концепции правил регулирования промысла (ПРП) с учетом предосторожного подхода управления промыслом и обеспечения максимального устойчивого вылова (MSY), а также примеры практического использования разработанных ПРП для основных единиц запасов тихоокеанских лососей Камчатского края. Практический раздел включает расчет ПРП, реально выполненных при подготовке материалов прогнозов численности камчатских лососей на путину 2022 г.

Общая структура представленных результатов исследований включает следующие разделы: 1) Выбор целей управления промыслом; 2) Формулирование ПРП; 3) Разработка ими-

тационной модели динамики запаса; 4) Тестирование параметров ПРП и их выбор в соответствии с целями управления промыслом; 5) Обоснование ПРП для основных единиц запасов.

### Выбор целей управления промыслом

Принципы формирования ПРП должны быть согласованы с положениями предосторожного подхода управления промыслом и базовыми характеристиками концепции MSY. Подчеркнем, что изначально данные условия в основном распространялись в отношении водных биоресурсов при подготовке прогнозов ОДУ (Бабаян, 2000), то есть полициклических видов рыб, беспозвоночных и морских млекопитающих. Однако в отношении моноциклических видов, в частности тихоокеанских лососей, также возможно применение указанных принципов. Существенным отличием последних является тот факт, что промысловый запас данной группы рыб формируется единовременно по достижении половой зрелости. Поэтому конечный результат регулирования рыболовства тихоокеанских лососей должен быть сбалансирован по уровню промыслового изъятия и дальнейшему формированию нерестового запаса. Следовательно, базовыми целями для управления лососевым промыслом могут быть приняты следующие положения:

1. Соответствие среднесноголетнему вылову отдельных единиц запасов величине MSY;

2. Риск появления малочисленных поколений эксплуатируемых единиц запасов должен быть минимизирован.

По первому пункту следует особо подчеркнуть, что соответствовать величине MSY должен именно среднесноголетний вылов, так как использование фиксированных значений вылова в конкретный год для таких высокофлуктуирующих по численности видов как тихоокеанские лососи, не даст объективной картины. По второму пункту в качестве показателя риска малочисленных поколений мы предлагаем использовать соотношение потомков ( $R$ ) и родителей ( $S$ ) в поколении. Если количество потомков меньше количества родителей ( $R/S < 1$ ), то такое поколение будет считаться малочисленным.

Применительно к запасам тихоокеанских лососей ориентиры управления могут быть выражены следующим образом:

1. Ориентиры по пропуску (заполнение нерестилищ):

$$S_{\text{lim}} < S_{\text{buf}} < S_{\text{opt}},$$

где:  $S$  — количество пропущенных на нерест родителей (производителей),

$S_{\text{lim}}$  — нижний граничный ориентир пропуска,  $S_{\text{buf}}$  — буферный (предосторожный) ориентир пропуска,

$S_{\text{opt}}$  — оптимальный (целевой) ориентир пропуска.

2. Ориентиры по эксплуатации (промысел):

$$E_{\text{lim}} < E_{\text{buf}} < E_{\text{opt}},$$

где:  $E$  — доля промышленного изъятия (в пределах от 0 до 1 или от 0 до 100%),

$E_{\text{lim}}$  — нижний граничный ориентир изъятия (эксплуатации),

$E_{\text{buf}}$  — буферный (предосторожный) ориентир изъятия (эксплуатации),

$E_{\text{opt}}$  — оптимальный (целевой) ориентир изъятия (эксплуатации).

### Формулирование ПРП

В отношении тихоокеанских лососей рациональное использование запасов базируется на стратегии, основанной на принципах обеспечения оптимальной величины пропуска производителей на нерест, предполагающей максимальную эффективность их воспроизводства и формирование максимального устойчивого вылова. Понятие оптимума заполнения нерестилищ подразумевает определение некоей фиксированной величины производителей, достаточной для эффективного воспроизводства конкретной единицы запасов. Следовательно, разница между численностью общего подхода (возврата) лососей и оптимумом пропуска будет определять количество рыб, которые могут быть изъяты промыслом. Таким образом, оптимальная доля промыслового изъятия (эксплуатации) составит:

$$E_{\text{opt}} = \frac{N_t - S_{\text{opt}}}{N_t} \times 100\%, \quad (\text{ф. 1})$$

где  $N_t$  — общий подход (возврат) производителей в какой-либо год  $t$ .

Подобный методический принцип можно считать оптимальным (по целевым ориентирам) правилом регулирования промысла (ПРП<sub>opt</sub>). Тем не менее в реальности соблюдение условий данного правила не всегда возможно. Это обусловлено следующими причинами:

1. Согласно ПРП<sub>opt</sub>, промысел должен изымать всегда только разницу между общим подходом и пропуском, соответствующим  $S_{\text{opt}}$ . Однако в большинстве случаев добыча тихоокеанских лососей ведется в режиме многовидового промысла. Поэтому при относительно низких подходах одного из видов общее изъятие все равно будет осуществляться. Разумеется, если

численность какого-либо вида не окажется ниже критического уровня, когда воспроизводство будет невозможно. Соответственно, при этих условиях достичь  $S_{opt}$  будет невозможно.

2. Обратная ситуация будет наблюдаться в случае чрезвычайно высоких подходов лососей, когда будет невозможно поддерживать оптимальный темп их изъятия, что приведет к более высокому уровню пропуска производителей на нерестилища. Основными причинами этого может быть нехватка мобильных или стационарных добывающих и перерабатывающих мощностей, складских холодильных приемников для хранения продукции и т. п.

3. При фактических низких и средних подходах лососей возможно повышение промысловой нагрузки на запас, что приведет к невозможности выполнения условия  $S_{opt}$ . Подобное обычно возможно при недостаточном контроле промысла или ошибке прогнозирования динамики запаса, когда прогнозируемый подход был значительно выше фактического. Это доказывается математически, так как предел модели  $E_{opt}$  (ф. 1) при неограниченном запасе равен 100%, что предусматривает сведение нерестового запаса к нулю. Иными словами, у ПРП<sub>opt</sub> нет предосторожного ориентира по эксплуатации.

При рассмотрении зависимости «запас – пополнение» с использованием достаточно продолжительных рядов наблюдений может сложиться мнение, что оптимум пропуска – это

просто усредненная величина, которая в разные временные периоды изменяется как в большую, так и меньшую сторону. Причем тот показатель пропуска, который на определенном временном этапе будет считаться оптимумом, в другой период, наоборот, будет являться избыточным или недостаточным. Поэтому можно говорить о достаточно высоком уровне неопределенности показателя  $S_{opt}$ , что связано не только с субъективными причинами (ошибки моделирования, неточности измерений и т. п.), но и с объективными – нестационарностью природных процессов (рис. 1).

При этом следует учитывать, что формирование системы стабильного пропуска производителей на единожды определенном количественном уровне в течение некоторого достаточно продолжительного времени ограничивает исследователей в информации о реакции запаса на какие-либо существенные изменения среды (Хилборн, Волтерс, 2001). В этом случае, как правило, модель «запас – пополнение», лежащая в основе определения оптимума, теряет актуальность и требует пересмотра. Однако все поступающие новые данные имеют сходную вариабельность переменных (численность пропуска), что не позволяет определить новый тренд для корректировки ПРП.

В свете вышесказанного можно заключить, что отклонения уровня пропуска от жестко зафиксированного оптимума как минимум не несут угрозы воспроизводству конкретной еди-

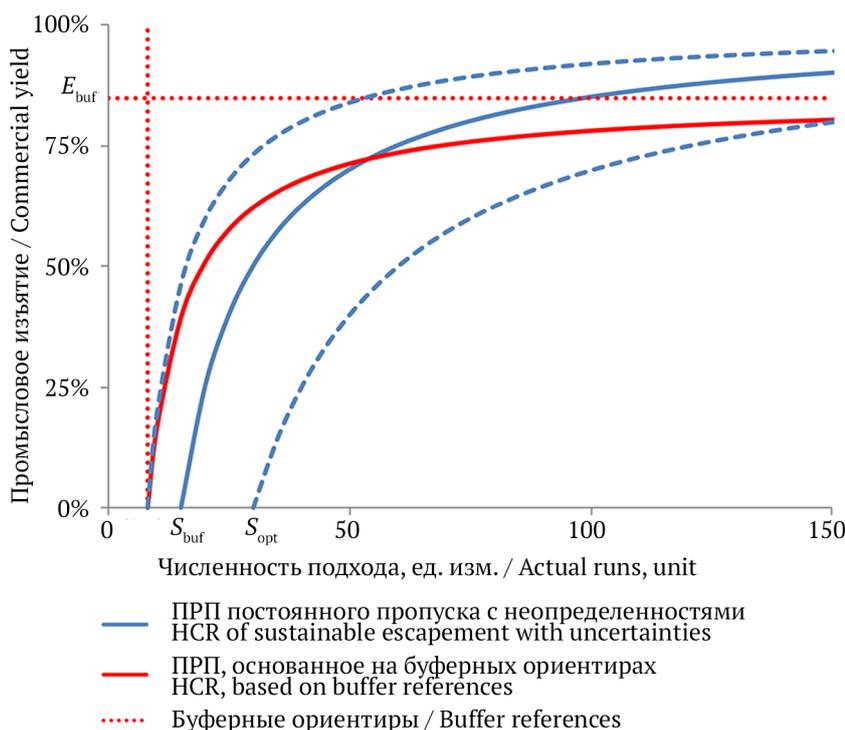


Рис. 1. Схема отображения формы ПРП, основанных на целевых (с неопределенностями) и буферных ориентирах пропуска тихоокеанских лососей на нерест  
Fig. 1. The scheme of the HCRs (Harvest control rules) based on the target (with uncertainties) and buffer references of the Pacific salmon spawning escapement

ницы запасов. Вероятнее, даже наоборот: варьирование уровня отклонений в пределах безопасного интервала может быть полезнее для определения соотношения достижения целей по определению максимального возможного вылова и эффективного воспроизводства.

В связи с этим была поставлена задача адаптировать ПРП<sub>opt</sub> к реальной ситуации. С одной стороны, для достижения этой цели необходимо сделать пропуск не постоянным, а распределенным (гибким, подстраиваемым под численность возврата). С другой стороны, сделать среднесуточный пропуск равным целевому ориентиру (тому самому оптимуму) и оставить в рамках неопределенности оптимума. В то же время считаем нужным применить предосторожный подход к разработке ПРП<sub>buf</sub>, то есть пропуск не должен быть ниже буферного ориентира. Иными словами, задача поставлена таким образом, чтобы в точках экстремума численности запаса кривая ПРП<sub>buf</sub> проходила от минимальной допустимой границы оптимального пропуска до минимальной допустимой границы режима эксплуатации.

В соответствии с поставленной задачей, модель оптимального изъятия (ф. 1) изменяется в два шага.

На первом шаге добавляется буферный ориентир по эксплуатации  $E_{buf}$ , исключающий возможное чрезмерное изъятие. К примеру, его можно сделать равным оптимальной доле изъятия для максимального наблюдаемого подхода. Этот параметр ограничивает предел ПРП, делая эксплуатацию выше этого уровня недопустимой:

$$E_t = E_{buf} \times \frac{N_t - S_{opt}}{N_t} \times 100\%, \quad (\text{ф. 2})$$

где  $E_t$  — уровень эксплуатации в какой-либо год  $t$  ( $0 < E_{buf} < 100\%$ ).

Второй шаг разрешает промысел при малочисленном подходе ниже среднего оптимального пропуска  $S_{opt}$ , но не ниже его минимальной оценки  $S_{buf}$ . Дополнительно, чтобы ограничить изъятие при небольших подходах, следует усилить знаменатель модели этим же параметром для снижения доли изъятия:

$$E_t = E_{buf} \times \frac{N_t - S_{buf}}{N_t + S_{buf}} \times 100\%. \quad (\text{ф. 3})$$

Таким образом, получаем модель ПРП<sub>buf</sub>, основанную только на предосторожных буферных ориентирах управления. При этом целевой ориентир можно использовать для сверки с имитационным по ПРП<sub>opt</sub>. Ранее на рис. 1 было представлено сравнительное графическое

представление ПРП на основе указанных ориентиров. Исходя из полученных данных, можно сформулировать основные условия ПРП<sub>buf</sub>:

1. При величине подхода (возврата) выше величины буферного ориентира пропуска ( $N_t > S_{buf}$ ) доля изъятия (эксплуатации) описывается моделью (ф. 3).

2. При величине подхода (возврата) ниже величины буферного ориентира пропуска ( $N_t < S_{buf}$ ) промысел должен быть запрещен.

### Разработка имитационной модели динамики запаса

В соответствии с оценкой стратегии управления запасами водных биоресурсов (по международной терминологии — management strategy evaluation (MSE)) (Walters, Hilborn, 1976; Holland, 2010), необходимо изучить — какие параметры ПРП<sub>buf</sub> лучше подходят для достижения целей управления промыслом. Кроме того, необходимо также с помощью имитационного тестирования параметров управления выяснить устойчивость ПРП<sub>buf</sub> к неопределенностям.

В нашем случае имитационная модель динамики запаса состоит из следующих объектов:

#### 1 Данные

1.1 Исходные данные вылова  $S$ , пропуска на нерест  $S$  и возрастного состава

1.2 Производные данные, полученные из исходных:

– общий подход (сумма выловленной и пропущенной на нерест рыбы),

– доля промыслового изъятия или эксплуатация (отношение вылова к общему подходу),

– пополнение (рассчитывается на основе возрастного состава в подходе, для горбуши, имеющей одну возрастную группу 1+, пополнение равно общему подходу через два года),

– коэффициент воспроизводства (кратность возврата), иначе — количество потомков на родителя (отношение пополнения к пропуску)

#### 2 Имитационная модель динамики запаса

2.1 Модель зависимости пополнения от родительского запаса

2.2 Стохастическая модель для отклонений пополнения. В простейшем случае отклонения модельного пополнения от фактического можно описать каким-либо законом распределения. В нашей имитационной модели мы попытались добиться того, чтобы распределение показателей стандартных отклонений оценок для запаса, рассчитанного вперед, как можно более походило на наблюдаемое распределение

в имеющемся наборе данных. Модель состоит из трех элементов:

- среднего, имеющего циклическую динамику во времени
- стандартного отклонения, зависящего от величины пополнения (с ростом величины пополнения ошибка подсчета уменьшается)
- собственно белого шума

2.3 Модель промышленного изъятия двух видов:

- для настройки имитационной модели запаса, наблюдаемого в исторической перспективе изъятия (тестирования имитационной модели)
- собственно правило регулирования промысла

3 Выбор целей управления промыслом:

3.1 Среднемноголетний максимальный устойчивый вылов

3.2 Среднемноголетний минимальный риск появления малочисленных поколений

4 Выбор параметров ПРП<sub>buf</sub> с помощью их тестирования на имитационных бутстреп-выборках запаса

На рисунке 2 представлена блок-схема работы для построения имитационной динамики запаса и дальнейшего выбора параметров ПРП<sub>buf</sub>. Данный подход позволяет провести тестирование параметров используемой модели с учетом целей управления промыслом.

В качестве зависимости «запас – пополнение» при построении имитационной динамики запаса и определении ориентиров управления была использована резонансная модель (Фельдман, Шевляков, 2015), основанная на предположении наличия максимума относительной выживаемости (т. е. показателя  $R/S$ ) при определенном количестве родительского запаса. Модель имеет следующий вид:

$$R = aS^2 / \sqrt{(S_0^2 - S^2)^2 + b^2 S^2}, \tag{ф. 4}$$

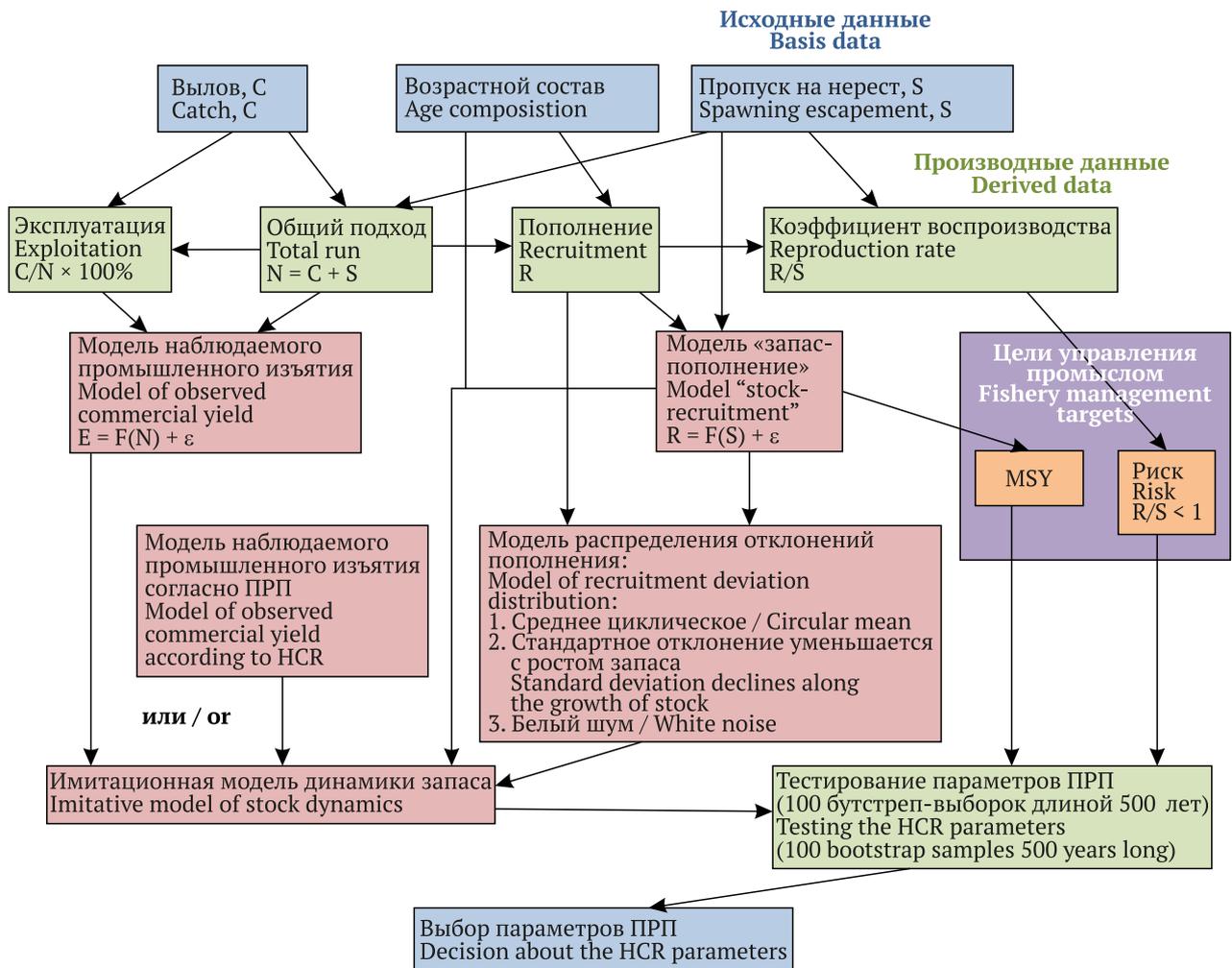


Рис. 2. Генерализированная блок-схема работы для построения имитационной модели динамики запаса и дальнейшего выбора параметров ПРП<sub>buf</sub> (далее – ПРП)  
 Fig. 2. The generalized block-scheme of the algorithm for making an imitative model of stock dynamics and further decision about the parameters HCR<sub>buf</sub> (hereinafter HCR)

где:  $S_0$  — запас, обеспечивающий максимум индекса выживаемости  $R/S$ ,

$a$  — предел пополнения при неограниченном родительском запасе,

$b$  — нерестовый запас, необходимый для продуцирования пополнения  $a$  при максимальной выживаемости.

В частных случаях используемый резонансный подход аналогичен следующим моделям «запас – пополнение»: Бивертон–Холта — при  $b \gg S_0$  (Beverton, Holt, 1957); «хоккейной клюшки» — при  $b > S_0$  (Barrowman, Myers, 2000); Криксунова–Снеткова — при  $b \leq S_0$  (Криксунов, Снетков, 1985). Выбор резонансной модели обусловлен наличием у нее еще одной точки равновесия в области малых подходов, а биологический смысл данной точки совпадает с формулировкой граничного ориентира. Конечно, существуют также аналогичные депенсационные формы уравнений «рикеровского» типа за счет введения третьего дополнительного параметра, но при этом теряется биологический смысл параметров модели. Следовательно, используя данную модель, мы получаем возможность определить граничные ориентиры, а также и их предосторожные оценки — буферные ориентиры, что позволяет сформулировать ПРП<sub>буф</sub>. Такой модельный путь представляется нам более обоснованным, чем экспертная оценка граничного ориентира. Принимая во внимание, что в дальнейшем изложении результатов работы используются только ПРП с буферными ориентирами, предлагается данную аббревиатуру унифицировать для всех аналогичных моделей.

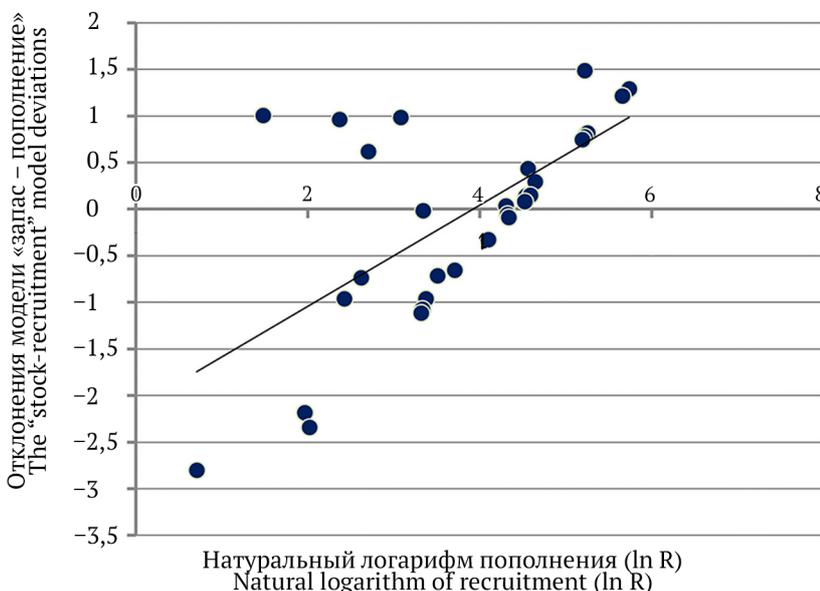


Рис. 3. Зависимость остатков модели «запас – пополнение» от целевой переменной (на примере горбуши Северо-Восточной Камчатки)  
Fig. 3. The dependence of the residuals of the “stock-recruitment” model on the target variable (on the example of pink salmon of North-East Kamchatka)

### Тестирование параметров ПРП и их выбор в соответствии с целями управления

При анализе взаимосвязи «запас – пополнение», на примере запасов горбуши Северо-Восточной Камчатки, отмечено, что стандартные ошибки моделей имеют линейную зависимость от фактических значений запаса (рис. 3). Это повышает потенциальную ошибку данных моделей. Следовательно, на следующем этапе необходимо избавиться от данного линейного тренда путем его вычитания. Данная процедура проводилась не для всего набора отклонений, а для временного окна длиной в несколько лет (как правило, на выбор исследователя, от 5 до 9 лет). После вычитания тренда в таком окне для оставшихся ошибок вычисляли стандартное отклонение и далее осуществляли сдвиг окна на одно наблюдение вперед, после чего процедуру повторяли заново. Таким образом, получили ряд значений скользящего стандартного отклонения для детрендированных остатков, зависимость которых от соответствующего модельного пополнения, полученного как скользящее среднее с тем же окном, можно хорошо аппроксимировать с помощью модели обратного нормального распределения (рис. 4).

Моделирование стандартного отклонения ошибок ( $C$ ) можно представить в следующем виде:

$$C = -O(d; e) + c + Q, \quad (\text{ф. 5})$$

где:  $C$  — стандартное отклонение ошибок модели,

$O$  — обратное нормальное распределение,

$Q$  — белый шум остатков модели для стандартного отклонения,

$d, e, c$  — оцениваемые параметры обратного нормального распределения.

Наглядным результатом процедуры исключения тренда является то, что спектральная плотность остатков до и после фильтрации существенно меняется (рис. 5). В результате нивелируется их цикличность, которую потом можно вернуть при моделировании параметра  $M$  (среднее модельных остатков). Как показано на примере запаса горбуши Северо-Восточной Камчатки, остатки от модели «запас – пополнение» имеют циклы 2, 2,25 и 8 лет (Фельдман,

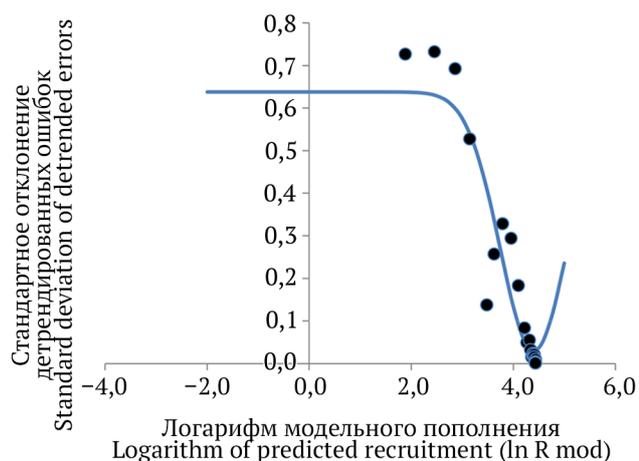


Рис. 4. Изменение скользящего стандартного отклонения детрендрованных ошибок (окно 5 лет) в зависимости от скользящего среднего модельного пополнения с тем же окном (на примере горбуши Северо-Восточной Камчатки)

Fig. 4. The dynamics of the moving standard deviation of detrended errors (window of 5 years) depending on the moving average of predicted recruitment with the same window (on the example of pink salmon of North-East Kamchatka)

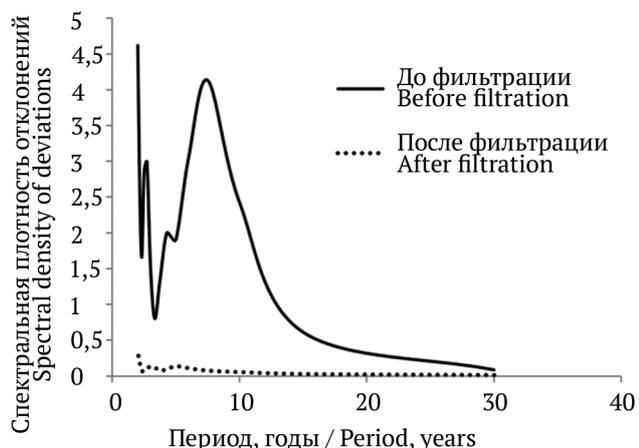


Рис. 5. Спектральное распределение остатков модели «запас – пополнение» до и после фильтрации (на примере горбуши Северо-Восточной Камчатки)

Fig. 5. The spectral distribution of residuals of the “stock-recruitment” model before and after filtration (on the example of pink salmon of North-East Kamchatka)

Шевляков, 2015). Первый цикл связан с периодом жизни поколений горбуши, остальные потенциально связаны с квазидвухлетними климатическими колебаниями.

Выше указано, что модельные остатки по данным спектрального анализа Фурье имеют ярко выраженную цикличность, следовательно, среднее ошибок, которое мы обозначили как  $M$ , можно представить как неслучайную величину, изменяющуюся по закону гармонического колебания:

$$M = A \times \cos \frac{2\pi t}{T}, \tag{ф. 6}$$

где:  $M$  — среднее ошибок,  
 $A$  — амплитудный коэффициент,  
 $T$  — период,  
 $t$  — время.

Стохастичность в модели для среднего можно представить в имитации, если задать стартовое значение  $t$  как равномерно распределенную случайную целочисленную величину между, например, 1 и 9 годами (т. к. 9 лет — первое близкое к целочисленному значению для периода 2,25 года). Графически результаты имитации для наблюдаемой фактической зависимости «родители – потомки» и для аналогичной зависимости, полученной с помощью ПРП, представлены на рисунке 6.

Сравнивать отклонения имитационной модели от фактических отклонений с помощью коэффициента корреляции не имеет смысла: при различных случайных выборках коэффициент корреляции будет изменяться по всему своему диапазону от минус 1 до 1. Собственно, задача имитационной модели состоит не в том, чтобы добиться высокого совпадения с наблюдаемой динамикой, а в том, чтобы кроме основных тенденций формирования запаса (связь запаса и пополнения, а также их временная цикличность) учесть неопределенности или шумы. В данном случае визуальной оценки сравнительной динамики размаха и циклики фактических и имитационных рядов переменных отклонений вполне достаточно (рис. 7).

Напомним, что целью ПРП является достижение максимального устойчивого вылова (MSY) при минимальном риске появления неурожайных поколений. Учитывая, что используемая нами модель ПРП (ф. 3) определяется только буферными ориентирами по запасам ( $N_t \pm S_{buf}$ ) и эксплуатации ( $E_{buf}$ ), целевые ориентиры будут использоваться для сверки со средними имитационными значениями этих параметров. Выбор параметров управления про-

мыслем производится на основе их тестирования на искусственных имитациях динамики запаса на достаточно продолжительный срок, чтобы учесть долговременные эффекты.

В наших исследованиях тестирование имитационных моделей выполняли с помощью бутстреп-выборок. Стабильность получаемого результата проверяли на основе множества бутстреп-оценок (для камчатских лососей выполняли повтор 100 раз). Оптимальные значения этих параметров можно найти с помощью трехмерных диаграмм поверхности, включающих указанные значения управляющих параметров ПРП (рис. 8). На представленном примере видно, что макси-

мальный вылов находится в следующих диапазонах: от 80% и выше для параметра  $E_{buf}$  и 8–18 ед. пропуска для параметра  $S_{buf}$  (выделено красными границами на рис. 8А). При выборе минимального допустимого риска появления малочисленных поколений ( $R/S < 1$ ) не более 10% приемлемая область параметров управления имеет треугольную форму (выделено красными границами на рис. 8Б). Очевидно, что наилучшим выбором параметров ПРП для максимального вылова будет пара на уровне  $S_{buf} = 10$  ед. пропуска и  $E_{buf} = 0,95$  (95%) вылова. Эти показатели будут являться местом пересечения двух областей (маркер — желтый крест).

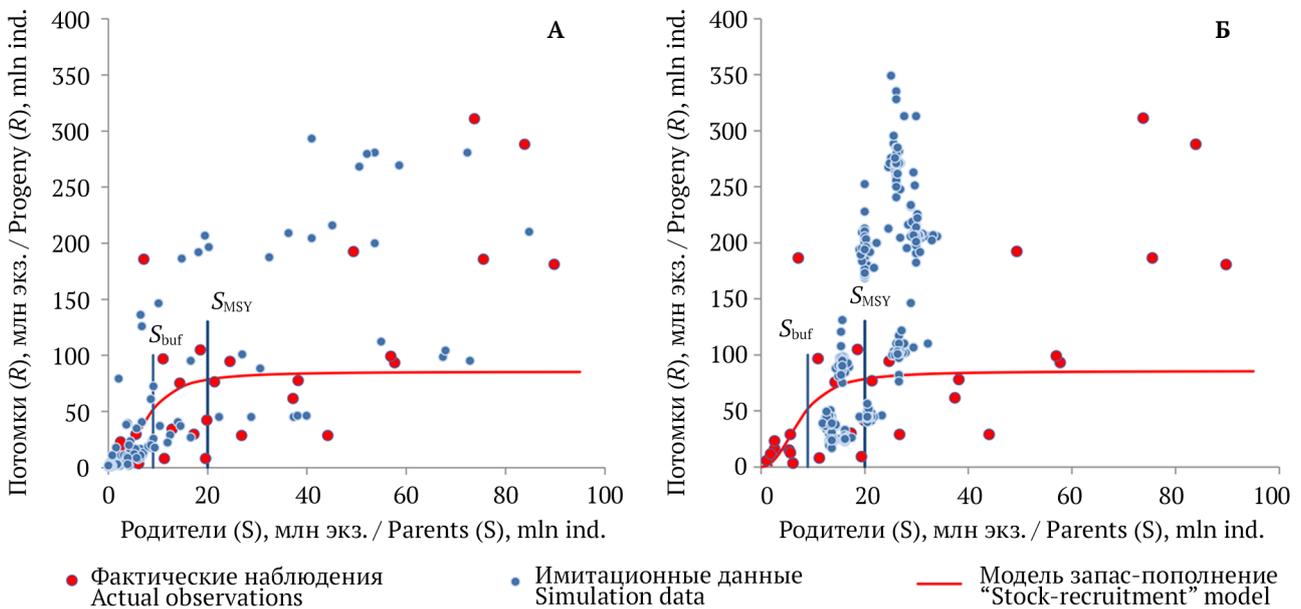


Рис. 6. Данные, полученные с помощью имитационной модели запаса (на примере горбуши Северо-Восточной Камчатки): А — симуляция наблюдаемых значений родителей и потомков, Б — симуляция значений родителей и потомков при использовании ПРП;  $S_{MSY}$  — целевой ориентир пропуска, обеспечивающий максимальный устойчивый вылов;  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска с учетом предосторожного подхода

Fig. 6. The data obtained with the use of stock imitation model (on the example of pink salmon of North-East Kamchatka): А — simulation of the observed values of parents and progeny, Б — simulation of the values of parents and progeny using the HCR:  $S_{MSY}$  — the escapement target reference, that provides the maximum sustainable catch;  $S_{buf}$  — the escapement buffer reference based on the precautionary approach

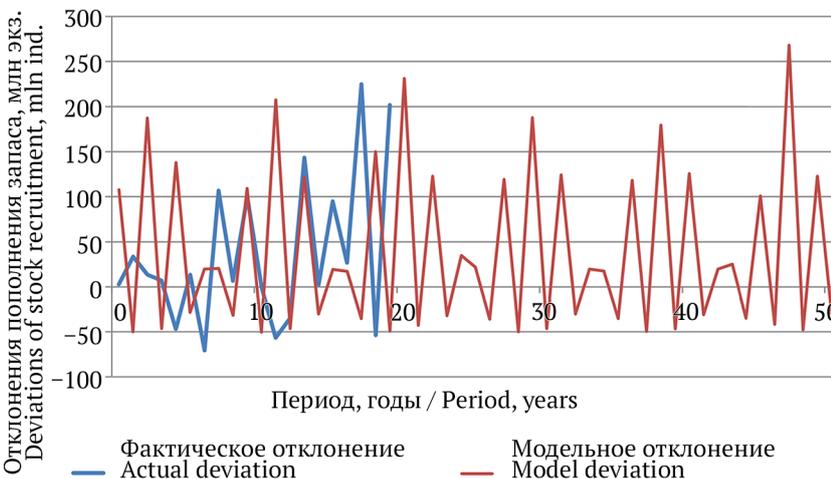


Рис. 7. Сравнительная динамика отклонений имитационной модели и наблюдаемой динамики пополнения запаса (на примере горбуши Северо-Восточной Камчатки)  
Fig. 7. The comparative dynamics of the deviations of the imitation model and the actual dynamics of recruitment (on the example of pink salmon of North-East Kamchatka)

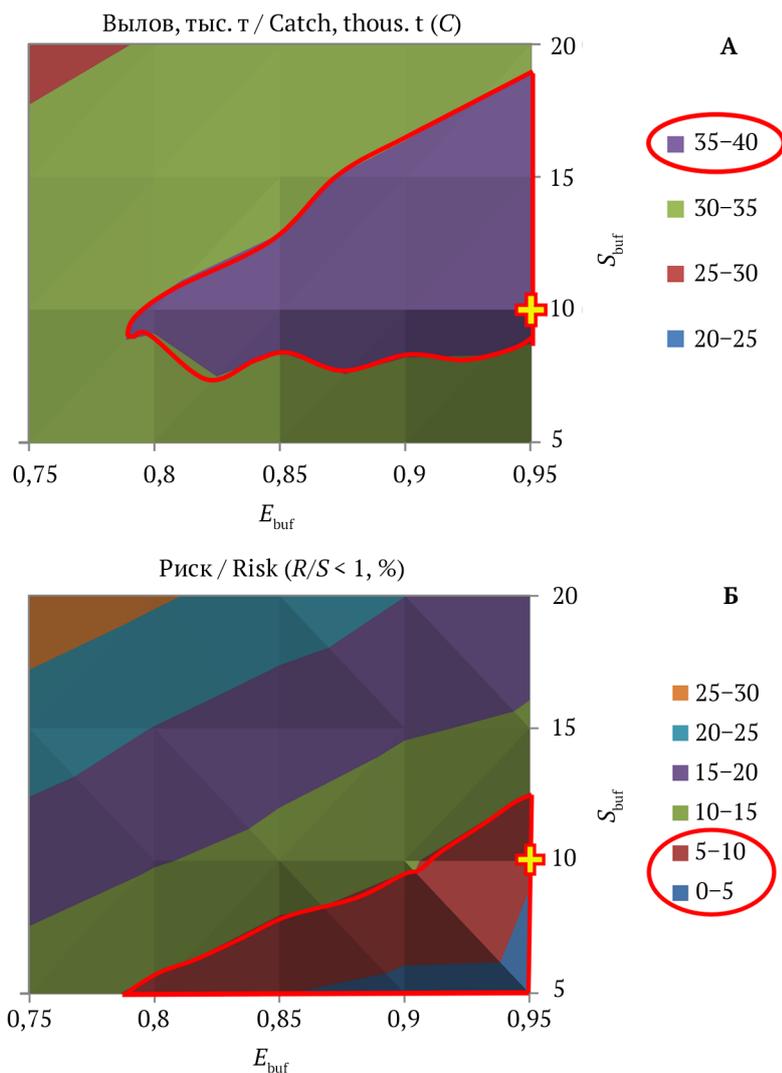


Рис. 8. Результаты тестирования модели ПРП с учетом соответствия максимального устойчивого вылова (А) и пропуском на уровне минимального риска продуцирования малочисленных поколений (Б) (на примере горбуши Северо-Восточной Камчатки):  $S_{buf}$  – буферный ориентир пропуска,  $E_{buf}$  – буферный ориентир эксплуатации

Fig. 8. The results of testing the HCR model, taking into account compliance with the maximum sustainable yield (A) and escapement at the level of the minimum risk of producing low abundant generations (B) (on the example of pink salmon of North-East Kamchatka):  $S_{buf}$  – the escapement buffer reference,  $E_{buf}$  – the exploitation buffer reference

Дополнительно отметим, что важным этапом тестирования схемы управления лососевым промыслом, определяемой выбранными моделями «запас – пополнение» и ПРП, является оценка вероятности того, что в долгосрочной перспективе (например, на 15 лет вперед) потенциальный подход производителей лососей ( $N_t$ ) всегда будет выше уровня буферного ориентира пропуска, ( $S_{buf}$ ). В данном случае риск можно описать отношением  $N_t < S_{buf}$ . В результате оценивается вероятность, при которой подход будет ниже уровня буферного ориентира пропуска. В случае низкой вероятности этого события выбранную стратегию управления лососевыми запасами можно считать актуальной. Ниже будут представлены варианты подобного анализа.

### Обоснование ПРП

#### для основных единиц запасов

Согласно принятой современной практике подготовки прогнозов динамики запасов ти-

хоокеанских лососей, в отношении данных биоресурсов не готовят оценку ОДУ. Объемы возможной добычи (вылова) обозначаются другим критерием – прогнозируемый вылов (ПВ). Принципиальной разницей между оценками ОДУ и ПВ является возможность внесения корректировки объемов ПВ лососей относительно изначально определенных в зависимости от фактических подходов (возвратов) производителей в год ведения промысла (путины). Это дает определенное преимущество, так как позволяет оперативно регулировать промысел. Однако данная мера регулирования несет и определенные риски, поскольку необходимо с учетом предосторожного подхода обеспечить целевые и граничные ориентиры пропуска производителей на нерест, так как несоблюдение этого условия может привести к полному подрыву отдельных единиц лососевых запасов, принимая во внимание моноциклический характер воспроизводства этой группы рыб.

Разработанная специалистами КамчатНИРО схема формирования правил регулирования промысла (ПРП), используемых для тихоокеанских лососей Камчатки, позволяет применить буферный ориентир пропуска производителей на нерест с возможностью потенциального продуцирования максимального устойчивого вылова (MSY) конкретных единиц запасов. В данном разделе работы мы приводим примеры практического применения ПРП для основных единиц лососевых запасов Восточной и Западной Камчатки. Обращаем внимание, что здесь не рассматривается процесс подготовки прогнозов динамики численности тихоокеанских лососей, а приводятся только расчеты ПРП для наиболее промыслово-значимых локальных стад или их региональных группировок.

Тем не менее первым этапом рационального использования водных биоресурсов является прогнозирование динамики численности промысловых объектов. В отношении тихоокеанских лососей Камчатки основой прогнозирования являются следующие модельные методы: горбуша — стратифицированные модели «родители – потомство», классификационные модели «случайный лес деревьев в решений», регрессионные модели взаимосвязи «учет численности сеголетков в море – возврат» (Фельдман, Шевляков, 2015; Фельдман, 2020; Фельдман, Бугаев, 2021; Shepherd, 1982; Breiman, 2001); другие виды (кета, нерка, кижуч, чавыча) — модели «запас – пополнение», регрессионные модели сиблингов (Дубынин и др., 2007; Зикунова и др., 2021; Peterman, 1982; Shepherd, 1982). На их основе получают оценки численности возвратов (подходов) производителей тихоокеанских лососей основных единиц запасов.

В настоящей работе использованы прогнозные оценки численности возвратов тихоокеанских лососей Камчатки в ожидаемую путину 2022 г. (Лососи, 2022). Оценки были получены для отдельных единиц запасов, которые представлены как наиболее промыслово-значимыми локальными стадами лососей, так и их региональными группировками. В данном случае единицы запасов трактуются как пространственно и генетически изолированные группы гидробионтов (популяции / локальные стада тихоокеанских лососей, воспроизводящиеся в одном или географически близко расположенных водных объектах), в отношении которых применяется единая стратегия промысла

(Мина, 1980). На основе имеющихся прогнозных оценок численности возвратов (подходов) производителей с помощью разработанных ПРП были определены объемы ПВ и величины пропуска наиболее значимых единиц запасов пяти видов тихоокеанских лососей Камчатки. Модели ПРП для всех видов лососей были подготовлены в 2021 г. с принятым пятилетним сроком действия (Лососи, 2021). В 2026 г. параметры моделей ПРП для основных единиц лососевых запасов Камчатки будут скорректированы.

### Горбуша

Основное воспроизводство горбуши Камчатки сосредоточено на северо-восточном и западном побережьях полуострова. Здесь добывают более 95% от общего подхода (возврата) камчатской горбуши. Ожидаемые в 2022 г. возвраты производителей отражают динамику численности горбуши четных лет воспроизводства. Поэтому прогнозы численности подходов ориентированы на многолетние региональные закономерности чередования урожайных и неурожайных поколений этого вида.

Практическое применение полученной модели ПРП (ф. 3) возможно после тестирования буферных ориентиров. В случае с камчатской горбушей тестирование режима эксплуатации и формирования нерестового запаса выполняли с использованием следующих критериев:  $E_{buf}$  — 75–95% (с шагом в 5%);  $S_{buf}$  — 7–15 млн рыб (Северо-Восточная Камчатка) и 8–16 млн рыб (Западная Камчатка) (в обоих случаях с шагом 2 млн рыб). Графическим и расчетным методами были определены оптимальные параметры режима управления промыслом горбуши — ориентир эксплуатации ( $E_{buf}$ ) на уровне 95% для обеих единиц запаса, а для ориентира пропуска ( $S_{buf}$ ) — на уровне 9 млн рыб (Северо-Восточная Камчатка) и 10 млн рыб (Западная Камчатка) (рис. 9). При этом среднескользящие оптимальные ориентиры пропуска горбуши на нерест ( $S_{opt}$ ) и эксплуатации ( $E_{opt}$ ) составили: Северо-Восточная Камчатка — 19 млн рыб и 71%; Западная Камчатка — 21 млн рыб и 70%. Подчеркнем, что определение  $S_{opt}$  выполнено при тестировании ПРП по максимальным показателям градиентных зон с учетом локализации буферного ориентира (маркера) ( $S_{buf}$ ). Соответственно, показатель  $E_{opt}$  определен по соотношению оптимальных показателей промыслового изъятия (эксплуатация) от численности подхода  $N$ , которое гарантирует достижение

$S_{opt}$ . Следует отметить, что фактические значения параметров  $S_{opt}$  и  $E_{opt}$  получены из матриц базовых данных при построении графиков поверхности тестирования ПРП (рис. 9). В настоящей работе мы не приводим показатели переменных матриц, так как они вычисляются автоматически при построении подобных графиков в используемом статистическом программном пакете (в рассматриваемом случае — MS Excel). Напомним, что в дальнейшей работе показатели  $S_{opt}$  и  $E_{opt}$  для всех видов лососей были определены по единой схеме при тестировании ПРП конкретных единиц запасов. Графическое представление моделей ПРП и показателей численности фактических подходов горбуши Северо-Восточной и Западной Камчатки показано на рисунке 10.

Результаты тестирования долгосрочных рисков использования разработанных моде-

лей ПРП представлены на графиках имитационной динамики численности двух рассматриваемых единиц запаса горбуши при выбранных режимах регулирования промысла в перспективе на 15 лет (рис. 11). Исходя из полученных результатов тестирования, можно сказать, что подходы горбуши в рассматриваемый период практически всегда будут выше уровня целевого ориентира пропуск, обеспечивающего максимальный возможный вылов (риск  $N_t < S_{MSY}$ ). Вероятность этого оценивали методом бутстреп-выборок. В отношении горбуши Северо-Восточной Камчатки возможность ее присутствия существует на уровне 1–2%, а для Западной Камчатки — практически равна 0. Следовательно, выбранные стратегии управления промыслом для основных единиц запасов камчатской горбуши можно считать адекватными.

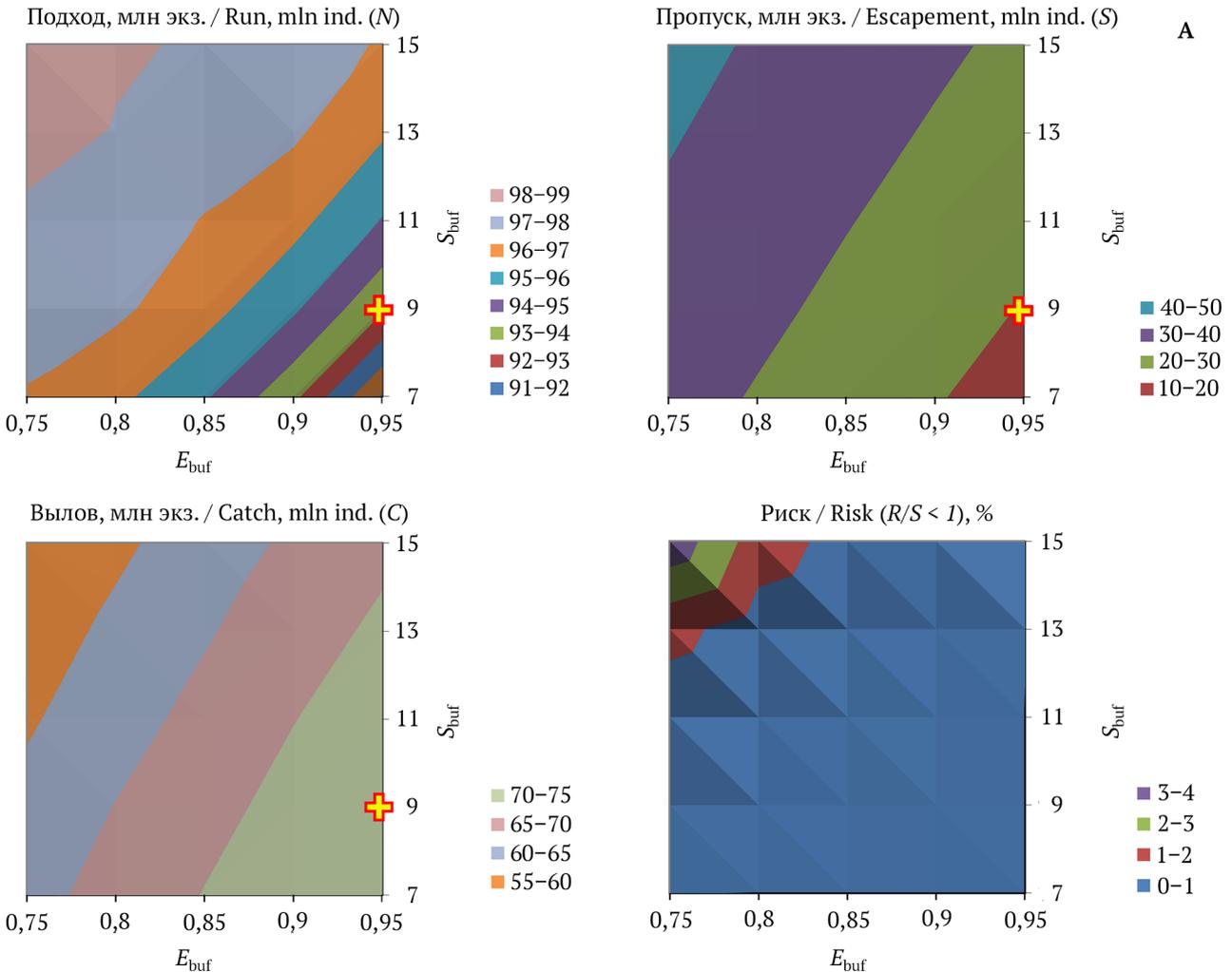


Рис. 9А. Результаты тестирования и выбор параметров ПРП горбуши Северо-Восточной Камчатки с использованием бутстреп-выборок по данным 1990–2021 гг.:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуск,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации  
 Fig. 9A. The results of testing and selection of the HCR parameters for pink salmon in North-East Kamchatka using bootstrap samples based on 1990–2021 data:  $S_{buf}$  is the escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference

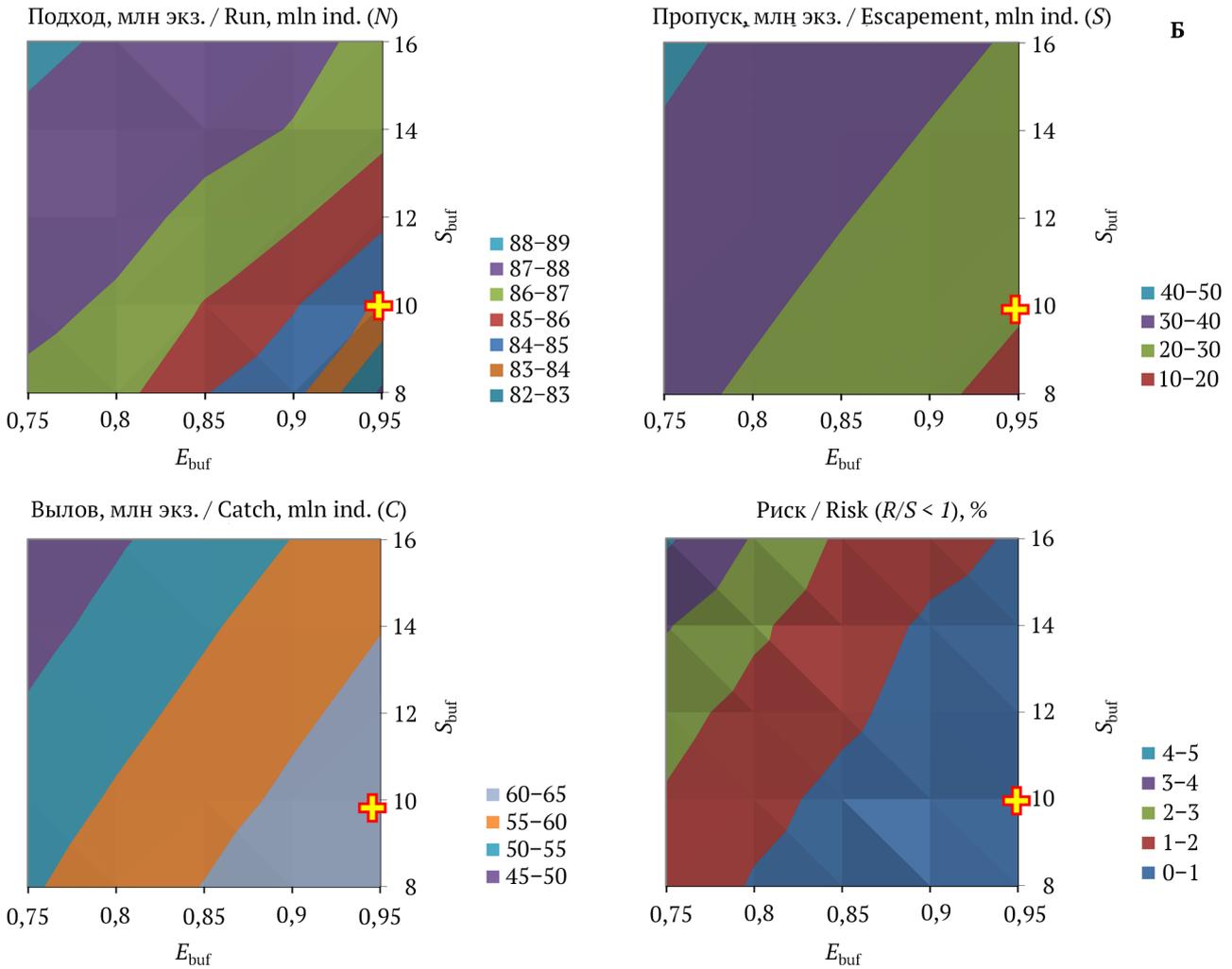


Рис. 9Б. Результаты тестирования и выбор параметров ПРП горбуши Западной Камчатки с использованием бутстреп-выборок по данным 1990–2021 гг.:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации  
 Fig. 9B. The results of testing and selection of the HCR parameters for pink salmon in West Kamchatka using bootstrap samples based on 1990–2021 data:  $S_{buf}$  is the escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference

Пример практического применения ПРП для определения уровня пропуска на нерест и оценки промыслового изъятия горбуши Камчатки с учетом предосторожного подхода и обеспечения максимального стабильного вылова (MSY) представлен следующим образом:

1. На северо-восточном побережье Камчатки (Карагинская подзона) в 2022 г. ожидается характерный для четных лет низкий уровень численности подхода (возврата) горбуши — на уровне 35 млн экз. Как уже отмечено, согласно разработанному ПРП, основные буферные ориентиры для данной единицы запаса составили:  $S_{buf}$  — 9 млн экз.,  $E_{buf}$  — 95% (0,95 по единичной системе, которая используется во всех расчетах для удобства) (рис. 9А). При указанной величине подхода с помощью разработанной модели ПРП определяем долю эксплуатации (промыс-

ловое изъятие) горбуши комплекса стад Северо-Восточной Камчатки:

$$E_{2022} = 0,95 \times \frac{35 - 9}{35 + 9} = 0,56.$$

Из полученного результата расчетов видно, что величина уровня эксплуатации должна составить 56% (0,56). При этом величина численности вылова будет равна 20 млн рыб:

$$C_{2022} = 35 \text{ млн рыб} \times 0,56 \approx 20 \text{ млн рыб}.$$

Соответственно, на нерестилища рекомендуется пропустить 15 млн производителей:

$$S_{2022} = 35 \text{ млн рыб} \times (1 - 0,56) \approx 15 \text{ млн рыб}.$$

Средняя навеска горбуши Северо-Восточной Камчатки, определенная по последним пяти четным циклам воспроизводства, составила 1,25 кг. Предполагая, что в последнем цикле средняя навеска горбуши будет равна среднеголетней, региональный объем ПВ будет равен:

$$C_{2022} = 20 \text{ млн рыб} \times 1,25 \text{ кг} = 25 \text{ тыс. т}.$$

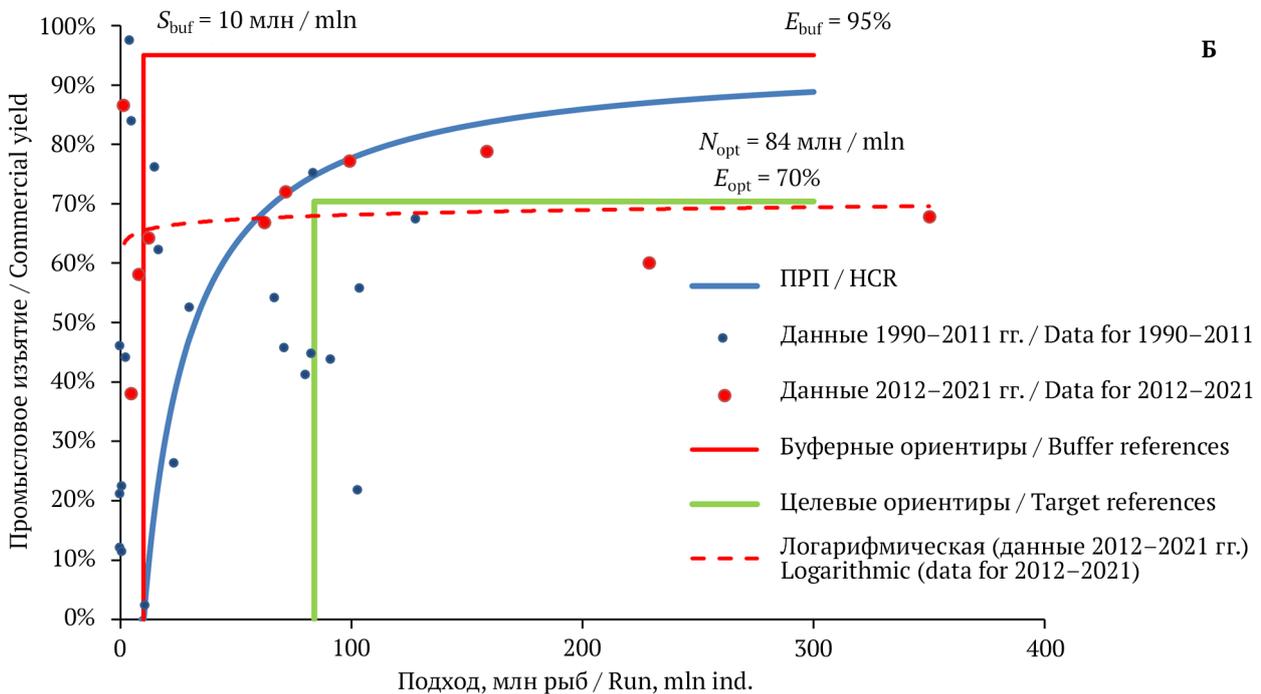
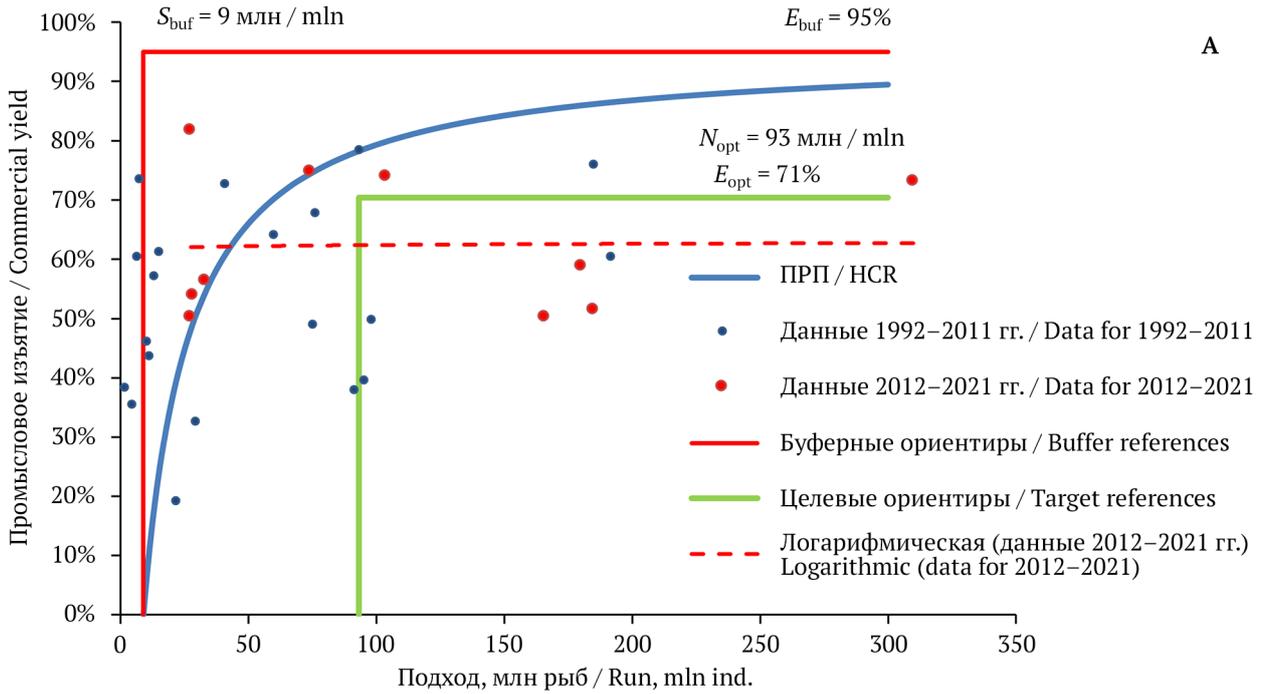


Рис. 10. Графическое представление ПРП и показателей численности фактических подходов горбуши Северо-Восточной (А) и Западной (Б) Камчатки по данным 1990–2021 гг.:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска на нерест,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации,  $E_{opt}$  — оптимальный ориентир эксплуатации;  $N_{opt}$  — оптимальный ориентир подхода (возврата) для обеспечения эффективного воспроизводства ( $S_{opt}$ ) и эксплуатации ( $E_{opt}$ ); логарифмическая (по данным 2012–2021 гг.) — линия тренда изменчивости промыслового изъятия относительно общего подхода производителей  
 Fig. 10. The graphical representation of the HCR and abundance of the actual runs of pink salmon of North-East (A) and West (B) Kamchatka based on the data of 1990–2021:  $S_{buf}$  is the spawning escapement buffer target,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer target,  $E_{opt}$  is the optimal exploitation target;  $N_{opt}$  is the optimal run (return) target to ensure efficient reproduction ( $S_{opt}$ ) and operation ( $E_{opt}$ ); logarithmic (according to 2012–2021 data) — the trend line of the variability of commercial yield relative to the general run of spawners

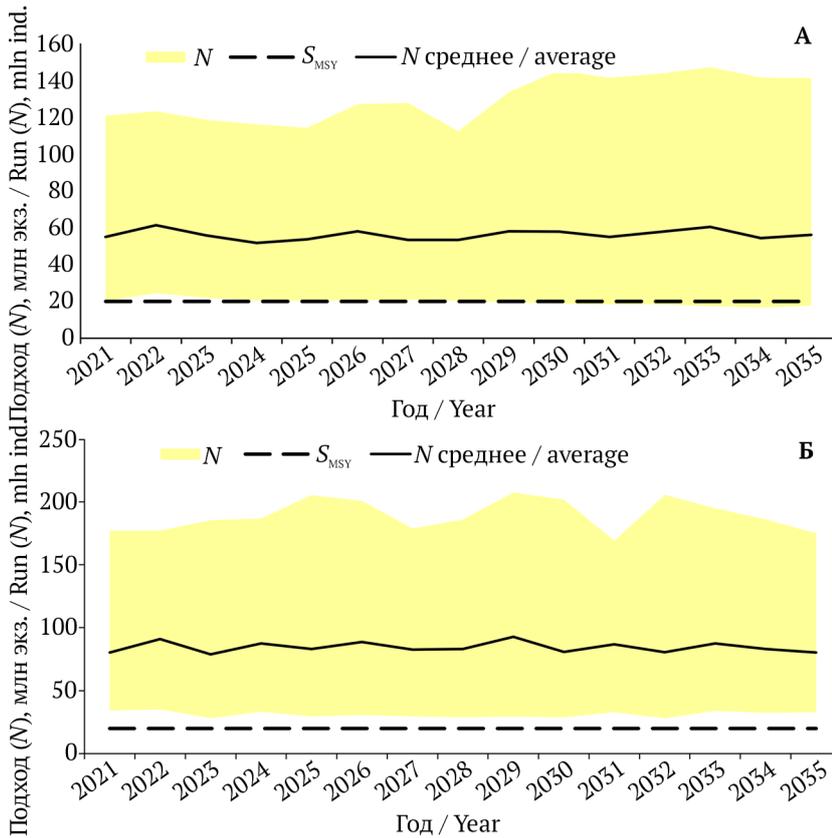


Рис. 11. Имитационная динамика численности запасов (подходов) горбуши Северо-Восточной (А) и Западной (Б) Камчатки с учетом уровня  $S_{MSY}$ , рассчитанная для периода 2021–2035 гг.:  $S_{MSY}$  — целевой ориентир пропуска, обеспечивающий максимальный устойчивый вылов,  $N$  — общий запас (подход) производителей (цветом выделен размах значений  $N$  для 95% бутстреп-выборок)

Fig. 11. The simulation dynamics of the stock abundance (runs) of pink salmon in North-East (A) and West (B) Kamchatka in view of the level of  $S_{MSY}$ , calculated for the period 2021–2035 гг.:  $S_{MSY}$  is the escapement reference, providing the maximum sustainable catch,  $N$  is the total stock (run) of spawners (the color highlights the range of  $N$  values for 95% bootstrap samples)

2. При прогнозируемой величине подхода горбуши к *западному побережью Камчатки* (Камчатско-Курильская и Западно-Камчатская подзоны) в 2022 г. на уровне 51 млн особей, уровень эксплуатации (буферные ориентиры ПРП:  $S_{buf}$  — 10 млн экз.,  $E_{buf}$  — 95% (0,95)) (рис. 9Б) рассчитывается по формуле ПРП:

$$E_{2022} = 0,95 \times \frac{51 - 10}{51 + 10} = 0,64.$$

Таким образом, расчетный уровень эксплуатации составит 64% (0,64). Следовательно, потенциальная величина вылова будет равна 33 млн рыб:

$$C_{2022} = 51 \text{ млн рыб} \times 0,64 \approx 33 \text{ млн рыб}.$$

В свою очередь, к пропуску на нерест будет рекомендовано 18 млн производителей:

$$S_{2022} = 51 \text{ млн рыб} \times (1 - 0,64) \approx 18 \text{ млн рыб}.$$

В последние пять четных циклов воспроизводства средняя масса тела горбуши на Западной Камчатке составила 1,36 кг. Исходя из этого, региональный объем ПВ горбуши на 2022 г. будет соответствовать:

$$C_{2022} = 33 \text{ млн рыб} \times 1,36 \text{ кг} = 45 \text{ тыс. т}.$$

### Кета

Как и у горбуши, основное воспроизводство кеты Камчатки сосредоточено на северо-восточном и западном побережьях полуострова. Данные комплексы стад считаются двумя глав-

ными единицами региональных запасов вида. Здесь добывают порядка 80–85% от общего подхода (возврата) камчатской кеты. Поэтому в работе представлены варианты ПРП для указанных единиц запасов.

Тестирование ориентиров по эксплуатации и формированию нерестовых запасов камчатской кеты выполняли с использованием следующих критериев:  $E_{buf}$  — 80–100% (с шагом в 5%);  $S_{buf}$  — 0,10–0,30 млн рыб (с шагом 0,05 млн рыб) для кеты Северо-Восточной Камчатки и для кеты Западной Камчатки:  $E_{buf}$  — 75–95% (с шагом в 5%);  $S_{buf}$  — 0,20–0,60 млн рыб (с шагом 0,10 млн рыб).

В результате тестирования параметров ПРП, на выходе выбран следующий оптимальный режим управления: ориентир по эксплуатации ( $E_{buf}$ ) на уровне 95% для запаса кеты Северо-Восточной Камчатки и 90% — для кеты Западной Камчатки, а для ориентира пропуска ( $S_{buf}$ ) — на уровне 0,15 млн рыб (Северо-Восточная Камчатка) и 0,60 млн рыб (Западная Камчатка) (рис. 12). При этом среднесрочные оптимальные ориентиры пропуска кеты на нерест ( $S_{opt}$ ) и эксплуатации ( $E_{opt}$ ) составили: Северо-Восточная Камчатка — 0,51 млн рыб и 89%; Западная Камчатка — 5,35 млн рыб и 71%. Графическое представление моделей ПРП и показателей численности фактических подходов кеты Северо-Восточной и Западной Камчатки представлено на рисунке 13.

Результаты тестирования долгосрочных рисков использования разработанных моделей ПРП представлены на графиках имитационной динамики численности двух рассматриваемых единиц запаса кеты при выбранных режимах регулирования промысла в перспективе на 15 лет (рис. 14). Исходя из полученных данных, можно отметить, что подходы кеты в рассматриваемый период всегда будут выше уровня целевого ориентира пропуск, поэтому риск в указанной перспективе равен 0. Следовательно, выбранные стратегии управления промыслом для основных единиц запасов камчатской кеты можно считать адекватными.

Практическое применение ПРП для оценки пропуска и уровня эксплуатации кеты Камчатки с учетом предосторожного подхода и обеспечения максимального возможного вылова (MSY) представлено следующим образом:

1. На *северо-восточном побережье Камчатки* (Карагинская подзона) ожидаемая общая расчетная численность возвратов кеты в 2022 г. составила 3,970 млн рыб. Учитывая обоснованные параметры ПРП (рис. 12А), возможная эксплуатация запаса составит 88% (0,88), а объем вылова — 3,494 млн особей:

$$E_{2022} = 0,95 \times \frac{3,970 - 0,15}{3,970 + 0,15} \approx 0,88,$$

$$C_{2022} = 3,970 \text{ млн рыб} \times 0,88 \approx 3,494 \text{ млн рыб.}$$

Численность производителей, которые должны быть пропущены на нерестилища, оценена в 0,476 млн рыб:

$$S_{2022} = 3,970 \text{ млн рыб} \times (1 - 0,88) \approx 0,476 \text{ млн рыб.}$$

При среднемноголетней массе (навеске) кеты, равной 2,90 кг, прогнозируемый объем вылова вида в Карагинской подзоне в 2022 г. определен на уровне 10,100 тыс. т:

$$C_{2022} = 3,494 \text{ млн рыб} \times 2,90 \text{ кг} \approx 10,100 \text{ тыс. т.}$$

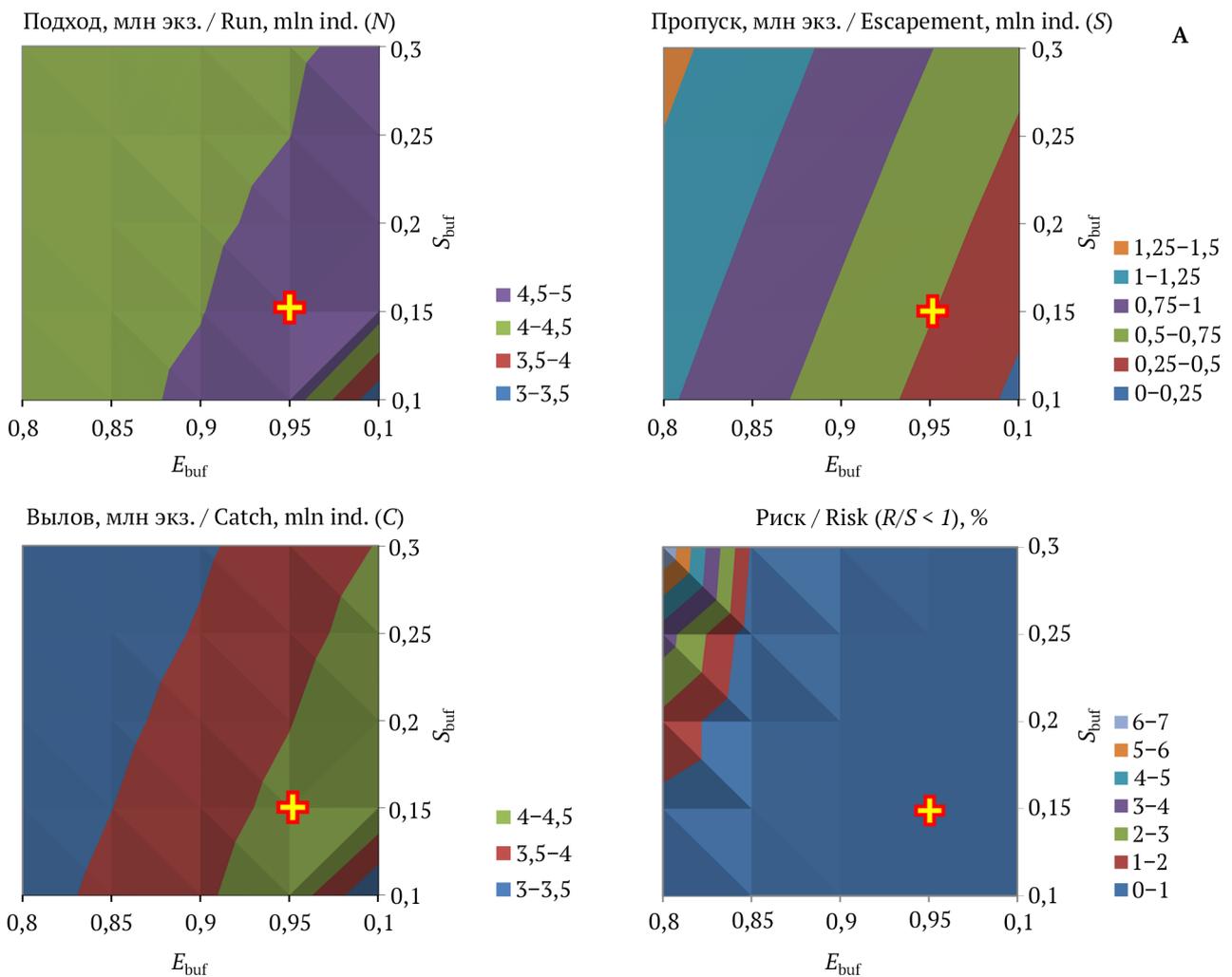


Рис. 12А. Результаты тестирования и выбор параметров ПРП кеты Северо-Восточной Камчатки с использованием бутстреп-выборок:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации  
 Fig. 12A. The results of testing and selection of the HCR parameters for chum salmon in North-East Kamchatka using bootstrap samples:  $S_{buf}$  is the escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference

2. При величине подхода кеты к *западному побережью Камчатки* (Камчатско-Курильская и Западно-Камчатская подзоны) в 2022 г. на уровне 6,180 млн рыб, доля промыслового изъятия, согласно ПРП (рис. 12Б), будет равна 74% (0,74):

$$E_{2022} = 0,90 \times \frac{6,180 - 0,60}{6,180 + 0,60} \approx 0,74.$$

Численность производителей, которые будут пропущены на нерестилища, оценена в 1,607 млн рыб:

$$S_{2022} = 6,180 \text{ млн рыб} \times (1 - 0,74) \approx 1,607 \text{ млн рыб}.$$

Таким образом, численность рыб, которых может изъять промысел, составит 4,573 млн рыб:

$$C_{2022} = 6,180 \text{ млн рыб} \times 0,74 \approx 4,573 \text{ млн рыб}.$$

При среднемноголетней массе (навеске) кеты, равной 3,20 кг, прогнозируемый объем вылова вида на Западной Камчатке в 2022 г. составит 14,600 тыс. т:

$$C_{2022} = 4,573 \text{ млн рыб} \times 3,20 \text{ кг} \approx 14,600 \text{ тыс. т}.$$

### Нерка

Воспроизводство основных запасов нерки Камчатки сосредоточено в бассейнах рек Камчатка (Восточная Камчатка) и Озерная (Западная Камчатка). В данных водных объектах суммарно ежегодно добывают порядка 80–90% общего объема вида в регионе. Соответственно, к данным единицам запасов применяются особые меры по регулированию промысла. В связи с этим для стад нерки рек Камчатка и Озерная были разработаны адаптированные модели ПРП.

Тестирование ориентиров по эксплуатации и формированию нерестовых запасов нерки указанных рек Камчатка и Озерная выполняли с использованием следующих критериев:  $E_{buf}$  — 90–98% (с шагом в 2%);  $S_{buf}$  — 0,14–0,18 млн рыб (с шагом 0,01 млн рыб) для нерки р. Камчатка и для нерки р. Озерной:  $E_{buf}$  — 75–95% (с шагом в 5%);  $S_{buf}$  — 0,40–0,80 млн рыб (с шагом 0,10 млн рыб).

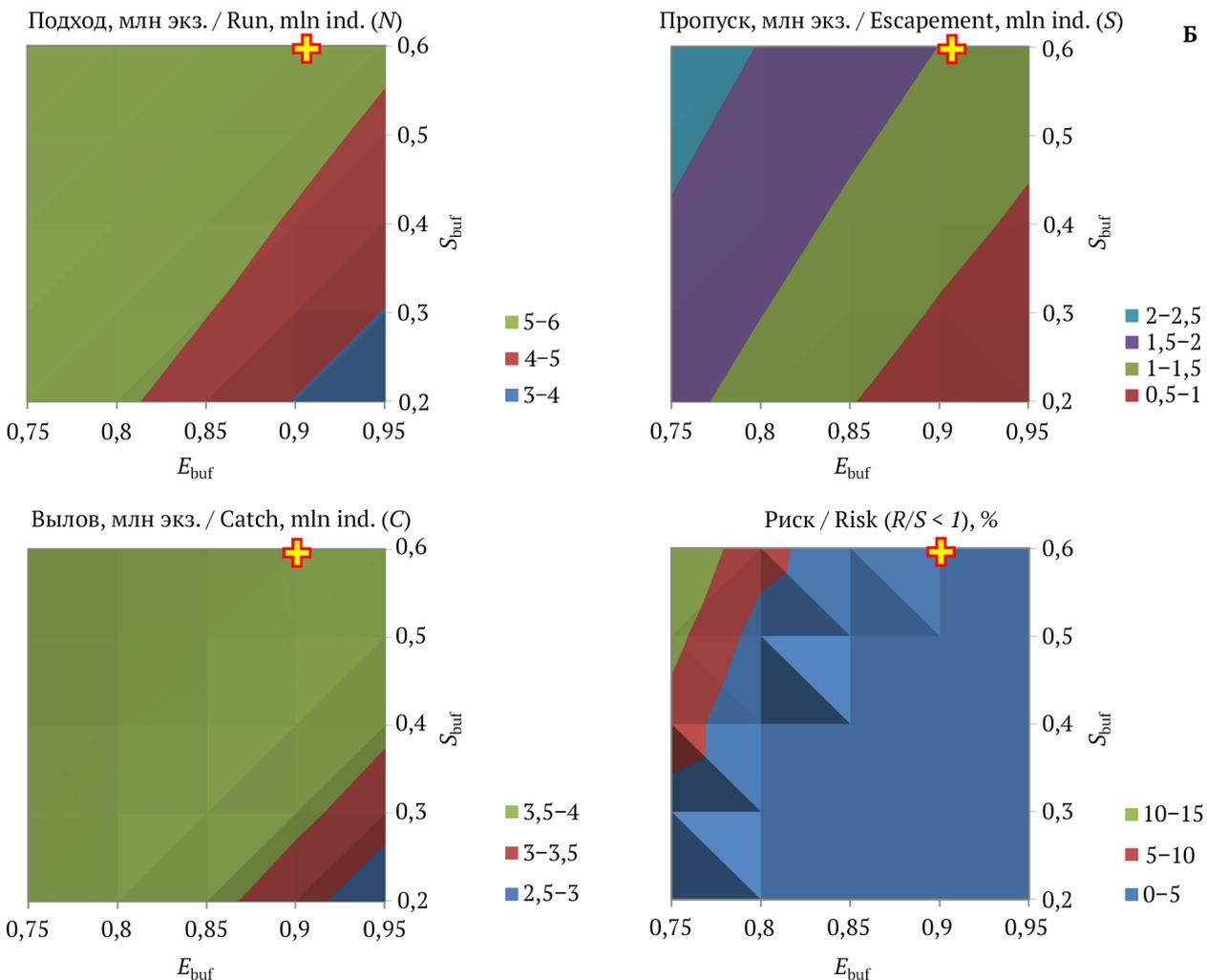


Рис. 12Б. Результаты тестирования и выбор параметров ПРП кеты Западной Камчатки с использованием бутстреп-выборок:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации  
 Fig. 12B. The results of testing and selection of the HCR parameters for chum salmon in West Kamchatka using bootstrap samples:  $S_{buf}$  is the escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference

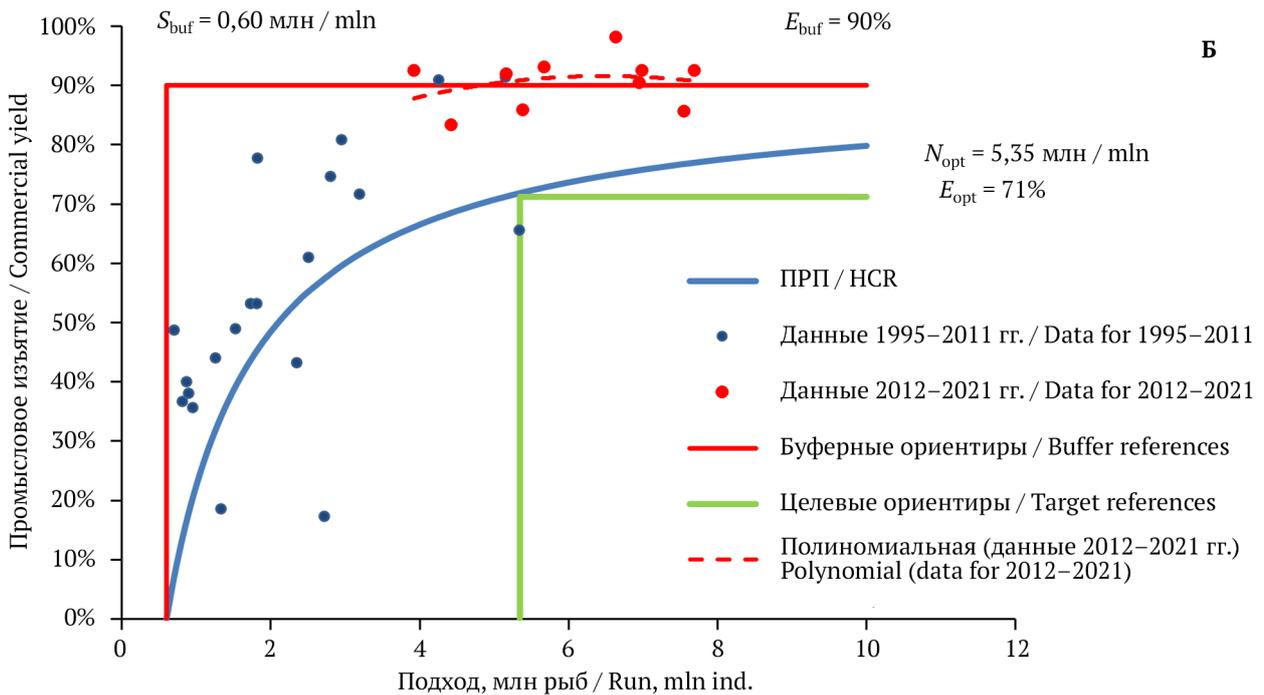
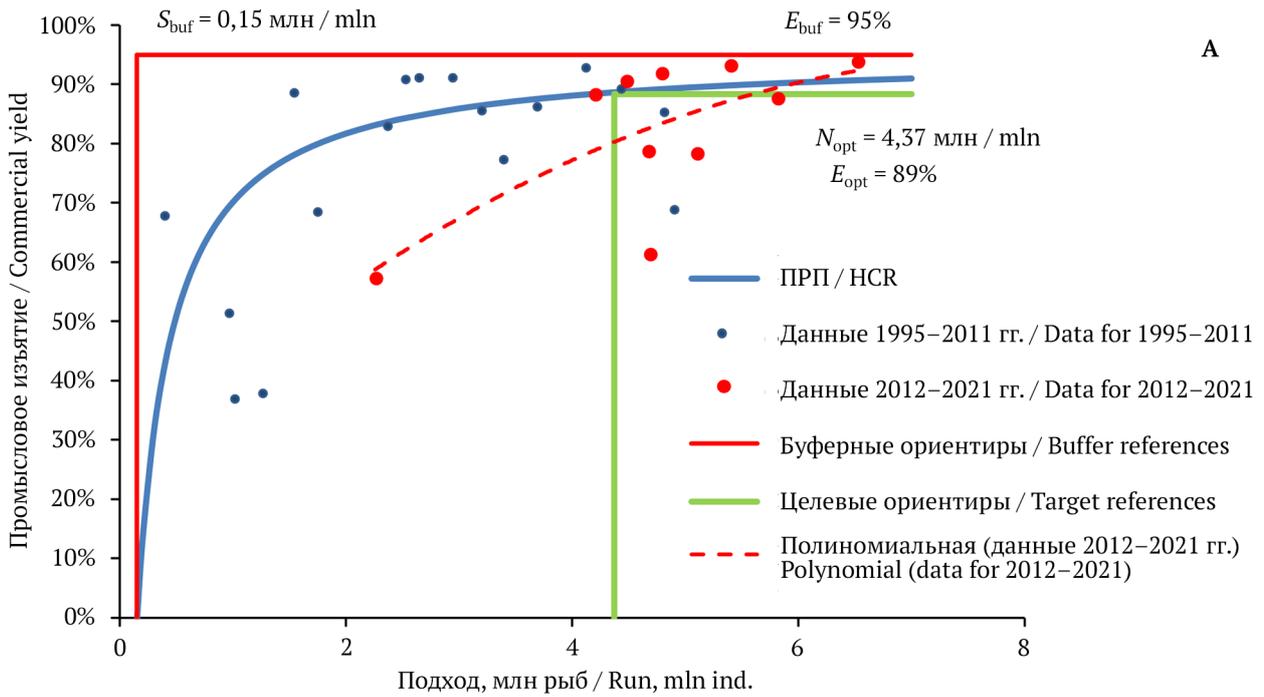


Рис. 13. Графическое представление ПРП и показателей численности фактических подходов кеты Северо-Восточной (А) и Западной (Б) Камчатки по данным 1992–2021 гг.:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска на нерест,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации,  $E_{opt}$  — оптимальный ориентир эксплуатации;  $N_{opt}$  — оптимальный ориентир подхода (возврата) для обеспечения эффективного воспроизводства ( $S_{opt}$ ) и эксплуатации ( $E_{opt}$ ); полиномиальная (по данным 2012–2021 гг.) — линия тренда изменчивости промыслового изъятия относительно общего подхода производителей

Fig. 13. The graphical representation of the HCR and the abundance indicators of the actual runs of chum salmon on North-East (A) and West (Б) Kamchatka according to the data of 1992–2021:  $S_{buf}$  is the spawning escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference,  $E_{opt}$  is the optimal reference for exploitation;  $N_{opt}$  is the optimal run (return) reference to ensure efficient reproduction ( $S_{opt}$ ) and exploitation ( $E_{opt}$ ); polynomial (according to 2012–2021 data) — the trend line of the variability of commercial yield relative to the general run of spawners

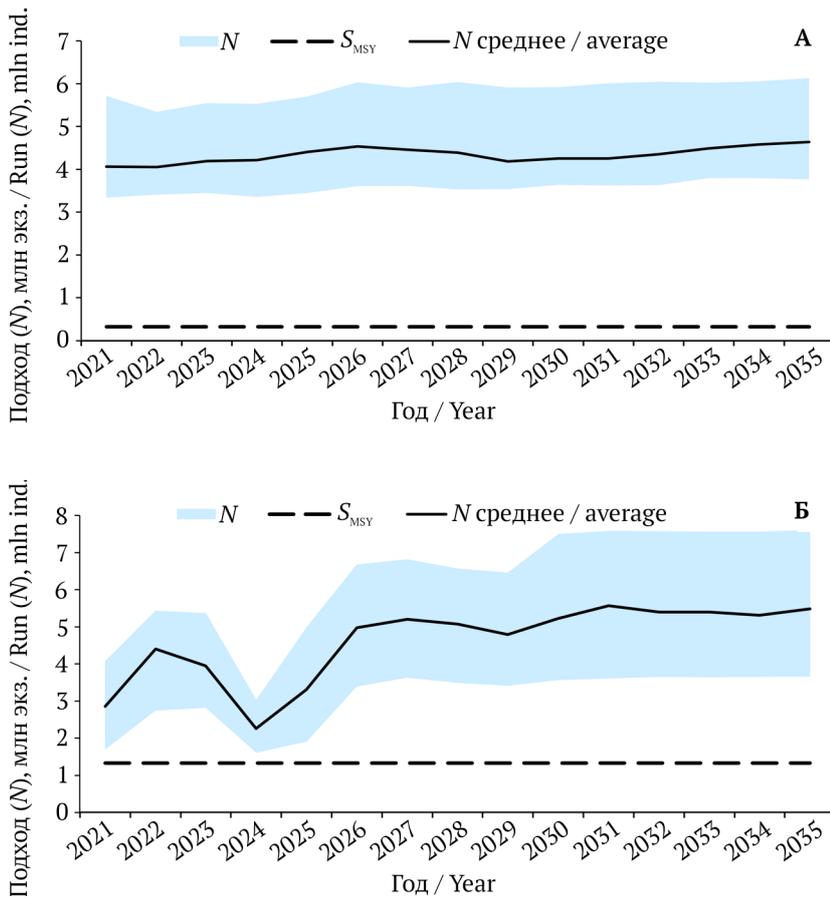


Рис. 14. Имитационная динамика численности запасов (подходов) кеты Северо-Восточной (А) и Западной (Б) Камчатки с учетом уровня  $S_{MSY}$ , рассчитанная для периода 2021–2035 гг.:  $S_{MSY}$  — целевой ориентир пропуска, обеспечивающий максимальный устойчивый вылов,  $N$  — общий запас (подход) производителей (цветом выделен размах значений  $N$  для 95% бутстреп-выборок)  
 Fig. 14. The simulation dynamics of the stock abundance (runs) of chum salmon on North-East (A) and West (Б) Kamchatka in view of the level of  $S_{MSY}$ , calculated for the period 2021–2035:  $S_{MSY}$  is the escapement reference providing the maximum sustainable catch,  $N$  is the total stock (run) of spawners (the color highlights the range of  $N$  values for 95% of bootstrap samples)

В результате тестирования параметров ПРП выбран следующий оптимальный режим управления запасами нерки: ориентир по эксплуатации ( $E_{buf}$ ) на уровне 96% для нерки р. Камчатки и 95% — для нерки р. Озерной, а ориентиры пропуска ( $S_{buf}$ ) — на уровне 0,17 млн рыб (р. Камчатка) и 0,60 млн рыб (р. Озерная) (рис. 15). При этом среднемноголетние оптимальные ориентиры пропуска нерки на нерест ( $S_{opt}$ ) и эксплуатации ( $E_{opt}$ ) составили: р. Камчатка — 0,61 млн рыб и 91%; р. Озерная — 1,62 млн рыб и 84%. Графическое представление моделей ПРП и показателей численности фактических подходов нерки рек Камчатка и Озерная показано на рисунке 16.

Результаты тестирования долгосрочных рисков использования разработанных моделей ПРП представлены на графиках имитационной динамики численности двух рассматриваемых единиц запаса нерки при выбранных режимах регулирования промысла в перспективе на 15 лет (рис. 17). В обоих случаях подходы нерки в рассматриваемый период всегда будут выше уровня целевого ориентира пропуска, поэтому риск равен 0. Следовательно, выбранные стратегии управления промыслом для основных единиц запасов камчатской нерки можно считать адекватными.

Пример практического применения ПРП для определения уровня пропуска на нерест и оценки промыслового изъятия нерки рек Камчатка и Озерная с учетом предосторожного подхода, а также обеспечения максимального возможного вылова (MSY), представлен ниже:

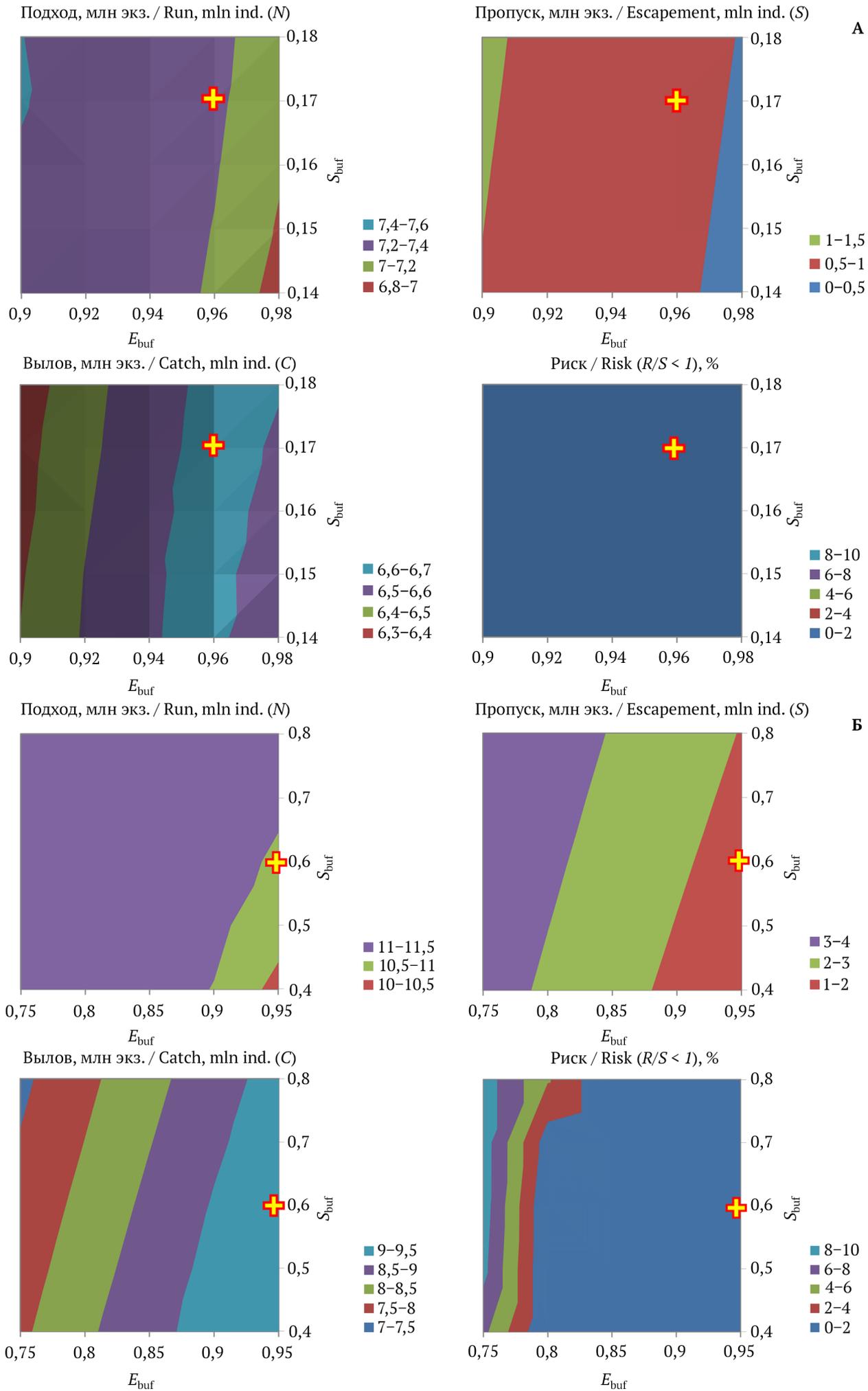
1. Общая численность подхода (возврата) нерки р. Камчатки (Петропавловско-Командорская подзона) в 2022 г. в Камчатский залив может составить порядка 4,54 млн особей. Согласно обоснованным параметрам ПРП (рис. 16А), возможная эксплуатация запаса должна составить 89% (0,89):

$$E_{2022} = 0,96 \times \frac{4,54 - 0,17}{4,54 + 0,17} \approx 0,89.$$

Такой уровень эксплуатации будет соответствовать вылову на уровне 4,04 млн особей ( $C_{2022} = 4,54 \text{ млн рыб} \times 0,89 \approx 4,04 \text{ млн рыб}$ ) и пропуску на нерест 0,50 млн особей ( $S_{2022} = 4,54 \text{ млн рыб} \times (1 - 0,89) \approx 0,50 \text{ млн рыб}$ ).

При среднемноголетней массе (навеске) нерки р. Камчатки, равной 2,10 кг, прогнозируемый объем вылова в 2022 г. определен на уровне 8,486 тыс. т:

$$C_{2022} = 4,041 \text{ млн рыб} \times 2,10 \text{ кг} \approx 8,486 \text{ тыс. т.}$$



2. Исходя из прогнозируемой оценки численности подхода (возврата) нерки р. Озерной (Камчатско-Курильская подзона) в 2022 г. на уровне 9,13 млн особей, согласно разработанному ПРП (рис. 16Б), величина промыслового изъятия составит 83% (0,83):

$$E_{2022} = 0,95 \times \frac{9,13 - 0,60}{9,13 + 0,60} \approx 0,83.$$

Соответственно, из ожидаемой численности подхода на нерест необходимо пропустить 17% или 1,55 млн особей нерки р. Озерной:

$$S_{2022} = 9,13 \text{ млн рыб} \times (1 - 0,83) \approx 1,55 \text{ млн рыб}.$$

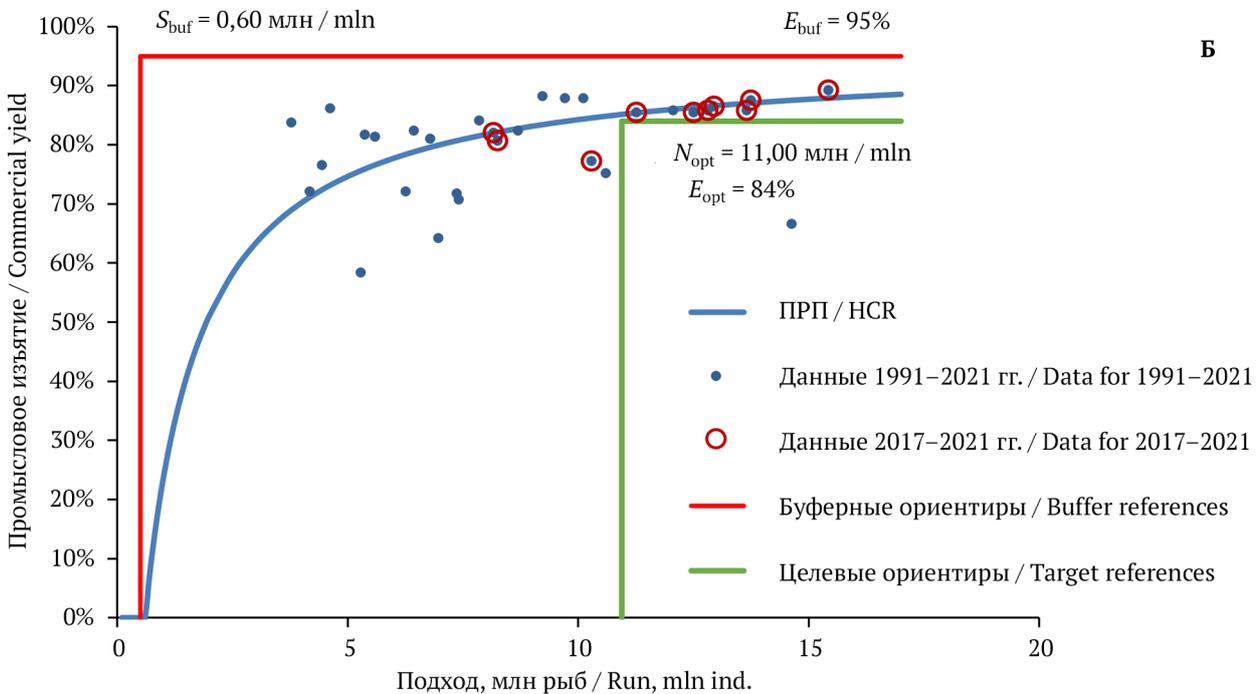
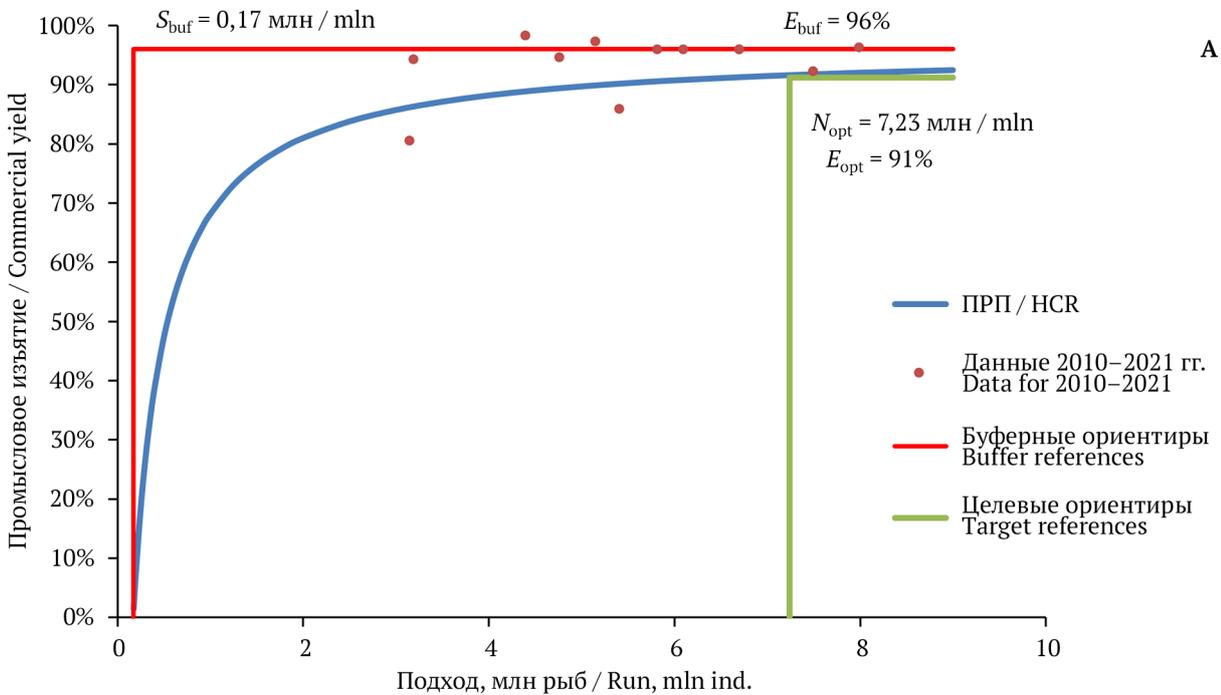


Рис. 16. Графическое представление ПРП и показателей численности фактических подходов нерки рек Камчатка (А) и Озерная (Б) по данным 1991–2021 гг.:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска на нерест,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации,  $E_{opt}$  — оптимальный ориентир эксплуатации;  $N_{opt}$  — оптимальный ориентир подхода (возврата) для обеспечения эффективного воспроизводства ( $S_{opt}$ ) и эксплуатации ( $E_{opt}$ )

Fig. 16. The graphical representation of the HCR and abundance of the actual runs of sockeye salmon in the Kamchatka (A) and Ozernaya (B) Rivers according to the data of 1991–2021:  $S_{buf}$  is the spawning escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference,  $E_{opt}$  is the optimal reference for exploitation;  $N_{opt}$  is the optimal run (return) reference to ensure efficient reproduction ( $S_{opt}$ ) and exploitation ( $E_{opt}$ )

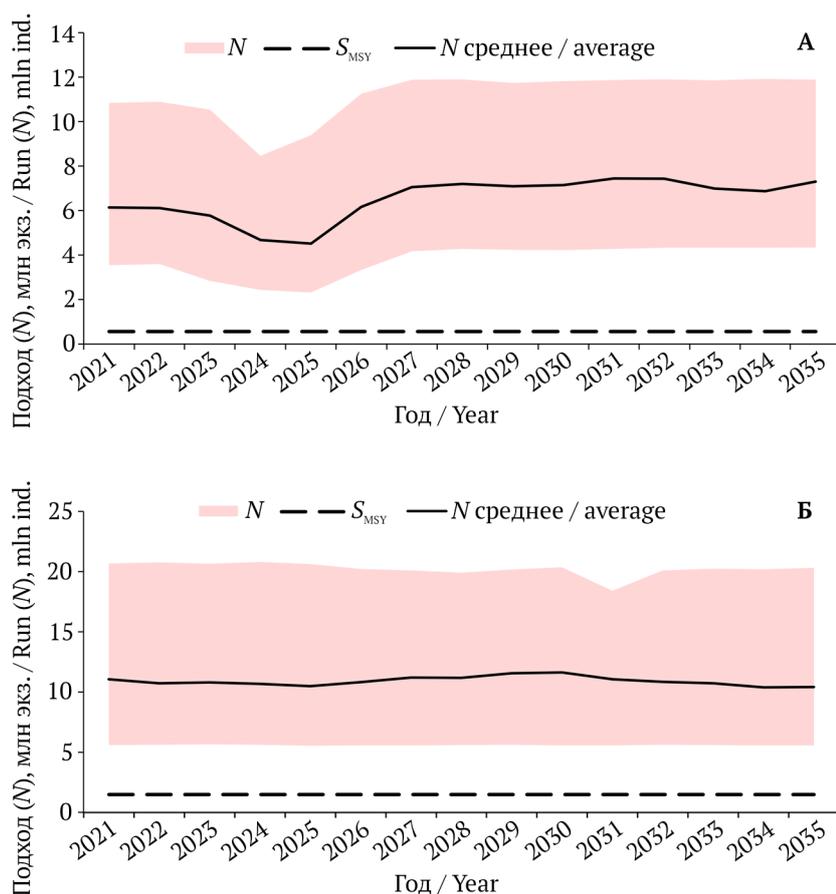


Рис. 17. Имитационная динамика численности запасов (подходов) нерки рек Камчатка (А) и Озерная (Б) с учетом уровня  $S_{MSY}$ , рассчитанная для периода 2021–2035 гг.:  $S_{MSY}$  — целевой ориентир пропуска, обеспечивающий максимальный устойчивый вылов,  $N$  — общий запас (подход) производителей (цветом выделен размах значений  $N$  для 95% бутстреп-выборок)

Fig. 17. The simulation dynamics of the stock abundance (runs) of sockeye salmon in the Kamchatka (A) and Ozernaya (B) Rivers in view of the level of  $S_{MSY}$ , calculated for the period 2021–2035:  $S_{MSY}$  is the escapement target reference that ensures the maximum sustainable yield,  $N$  is the total stock (run) of spawners (the color highlights the range of  $N$  values for 95% of bootstrap samples)

Таким образом, прогнозируемый объем вылова нерки р. Озерной, при средней массе одной особи 2,26 кг, в 2022 г. составит 17,200 тыс. т:

$$C_{2022} = 9,13 \text{ млн рыб} \times 2,26 \text{ кг} \approx 17,200 \text{ тыс. т.}$$

### Кижуч

На Камчатке основное воспроизводство кижуча сосредоточено в реках западного побережья и в р. Камчатке (восточное побережье). По среднемноголетним данным 1971–2021 гг., общая добыча вида на Восточной и Западной Камчатке составляла приблизительно 40–50% и 50–60% соответственно. Однако в последние десять лет наблюдался заметный рост численности западнокамчатского кижуча. В настоящее время в данном регионе добывают порядка 70% от общего вылова вида на Камчатке. Поэтому в представленной работе мы приводим пример применения ПРП для кижуча, представляющего комплекс стад Западной Камчатки.

Тестирование ориентиров по эксплуатации и формированию нерестового запаса кижуча Западной Камчатки выполняли с использованием следующих критериев:  $E_{buf}$  — 75–95% (с шагом в 5%);  $S_{buf}$  — 40–80 тыс. рыб (с шагом 10 тыс. рыб).

В результате тестирования параметров ПРП выбран следующий оптимальный режим управления запасом: ориентир по эксплуатации ( $E_{buf}$ ) на уровне 95% и ориентир пропуска ( $S_{buf}$ ) на уровне 70 тыс. рыб (рис. 18). При этом среднемноголетние оптимальные ориентиры пропуска кижуча на нерест ( $S_{opt}$ ) в реки западного побережья и его эксплуатации ( $E_{opt}$ ) составили 232 тыс. рыб и 88%. Графическое представление модели ПРП и показателей численности фактических подходов кижуча Западной камчатки показано на рисунке 19.

Результаты тестирования долгосрочных рисков использования разработанных моделей ПРП представлены на графиках имитационной динамики численности рассматриваемой единицы запаса кижуча при выбранных режимах регулирования промысла в перспективе на 15 лет (рис. 20). Отметим, что в течение рассматриваемого периода подходы вида всегда будут выше уровня целевого ориентира пропуска, поэтому риск равен 0. Следовательно, выбранная стратегия управления промыслом для кижуча Западной Камчатки может считаться адекватной.

Пример практического применения ПРП для данной единицы запасов вида выглядит следующим образом.

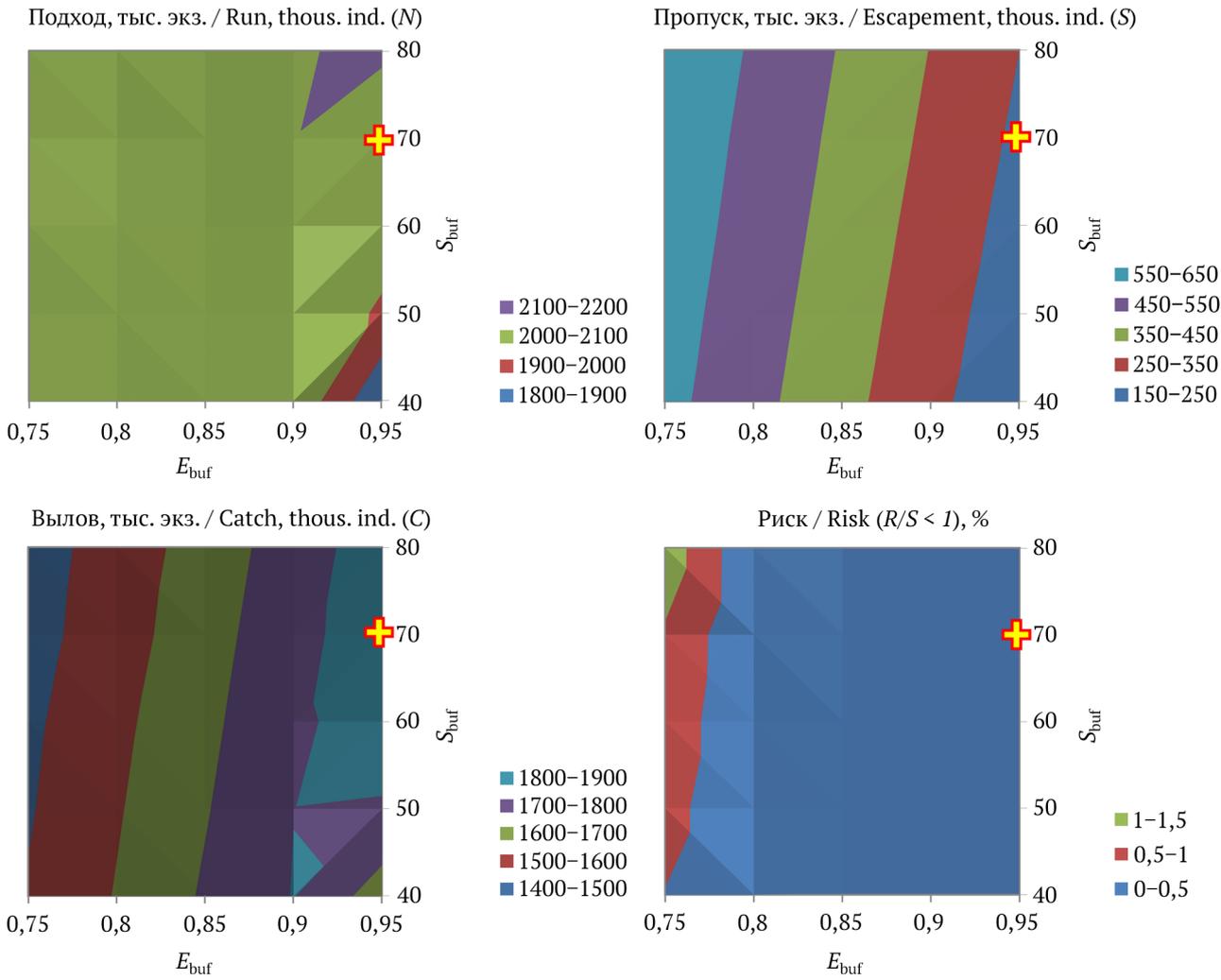


Рис. 18. Результаты тестирования и выбор параметров ПРП кижуча Западной Камчатке с использованием бутстреп-выборки:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропущка,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации  
 Fig. 18. The results of testing and selection of the HCR parameters for coho salmon on West Kamchatka using bootstrap samples:  $S_{buf}$  is the escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference

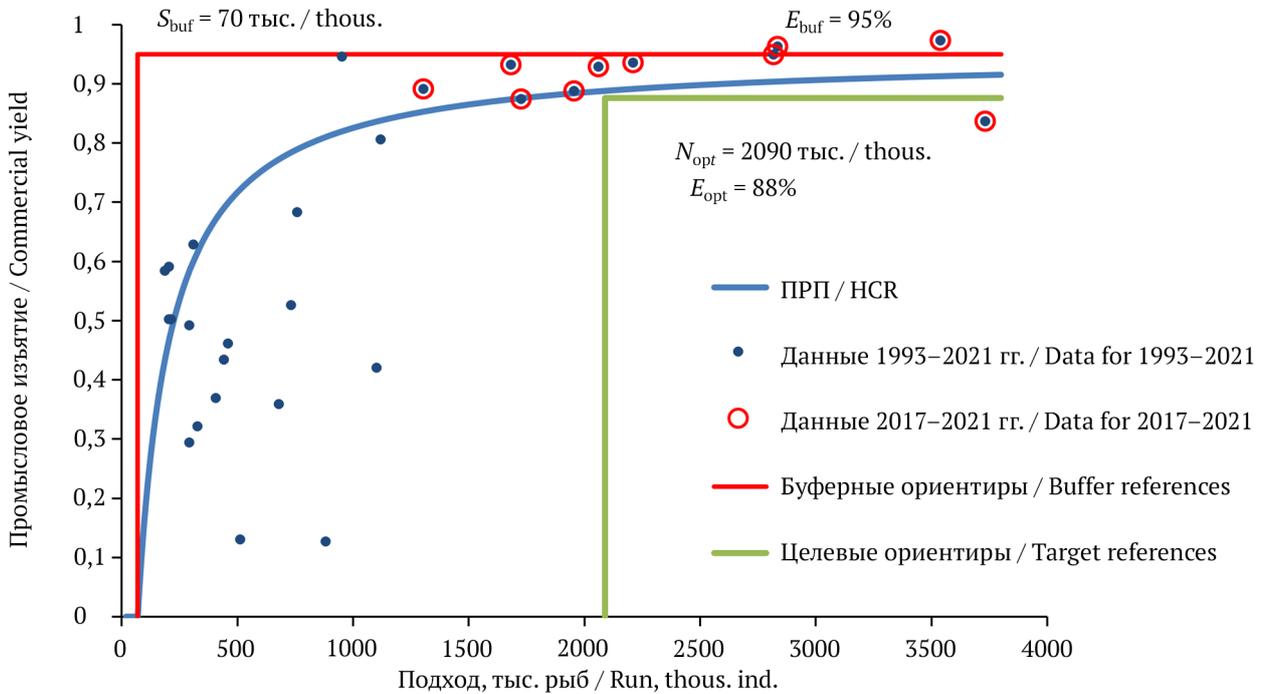


Рис. 19. Графическое представление ПРП и показателей численности фактических подходов кижуча Западной Камчатке по данным 1993–2021 гг.:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропущка на нерест,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации,  $E_{opt}$  — оптимальный ориентир эксплуатации;  $N_{opt}$  — оптимальный ориентир подхода (возврата) для обеспечения эффективного воспроизводства ( $S_{opt}$ ) и эксплуатации ( $E_{opt}$ )  
 Fig. 19. The graphical representation of the HCR and abundance of the actual runs of coho salmon on West Kamchatka according to the data of 1993–2021:  $S_{buf}$  is the spawning escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference,  $E_{opt}$  is the optimal reference for exploitation;  $N_{opt}$  is the optimal run (return) reference to ensure efficient reproduction ( $S_{opt}$ ) and exploitation ( $E_{opt}$ )

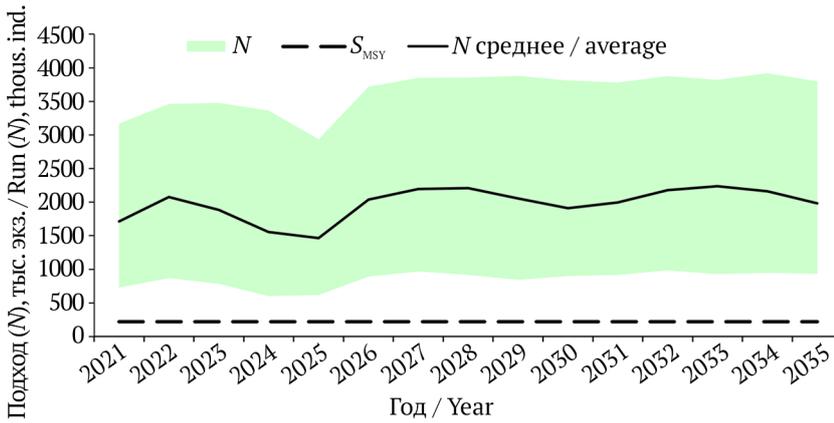


Рис. 20. Имитационная динамика численности запасов (подходов) кижуча Западной Камчатки с учетом уровня  $S_{MSY}$ , рассчитанная для периода 2021–2035 гг.:  $S_{MSY}$  — целевой ориентир пропускания, обеспечивающий максимальный устойчивый вылов,  $N$  — общий запас (подход) производителей (цветом выделен размах значений  $N$  для 95% бутстреп-выборок)  
 Fig. 20. The simulation dynamics of the stock abundance (runs) of coho salmon on West Kamchatka in view of the level of  $S_{MSY}$ , calculated for the period 2021–2035:  $S_{MSY}$  is the escapement reference, ensuring the maximum sustainable yield,  $N$  is the total spawning stock (run) (the color highlights the range of  $N$  values for 95% bootstrap samples)

Численность подхода производителей кижуча Западной Камчатки (Камчатско-Курильская и Западно-Камчатская подзоны) в 2022 г. ожидается в количестве 1980 тыс. рыб. Согласно ПРП (рис. 19), уровень эксплуатации запаса составит 89% (0,89):

$$E_{2022} = 0,95 \times \frac{1980 - 70}{1980 + 70} \approx 0,89.$$

Соответственно, численность производителей кижуча Западной Камчатки, которые будут пропущены на нерестилища, оценена в 218 тыс. особей:

$$S_{2022} = 1980 \text{ тыс. рыб} \times (1 - 0,89) \approx 218 \text{ тыс. рыб.}$$

Численность рыб, которых может изъять промысел, составит 1762 тыс. особей:

$$C_{2022} = 1980 \text{ тыс. рыб} \times 0,89 \approx 1762 \text{ тыс. рыб,}$$

что при средней массе одной особи кижуча, равной 2,80 кг, эквивалентно 5000 т:

$$C_{2022} = 1762 \text{ тыс. рыб} \times 2,80 \text{ кг} \approx 5000 \text{ т.}$$

### Чавыча

Основным центром воспроизводства чавычи Камчатки является бассейн р. Камчатки (Восточная Камчатка). Здесь добывают около 70–80% этого вида в регионе. Поэтому для данной единицы запаса разработано ПРП, что позволяет применять предосторожный подход к управлению запасами этого вида.

Тестирование ориентиров по эксплуатации и формированию нерестового запаса чавычи р. Камчатки выполняли с использованием следующих критериев:  $E_{buf}$  — 75–95% (с шагом в 5%);  $S_{buf}$  — 15–30 тыс. рыб (с шагом 5 тыс. рыб).

В результате тестирования параметров ПРП выбран следующий оптимальный режим управления запасом: ориентир по эксплуатации ( $E_{buf}$ ) на уровне 90% и ориентир пропускания ( $S_{buf}$ ) на уровне 25 тыс. рыб (рис. 21). При этом среднесуточные оптимальные ориентиры

пропуска чавычи на нерест ( $S_{opt}$ ) в р. Камчатке и ее эксплуатации ( $E_{opt}$ ) составили 51 тыс. рыб и 60%. Графическое представление модели ПРП и показателей численности фактических подходов чавычи р. Камчатки показано на рисунке 22.

Результаты тестирования долгосрочных рисков использования разработанных моделей ПРП представлены на графиках имитационной динамики численности рассматриваемой единицы запаса чавычи при выбранных режимах регулирования промысла в перспективе на 15 лет (рис. 23). Отметим, что в течение рассматриваемого периода подходы вида всегда будут выше уровня целевого ориентира пропускания, поэтому риск равен 0. Следовательно, выбранная стратегия управления промыслом для чавычи р. Камчатки может считаться адекватной.

Практическое применение ПРП чавычи р. Камчатки представлено ниже.

Численность подхода производителей в 2022 г. ожидается в количестве 149,2 тыс. рыб, а доля промыслового изъятия, согласно разработанного ПРП (рис. 22), оценена на уровне 64%, или 96 тыс. особей:

$$E_{2022} = 0,90 \times \frac{149,2 - 25}{149,2 + 25} \approx 0,64,$$

$$C_{2022} = 149,2 \times 0,64 \approx 95,5 \text{ тыс. рыб.}$$

Соответственно, численность производителей, которых необходимо пропустить на нерест, определена в объеме 36% от подхода или 54 тыс. рыб:

$$S_{2022} = 149,2 \times (1 - 0,64) \approx 54 \text{ тыс. рыб.}$$

Таким образом, ПВ чавычи р. Камчатки на 2022 г. определен на уровне 95,5 тыс. особей, что при средней массе 1 особи чавычи, равной 4,20 кг, эквивалентно 0,400 тыс. т:

$$C_{2022} = 95,5 \text{ тыс. рыб} \times 4,20 \text{ кг} \approx 0,400 \text{ тыс. т.}$$

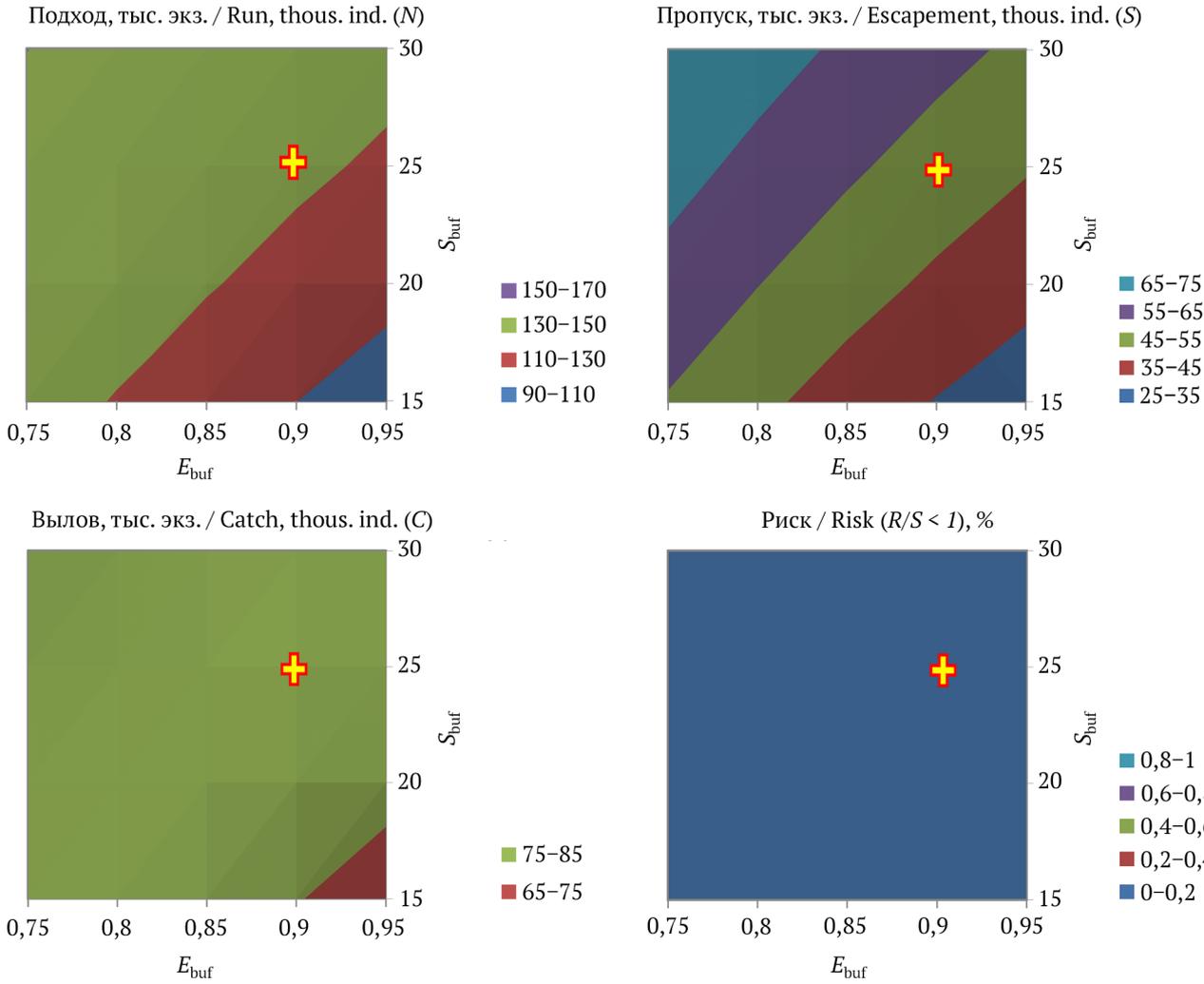


Рис. 21. Результаты тестирования и выбор параметров ПРП чавычи р. Камчатка с использованием бутстреп-выборки:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации  
 Fig. 21. The results of testing and selection of the HCR parameters for chinook salmon in the Kamchatka River using bootstrap samples:  $S_{buf}$  is the escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference

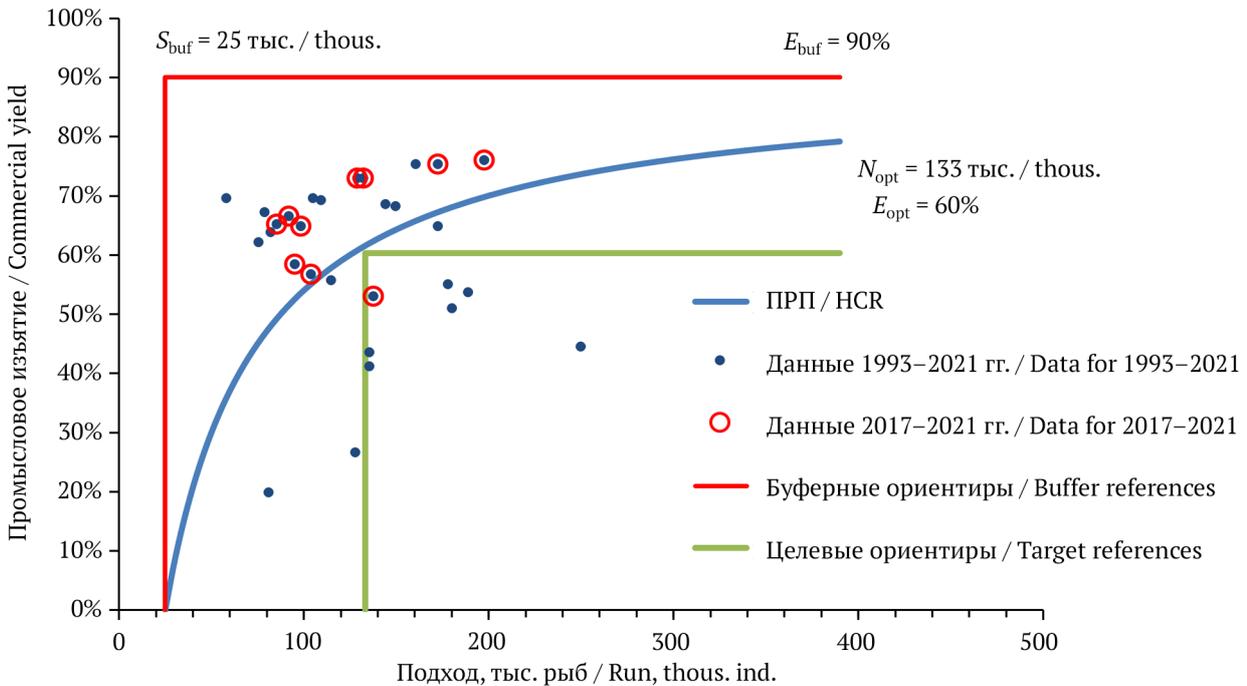


Рис. 22. Графическое представление ПРП и показателей численности фактических подходов чавычи р. Камчатка по данным 1993–2021 гг.:  $S_{buf}$  — буферный ориентир пропуска на нерест,  $E_{buf}$  — буферный ориентир эксплуатации,  $E_{opt}$  — оптимальный ориентир эксплуатации;  $N_{opt}$  — оптимальный ориентир подхода (возврата) для обеспечения эффективного воспроизводства ( $S_{opt}$ ) и эксплуатации ( $E_{opt}$ )  
 Fig. 22. The graphical representation of the HCR and abundance of the actual runs of chinook salmon in the Kamchatka River based on the data for 1993–2021:  $S_{buf}$  is the spawning escapement buffer reference,  $E_{buf}$  is the exploitation buffer reference,  $E_{opt}$  is an optimal reference for exploitation;  $N_{opt}$  is the optimal run (return) reference to ensure efficient reproduction ( $S_{opt}$ ) and exploitation ( $E_{opt}$ )

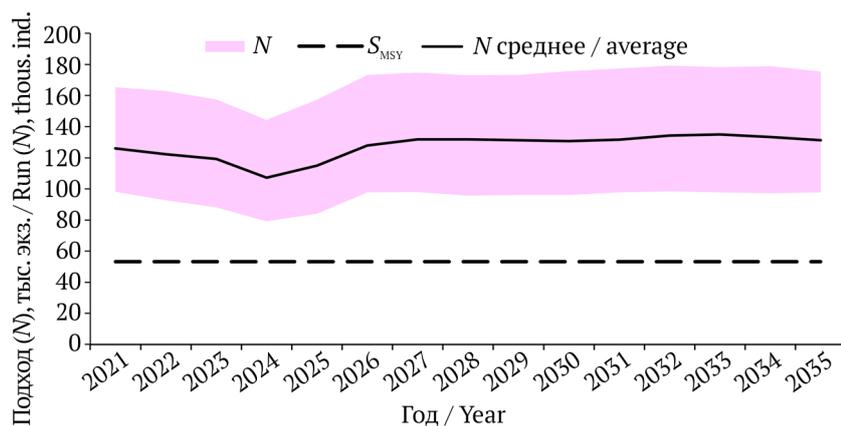


Рис. 23. Имитационная динамика численности запасов (подходов) чавычи р. Камчатки с учетом уровня  $S_{MSY}$ , рассчитанная для периода 2021–2035 гг.:  $S_{MSY}$  — целевой ориентир пропуска, обеспечивающий максимальный устойчивый вылов,  $N$  — общий запас (подход) производителей (цветом выделен размах значений  $N$  для 95% бутстреп-выборок)

Fig. 23. The simulation dynamics of the number of stocks (approaches) of Chinook salmon Kamchatka River taking into account the level of  $S_{MSY}$ , calculated for the period 2021–2035:  $S_{MSY}$  is the pass target providing the maximum sustainable catch,  $N$  is the total stock (approach) of spawners (the color highlights the range of  $N$  values for 95% of bootstrap samples)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования по оценке динамики разноуровневых временных рядов численности (подход (возврат), промысел, пропуск на нерест) тихоокеанских лососей Камчатки позволили разработать системный подход по формированию правил регулирования промысла (ПРП) для основных региональных единиц запасов отдельных видов. Моделирование ПРП выполнено с учетом предосторожного подхода воздействия на лососевые запасы, обеспечивающего сохранение ресурса и максимальный устойчивый вылов (MSY). В настоящее время подобный подход к управлению промыслом является неперенным экологическим условием международных принципов рационального использования водных биологических ресурсов. В отношении тихоокеанских лососей Камчатки это сделано впервые.

Тихоокеанские лососи относятся к трансграничным запасам гидробионтов, поэтому применение единой схемы ПРП для обеспечения их стабильного воспроизводства и добычи (вылова) имеет особое рыбохозяйственное значение. Значимость этой проблеме придает то, что на Камчатке воспроизводство тихоокеанских лососей практически на 100% обеспечено нативными стадами. Ценность диких лососей обуславливается не только экономической рентабельностью, но и необходимостью сохранения генетического разнообразия данной группы рыб в пределах ареала. В современных реалиях масштабного развития аквакультуры и, в частности, пастбищного лососеводства необходимость сохранения нативных стад тихоокеанских лососей является международной задачей. Разработанные адаптированные модели ПРП, которые позволяют определить буферные ориентиры пропуска (нерестовый запас) и экс-

плуатации (промысловое изъятие) наиболее значимых единиц лососевых запасов Камчатки, несомненно, служат выполнению данной цели. Теоретически, ориентиры ПРП должны обеспечивать системное заполнение лососевых нерестилищ на уровне, необходимом для формирования стабильного и высокого уровня рыболовства, с учетом исходной величины эксплуатируемого запаса.

Однако следует признать, что подобные условия не всегда соблюдаются. В первую очередь это связано с тем, что оперативное регулирование промысла тихоокеанских лососей осуществляется на основе данных фактических подходов (возвратов) производителей конкретных единиц запасов. При этом пропуск лососей на нерест производится по схеме проходных дней или периодов, которые разрабатываются отдельно для морских и речных рыболовных участков (РЛУ) в зависимости от уровня запасов и региональной принадлежности лососей в подходах. Все это приводит к тому, что в конечном итоге происходит корректировка установленных ранее объемов изъятия, а также определенных с помощью ПРП количественных ориентиров пропуска на нерест. Причем зачастую оценка нерестового запаса происходит уже ближе к окончанию промысла, так как авиаучетные работы проводятся со значительным лагом по времени относительно сроков начала эксплуатации лососевых запасов. Это связано с периодической нерестовых миграций лососей в бассейнах рек непосредственно до мест нереста, где и формируются учитываемые скопления производителей. Поэтому итоговые оценки пропуска лососей на нерест могут быть как ниже оценки, рассчитанной по ПРП, так и выше.

При этом базовым критерием ПРП выступает именно ориентир пропуска производителей на нерест. Это связано с законодательно определенным приоритетом сохранения водных биоресурсов по отношению к осуществляемой рыбохозяйственной деятельности. Поэтому на Камчатке зачастую оценки пропуска, полученные с помощью моделей ПРП, изначально оцениваются на максимальном уровне, необходимым для расширенного воспроизводства лососевых запасов. По сути, срабатывает предосторожный подход при управлении промыслом.

Подчеркнем, что в реальной практике буферные ориентиры ПРП служат больше как стартовые критерии пропуска и эксплуатации тихоокеанских лососей, чем четкие границы управления запасами. При этом имеющаяся вариабельность ключевых показателей состояния лососевых запасов (пропуск и вылов) позволяет проводить корректирующий анализ параметров ПРП с учетом фактической динамики численности лососей. Последнее дает возможность значительно расширить исходную информативную базу для принятия решений при долгосрочном прогнозировании динамики запасов и оперативном регулировании промысла тихоокеанских лососей.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Бабаян В.К. 2000. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ): Анализ и рекомендации по применению: Моногр. М.: ВНИРО. 192 с.
- Бугаев А.В., Шпигальская Н.Ю., Зикунова О.В., Артюхина Н.Б., Фельдман М.Г., Шубкин С.В., Коваленко М.Н. 2020. Обзор итогов лососевой путины – 2020 в Камчатском крае (Сообщ. 1): динамика и статистика промысла, оценки нерестового фонда // Бюл. № 15 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. С. 17–43.
- Дубынин В.А., Шевляков Е.А., Ильин О.И. 2007. К методике прогнозирования численности поколений нерки *Oncorhynchus nerka* стада р. Озерной // Изв. ТИНРО. Т. 149. С. 219–225.
- Зикунова О.В., Дубынин В.А., Заварина Л.О., Шубкин С.В., Бугаев А.В. 2021. Тенденции изменения численности, прогноз, управление запасами нерки *Oncorhynchus nerka* и кеты *Oncorhynchus keta* в Камчатском крае // Вопр. рыболовства. Т. 22. № 4. С. 75–85.
- Криксунов Е.А., Снетков М.А. 1985. Расширенная модель формирования пополнения нерестового стада рыб / Теория формирования численности стад промысловых рыб. М.: Наука. С. 46–55.
- Лососи–2021 (Путинный прогноз). 2021. Владивосток: ТИНРО. 102 с.
- Лососи–2022 (Путинный прогноз). 2022. Владивосток: ТИНРО. 107 с.
- Мина М.В. 1980. Популяции и виды в теории и в природе / Уровни организации биологических систем. М.: Наука. С. 20–40.
- Остроумов А.Г. 1962. Опыт применения аэрометодов учета тихоокеанских лососей в реках Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Кн. ред. «Камчатской правды». 41 с.
- Остроумов А.Г. 1975. Нерестовый фонд и состояние запасов дальневосточных лососей в водоемах п-ова Камчатка и Корякского нагорья в 1957–1971 гг. (по материалам авиаучетов и аэрофотосъемок) // Тр. ВНИРО. Т. 106. С. 21–33.
- Фельдман М.Г. 2020. Использование метода случайных лесов деревьев решений Random Forest в целях прогнозирования подходов горбуши Северо-Востока Камчатки // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана: Сб. науч. тр. КамчатНИРО. Вып. 59. С. 76–96.
- Фельдман М.Г., Бугаев А.В. 2021. Современные принципы управления запасами горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Камчатского края (динамика численности, прогнозирование, регулирование промысла) // Вопр. рыболовства. Т. 22. № 4. С. 86–95.
- Фельдман М.Г., Шевляков Е.А. 2015. Выживаемость камчатской горбуши как результат совокупного воздействия плотностной регуляции и внешних факторов среды // Изв. ТИНРО. Т. 182. С. 88–114.
- Фельдман М.Г., Шевляков Е.А., Артюхина Н.Б. 2016. Оценка ориентиров пропуска производителей тихоокеанских лососей *Oncorhynchus* в бассейнах рек Восточной и Юго-Восточной Камчатки // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана: Сб. науч. тр. КамчатНИРО. Вып. 41. С. 51–80.
- Фельдман М.Г., Шевляков Е.А., Артюхина Н.Б. 2018. Оценка ориентиров пропуска производителей тихоокеанских лососей *Oncorhynchus* в бассейнах рек Северо-Восточной Камчатки // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана: Сб. науч. тр. КамчатНИРО. Вып. 51. С. 5–29.
- Фельдман М.Г., Шевляков Е.А., Артюхина Н.Б. 2019. Оценка ориентиров пропуска производителей тихоокеанских лососей *Oncorhynchus* в бассейнах рек Западной Камчатки // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана: Сб. науч. тр. КамчатНИРО. Вып. 52. С. 50–78.

- Хилборн Р., Уолтерс К. 2001. Количественные методы оценки рыбных запасов. Выбор, динамика, неопределенность: Моногр. СПб.: Политехника. 228 с.
- Шевляков Е.А., Маслов А.В. 2011. Реки, определяющие воспроизводство тихоокеанских лососей на Камчатке, как реперы для оценки заполнения нерестового фонда // Изв. ТИНРО. Т. 164. С. 114–139.
- Шевляков Е.А., Фельдман М.Г., Канзепарова А.Н. 2021. Модели запас–пополнение, ориентиры управления и правила регулирования промысла для основных чукотских стад нерки и кеты // Изв. ТИНРО. Т. 201, № 3. С. 735–751.
- Barrowman N.J., Myers R.A. 2000. Still more spawner-recruitment curves: the hockey-stick and its generalizations // Can. J. of Fish. and Aqua. Sci. Vol. 57. P. 665–676.
- Beverton R.J.H., Holt S.J. 1957. On the dynamics of exploited fish populations // Fish. Invest. Ser. 2. U.K. Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, London. Vol. 19. 533 p.
- Breiman L. 2001. “Random Forests” // Machine Learning. № 45 (1). P. 5–32.
- FAO. 1995. Code of conduct for responsible fisheries / FAO, Rome. 14 p.
- Holland D.S. 2010. Management Strategy Evaluation and Management Procedures: Tools for Rebuilding and Sustaining Fisheries // OECD Food, Agriculture and Fisheries Working Papers. № 25. 67 p.
- Peterman R.M. 1982. Model of salmon age structure and its use in pre-season forecasting and studies of marine survival // Can. J. of Fish. and Aqua. Sci. № 39. P. 1444–1452.
- Ricker W. 1954. Stock and recruitment // J. of the fisheries research board of Canada. Vol. 11. № 5. P. 559–623.
- Shepherd J.G. 1982. A family of general production curves for exploited populations // Math. Biosci. Vol. 59. P. 77–93.
- UN. 1995. Agreement for the implementation of the provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982 relating to the conservation and management of straddling fish stocks and highly migratory fish stocks // UN General Assembly Annex 3, A/Conf. 164/37, 8 September 1995. P. 45–81.
- Walters C.J., Hilborn R. 1976. Adaptive control of fishing systems // J. Fish. Res. Board Can. Vol. 33. P. 145–189.
- REFERENCES**
- Babayan V.K. *Predostorozhnyy podkhod k otsenke obshchego dopustimogo ulova (ODU): Analiz i rekomendatsii po primeneniyu* [Precautionary approach: to assessment of total allowable catch (TAC): analysis and practical recommendations]. Moscow: VNIRO, 2000, 192 p.
- Bugaev A.V., Shpigalskaya N.Yu., Zikunova O.V., Artyukhina N.B., Feldman M.G., Shubkin S.V., Kovalenko M.N. Review of the results of the salmon season – 2020 in the Kamchatka Territory (Message 1): dynamics and statistics of the fishery, estimates of the spawning fund. *Bul. No. 15 of the study of Pacific salmon in the Far East*, 2020, pp. 17–43. (In Russian)
- Dubynin V.A., Shevlyakov E.A., Ilyin O.I. On the forecast method of sockeye salmon *Oncorhynchus nerka* generation abundance for the Ozernaya River stock. *Izvestia TINRO*, 2007, vol. 149, pp. 219–225. (In Russian)
- Zikunova O.V., Dubynin V.A., Zavarina L.A., Shubkin S.V., Bugaev A.V. Trends in abundance, prediction, fishery management sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) and chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in Kamchatka territory. *Problems of Fisheries*, 2021, no. 4, pp. 75–85. (In Russian)
- Kriksunov E.A., Snetkov M.A. An extended model of the formation of the replenishment of the spawning stock of fish. *Teoriya formirovaniya chislennosti stad promyslovykh ryb* [Theory of the formation of the number of stocks of commercial fish]. Moscow: Nauka, 1985, pp. 46–55.
- Lososi-2021 (putinnyy prognoz)* [Salmon – 2021 (Fishery forecast)]. Vladivostok: TINRO, 2021. 102 p. (In Russian)
- Lososi-2022 (putinnyy prognoz)* [Salmon – 2022 (Fishery forecast)]. Vladivostok: TINRO, 2022. 102 p. (In Russian)
- Mina M.V. *Populyatsii i vidy v teorii i v prirode. Urovni organizatsii biologicheskikh sistem* [Populations and species in theory and in nature. Levels of organization of biological systems]. Moscow: Nauka, 1980, pp. 20–40.
- Ostroumov A.G. *Opyt primeneniya aerometodov ucheta tikhoookeanskikh lososey v rekakh Kamchatki* [The experience of using aeromethods of Pacific salmon accounting in the rivers of Kamchatka]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 1962, 41 p.
- Ostroumov A.G. The Spawning Fund and the State of Stocks of Far Eastern Salmon in the Water Bodies of the Kamchatka Peninsula and the Koryak Highlands in 1957–1971 (Based on aerial surveys and aerial photographs). *Trudy VNIRO*, 1975, vol. 106, pp. 21–33. (In Russian)
- Feldman M.G. Using the decisions of the random forest algorithm for the purposes of forecasting pink salmon runs on North-Eastern Kamchatka. *The researchers of the aquatic biological resources of*

- Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean*, 2020, vol. 59, pp. 76–96. (In Russian)
- Feldman M.G., Bugaev A.V. Modern principles of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) stocks management in the Kamchatka region (population dynamics, forecasting, fishing regulation). *Problems of Fisheries*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 86–95. (In Russian)
- Feldman M.G., Shevlyakov E.A. Survival of Kamchatka pink salmon as result of combined influence of density regulation and environmental factors. *Izvestia TINRO*, 2015, vol. 182, pp. 88–114. (In Russian)
- Feldman M.G., Shevlyakov E.A., Artukhina N.B. An assessment of the pacific salmon *Oncorhynchus* adult escapement parameters for the river basins on East and Southeast Kamchatka. *The researchers of the aquatic biological resources of Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean*, 2016, vol. 41, pp. 51–80. (In Russian)
- Feldman M.G., Shevlyakov E.A., Artukhina N.B. Evaluation of pacific salmon spawning escapement parameters for the river basins of North-East Kamchatka. *The researchers of the aquatic biological resources of Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean*, 2018, vol. 51, pp. 5–29. (In Russian)
- Feldman M.G., Shevlyakov E.A., Artukhina N.B. Evaluation of pacific salmon spawning escapement parameters for the river basins of West Kamchatka. *The researchers of the aquatic biological resources of Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean*, 2019, vol. 52, pp. 50–78. (In Russian)
- Hilborn R., Walters C.J. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty. New York: Chapman and Hall, 1992, 228 p.
- Shevlyakov E.A., Maslov A.V. The rivers determining reproduction of Pacific salmon in Kamchatka as indicators of spawning grounds filling. *Izvestia TINRO*, 2011, vol. 164, pp. 114–139. (In Russian)
- Shevlyakov E.A., Feldman M.G., Kanzeparova A.N. Stock-recruitment models, principles of management and rules for regulating the fishery on the main Chukotka stocks of sockeye and chum salmon. *Izvestiya TINRO*, 2021, vol. 201, no. 3, pp. 735–751. (In Russian)
- Barrowman N.J., Myers R.A. Still more spawner-recruitment curves: the hockey-stick and its generalizations. *Can. J. of Fish. and Aqua. Sci.*, 2000, vol. 57, pp. 665–676.
- Beverton R.J.H., Holt S.J. On the dynamics of exploited fish populations. *Fish. Invest. Ser. 2*. U.K. Ministry of Agriculture, Food and Fisheries, London, 1957, vol. 19, 533 p.
- Breiman L. “Random Forests”. *Machine Learning*, 2001, no. 45 (1), pp. 5–32.
- FAO. Code of conduct for responsible fisheries. FAO, 1995, Rome, 14 p.
- Ricker W. Stock and recruitment. *J. of the fisheries research board of Canada*, 1954, vol. 11, no. 5, pp. 559–623.
- Holland D.S. Management Strategy Evaluation and Management Procedures: Tools for Rebuilding and Sustaining Fisheries. OECD Food, Agriculture and Fisheries Working Papers, 2010, no. 25, 67 p.
- Peterman R.M. Model of salmon age structure and its use in preseason forecasting and studies of marine survival. *Can. J. of Fish. and Aqua. Sci.*, 1982, no. 39, pp. 1444–1452.
- Shepherd J.G. A family of general production curves for exploited populations. *Math. Biosci*, 1982, vol. 59, pp. 77–93.
- UN. Agreement for the implementation of the provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982 relating to the conservation and management of straddling fish stocks and highly migratory fish stocks. UN General Assembly Annex 3, A/Conf. 164/37, 8 September 1995. P. 45–81.
- Walters C.J., Hilborn R. Adaptive control of fishing systems. *J. Fish. Res. Board Can.*, 1976, vol. 33, pp. 145–189.

#### **Информация об авторах**

- М.Г. Фельдман — канд. биол. наук, вед. н. с. Камчатского филиала ВНИРО (КамчатНИРО)
- А.В. Бугаев — док. биол. наук, зам. руководителя Камчатского филиала ВНИРО (КамчатНИРО)
- О.В. Зикунова — канд. биол. наук, зав. лабораторией Камчатского филиала ВНИРО (КамчатНИРО)
- С.В. Шубкин — вед. специалист Камчатского филиала ВНИРО (КамчатНИРО)
- В.А. Дубынин — гл. специалист Камчатского филиала ВНИРО (КамчатНИРО)
- Information about the authors**
- Mark G. Feldman – Ph. D. (Biology), Leading Scientist (KamchatNIRO)
- Alexandr V. Bugaev – Dr. of Science (Biology), Deputy Director (KamchatNIRO)
- Olga V. Zikunova – Ph. D. (Biology), Head of Laboratory (KamchatNIRO)
- Sergey V. Shubkin – Leading specialist (KamchatNIRO)
- Vladimir A. Dubynin – Principal specialist (KamchatNIRO)

Статья поступила в редакцию: 20.06.2022

Одобрена после рецензирования: 27.06.2022

Статья принята к публикации: 27.06.2022