

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 639.2.053(282.257.1)

**Е.А. Шевляков¹, М.Г. Фельдман², А.Н. Канзепарова^{1*}**¹ Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;² Камчатский филиал ВНИРО (КамчатНИРО),
683000, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, 18**МОДЕЛИ ЗАПАС–ПОПОЛНЕНИЕ, ОРИЕНТИРЫ УПРАВЛЕНИЯ
И ПРАВИЛА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОМЫСЛА
ДЛЯ ОСНОВНЫХ ЧУКОТСКИХ СТАД НЕРКИ И КЕТЫ**

На основании связи «родители–потомки» определяются биологические ориентиры управления запасами анадырской кеты и мейныпильгынской нерки. Предложены адаптивные правила регулирования промысла на основании предосторожных буферных ориентиров управления, протестированных с помощью бутстреп-выборок в различных режимах промысловой нагрузки с помощью имитационной модели запаса, построенной на особенностях наблюдаемых отклонений от базовой модели «запас–пополнение». Анализ промысла обеих популяций показал, что уровень эксплуатации анадырской кеты значительно ниже оптимального, а для запаса мейныпильгынской нерки желательно увеличивать пропуск на нерест при небольших подходах.

Ключевые слова: тихоокеанские лососи, промысел, запасы, пропуск производителей, ориентиры управления, правила регулирования промысла.

DOI: 10.26428/1606-9919-2021-735-751.

Shevlyakov E.A., Feldman M.G., Kanzeperova A.N. Stock-recruitment models, principles of management and rules for regulating the fishery on the main Chukotka stocks of sockeye and chum salmon // *Izv. TINRO*. — 2021. — Vol. 201, Iss. 3. — P. 735–751.

Fishery pressure on populations of pacific salmons has increased in the Russian Far East in the last decade because of growing fishing and processing capacity, so measures for the fishery regulation are necessary, as the regime of pass days in rivers and marine coastal areas. Chukotka is now almost the only region where such restrictions are still absent. However, if the interest of fishery industry to the stocks of pacific salmon in Chukotka will grow, a successful scientifically based strategy of fishery should be developed to maintain exploitation of the stocks without exceeding the limits of excessive use. Year-to-year time series on spawning stock and recruitment of chum salmon in the Anadyr area and sockeye salmon in the Meynyp-

* Шевляков Евгений Александрович, кандидат биологических наук, заведующий отделом, e-mail: evgeniy.shevlyakov@tinro-center.ru; Фельдман Марк Геннадьевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: feldman.m.g@kamniro.ru; Канзепарова Альбина Назиповна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: albina.kanzeperova@tinro-center.ru.

Shevlyakov Evgeny A., Ph.D., head of department, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: evgeniy.shevlyakov@tinro-center.ru; Feldman Mark G., Ph.D., leading researcher, Kamchatka branch of VNIRO (KamchatNIRO), 18 Naberezhnaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000, Russia, e-mail: feldman.m.g@kamniro.ru; Kanzeperova Albina N., Ph.D., leading researcher, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, e-mail: albina.kanzeperova@tinro-center.ru.

ilgyn area were analysed for development of recruitment models and establishment of general principles for adaptive fishery management. Nonlinear adaptive fishery management based on principles of buffer managing is proposed and tested under various regimes of landing using the stock simulation models accounting deviations from the standard stock-recruitment model. There is concluded that the level of exploitation is much lower than optimal for the Anadrychum salmon, whereas escapement for spawning of the Meynypilgyn sockeye salmon should be increased in cases of low spawning stock of this species.

Key words: pacific salmon, fishery, spawning stock, escapement of salmon, management principle, adaptive fishery management rule.

Введение

Тихоокеанские лососи являются одним из наиболее ценных объектов мирового рыболовства. Совершенствование форм ведения лососевого хозяйства и научные исследования в этой области немыслимы без достаточно надежных сведений о численности производителей, ежегодно заходящих в реки на нерест. Располагая этими данными, можно судить о состоянии стад лососей в различных речных бассейнах, оценивать степень воздействия промысла на эти стада, прогнозировать численность популяции лососей, в том числе оценивать тенденции на несколько лет вперед. Количественная оценка заполнения лососями нерестилищ является одним из основных и наиболее ответственных компонентов в расчетах прогнозов подходов тихоокеанских лососей и определения величины их промыслового изъятия в целях реализации рациональной стратегии рыболовства.

Развернутые в ряде регионов в 50–60-е гг. прошлого века тотальные авианаблюдения за нерестом тихоокеанских лососей дали возможность накопить многолетние ряды данных, с достаточной точностью оценить взаимосвязь количества отнерестившихся лососей с обилием пополнения. В исследованиях, тем не менее, продолжал доминировать натуралистический подход к оценке вместимости нерестилищ через расчет их площади, проводимый визуально по степени заполнения производителями площадей, трактуемых экспертно как потенциально подходящие для нереста. При этом критерием оценки эффективных нерестилищ оставалась площадь, непосредственно занимаемая производителями, вне зависимости от численности их захода и качества субстрата.

Данный подход привел к системному завышению величины нерестового фонда лососей и некорректности определения ориентиров управления запасами исходя из соотношения параметров оптимальной плотности нерестящихся производителей на единицу площади и общей нерестовой площади.

Рост добывающих и перерабатывающих мощностей в последнее десятилетие обусловил соответствующее увеличение промысловых нагрузок на популяции лососей в большинстве промысловых районов Дальнего Востока и необходимость применения режима проходных дней в реках и морском побережье. Чукотский округ остается едва ли не единственным регионом на Дальнем Востоке России, где до сих пор отсутствует регулирование пропуска через ограничения рыболовства в проходные дни. При этом интерес к региону со стороны рыбной промышленности, особенно с ростом запасов лососей в последние годы, возрастает. В связи с этим неизбежно увеличение промысловых нагрузок на эксплуатируемые популяции чукотских стад лососей, соответственно необходима выработка перспективной научно обоснованной стратегии промысла основных стад, позволяющая эксплуатировать запас в пределах, исключающих их чрезмерное использование, и обеспечивать пропуск производителей на нерест в рекомендованных объемах по мере роста промысловых нагрузок, в том числе и путем введения режимов проходных дней, дающих возможность даже при отсутствии оперативного контроля пропуска гарантированно обеспечивать его требуемый уровень.

Целью данного исследования являлась разработка научно обоснованных рекомендаций по управлению ресурсами тихоокеанских лососей Чукотского автономного округа (ЧАО), учитывающих потребности обеспечения ориентиров оптимального

пропуска производителей на нерест и минимизацию рисков снижения уровня воспроизводства популяций.

Материалы и методы

Для разработки моделей пополнения, а также определения ориентиров управления и правил регулирования промысла (ПРП) использованы ряды «родители–потомки». В случае с неркой Мейныпильгынской озерно-речной системы привлекались оригинальные ряды из материалов прогноза подходов и уловов нерки данного стада под авторством Е.В. Голубь*. Соответствующие современные ряды кеты анадырской группы рек (Анадырь, Великая) построены на экспертных оценках численности пропуска (включенные также и в оценки возврата) и по нашему заключению не могут быть использованы при анализе, имеющем столь существенные прикладные результаты, способные в перспективе нанести ущерб популяциям. Поэтому для получения ориентиров управления анализировались ряды «родители–потомки», содержащие данные прямых авианаблюдений за пропуском в период 1967–1992 гг., из диссертации С.В. Путивкина [1999].

Параллельно существуют ряды данных в отчетах специалистов Магаданского отделения ТИНРО А.В. Евзерова [1976, 1977, 1979–1981], В.В. Волобуева [Биологическая характеристика...1984; Оценка состояния запасов..., 1985], имеющие отличия в оценках численности пропуска кеты на нерестилищах в сравнении с рядами С.В. Путивкина.

До середины 1990-х гг., т.е. до перехода контроля ресурсов ЧАО в зону ответственности ТИНРО, оценку состояния запасов, в частности лососей, в регионе обеспечивали научные группы Магаданского отделения ТИНРО. Кроме чукотского направления магаданские специалисты обеспечивали проведение авиаучетных работ и в реках материкового побережья Хабаровского края и собственно в Магаданской области. Из личного сообщения С.В. Путивкина следует, что тематика, авиаучет, сбор биостатистики, определение возраста в Магаданском отделении ТИНРО в интересующий нас период времени (1970–1990-е гг.) распределялись между разными исполнителями. Между тем авиаучет требовалось проводить по всему североохотоморскому и анадырскому бассейну по нерестилищам нескольких видов лососей и часто — их сезонных форм. Времени для проведения учетов в оптимальных условиях не было, мешали паводки, нелетная погода, фаза захода и т.д. Вследствие этого нередко были экстраполированные либо экспертные оценки захода. Вместе с тем обеспечение полетов было на уровне, не сравнимом с настоящим, поэтому исполнитель, проводивший полноценный полевой сезон, имел возможность получения оценок заполнения нерестилищ в наиболее благоприятные для данных работ сроки, в условиях прозрачности воды и в периоды нерестового хода. Имеющиеся разночтения в оценках обсуждались между исполнителями, в том числе на коллоквиумах, однако в архивных отчетах оставались авторские оценки специалиста, формально ответственного за авиаучет. Впоследствии правомерность использования рядов С.В. Путивкина подтвердил и руководитель соответствующей лаборатории Магаданского отделения ТИНРО в 1980-е и последующие годы В.В. Волобуев. В настоящей работе после получения вышеуказанных разъяснений было принято решение об использовании временных массивов С.В. Путивкина, как в наибольшей степени отвечающих критериям корректности, поскольку считаем, что их игнорирование в контексте проводимой работы недопустимо.

Разработка правил регулирования промысла

При разработке правил регулирования промысла (ПРП) руководствовались следующими соображениями. Уже третье десятилетие основой мировой рыболовной политики и управления рыбными запасами является методология предосторожного

* Например, Лососи—2020 (путинный прогноз). Владивосток: ТИНРО, 2020. 115 с.

подхода [Бабаян, 2000]. Одним из базисов предосторожного подхода является учет неопределенностей, связанных как с человеческим фактором, так и с природными процессами. Первоначально применительно к стратегии изъятия предосторожный подход заключается в использовании в правилах регулирования промысла только двух ориентиров, целевых и граничных. Целевые ориентиры — ориентиры управления — служат для осуществления целей регулирования. Граничные ориентиры — ориентиры сохранения — предназначены для установления биологически безопасных границ, в рамках которых запас продуцирует максимальный устойчивый улов*. В дальнейшем, с развитием теоретических принципов предосторожного подхода, роль предосторожных ориентиров управления перешла от граничных ориентиров к буферным (или пороговым), которые в отличие от первых учитывают неопределенности оперативной модели промысла [Бабаян, 2000]. Применительно к лососевым запасам ориентиры управления связаны следующими соотношениями:

по пропуску: $S_{lim} < S_{buf} < S_{opt}$;

по эксплуатации: $E_{lim} > E_{buf} > E_{opt}$.

При использовании стратегии, основанной на оптимальной величине пропуска на нерест производителей, будь то величина, обеспечивающая максимум пополнения, либо максимальный устойчивый вылов (MSY), пропускается постоянное количество производителей. Соответственно, доля изъятия (эксплуатация) составит:

$$E_{opt} = \frac{N_t - S_{opt}}{N_t} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где N_t — подход в какой-либо год t .

Между тем соблюдение оптимальных ПРП в силу ряда причин либо недостижимо, либо нецелесообразно в силу следующих причин:

— согласно ПРП промысел должен изымать всегда только разницу между общим подходом и пропуском, соответствующим S_{opt} , в реальности в случае многовидового промысла при небольших подходах, меньше оптимума, изъятие все равно будет осуществляться;

— и наоборот, в случае чрезвычайно высоких подходов поддерживать оптимальный темп изъятия чаще всего невозможно из-за нехватки мобильных или стационарных добывающих, перерабатывающих, складских холодильных мощностей для хранения продукции и т.д.;

— при фактических низких и средних подходах промысел, настроенный на высокое изъятие (в результате несоответствия прогноза либо инерции руководства промышленных предприятий, выставивших чрезмерное количество орудий лова и ориентирующихся на прошлые подходы), может переловить запас. Это доказывается математически: предел модели оптимального изъятия (1) при неограниченном запасе равен 100 %. Иными словами, у данных ПРП нет предосторожного ориентира по эксплуатации.

С точки зрения рассмотрения достаточно протяженных данных зависимости пополнения от запаса складывается мнение, что оптимум — это просто усредненная величина, которая в разные временные периоды изменяется как в большую, так и в меньшую сторону. Что для одного периода времени будет оптимум, то для другого — избыточным или недостаточным пропуском. Поэтому можно говорить о достаточно высоком уровне неопределенности целевого ориентира, обусловленном не только ошибками модели, измерений и т.п. (человеческим фактором), но и объективными причинами — неопределенностями, связанными с нестационарностью природных факторов (рис. 1).

* UN. Agreement for the implementation of the provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 Desember 1982 relating to the concervation and menegement of stranddling fish stocks and highly migratory fish stocks // UN General Assembly Annex 3, A/Conf. 164/37, 8 September 1995. P. 45–81.

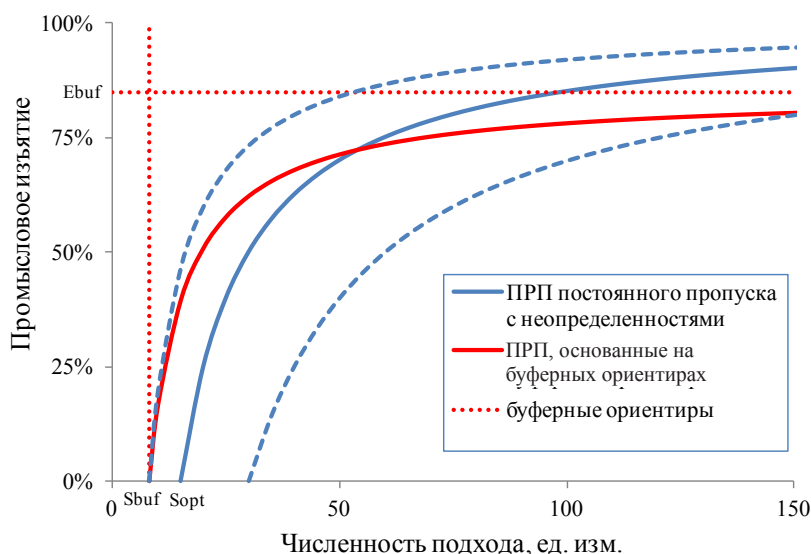


Рис. 1. Схема отображения предлагаемых ПРП на фоне ПРП постоянного пропуска

Fig. 1. Scheme of proposed adaptive fishery management in comparison with free escapement for spawning

С другой стороны, постоянный пропуск одного и того же количества производителей в течение некоторого достаточно продолжительного времени ограничивает исследователей в информации о реакции запаса на какие-либо существенные изменения среды [Хилборн, Уолтерс, 2001]. Вполне возможно, что модель зависимости пополнения от запаса, лежащая в основе определения оптимума, уже потеряла свою актуальность и нужно ее пересмотреть, однако все данные, включая и новые, относятся только к одному уровню пропуска и не позволяют это сделать.

В свете вышесказанного можно заключить, что отклонения пропуска от жестко зафиксированного оптимума как минимум не несут угрозы воспроизводству популяции, а скорее наоборот, варьируя в пределах безопасного интервала, могут приносить определенную пользу. По этой причине была поставлена задача адаптировать ПРП оптимального пропуска к реальной ситуации. С одной стороны, сделать пропуск не постоянным, а распределенным (гибким, подстраивающимся под объем возврата). С другой стороны, сделать среднесноголетний пропуск равным целевому ориентиру (тому самому оптимуму) и оставить в рамках неопределенности оптимума. В то же время считаем нужным применить предосторожный подход [Бабаян, 2000] к разработке ПРП: пропуск не должен быть ниже буферного ориентира.

Иными словами, задача поставлена таким образом, чтобы в точках экстремума численности запаса кривая ПРП проходила от минимальной допустимой границы оптимального пропуска до минимальной допустимой границы режима эксплуатации.

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

На первом шаге добавляется буферный ориентир по эксплуатации E_{buf} , исключая возможное чрезмерное изъятие. К примеру, его можно сделать равным оптимальной доле изъятия для максимального наблюдаемого подхода. Этот параметр ограничивает ПРП сверху, т.е. делает эксплуатацию выше него недопустимой:

$$E_t = E_{buf} \cdot \frac{N_t - S_{opt}}{N_t} \cdot 100 \% \text{ при } 0 < E_{buf} < 1. \quad (2)$$

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, усиливаем знаменатель модели этим же параметром, что уменьшает долю изъятия:

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

Таким образом получаем модель ПРП, основанную только на предосторожных буферных ориентирах управления. При этом целевой ориентир можно использовать для сверки с имитационным по ПРП среднесноголетним пропуском. Графическое представление ПРП на фоне оптимального (фиксированного) представлено на рис. 1, а правило можно сформулировать следующим образом:

- 1) если величина подхода больше или равна минимальной оценке оптимума $N_t \geq S_{buf}$, то доля изъятия описывается моделью (3);
- 2) если $N_t < S_{buf}$, то промысел запрещен.

Имитационная модель

В соответствии с подходом MSE (management strategy evaluation) [Walters, Hilborn, 1976; Holland, 2010] необходимо изучить, какие параметры ПРП лучше подходят для достижения целей управления промыслом. Кроме того, необходимо также с помощью имитационного тестирования параметров управления выяснить устойчивость ПРП к неопределенностям.

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

1. Стартовые ряды данных подхода N , вылова C , доли изъятия C/N , пропуска S и соответствующего пополнения R . Длина стартовых рядов равна продолжительности жизни старшей возрастной когорты, для анадырской кеты — 6 лет (максимальный возраст 5+), для мейныпильгынской нерки — 7 лет (максимальный возраст 6+).

2. Спектр среднесноголетних долей возрастных групп в численности подхода N .

3. Модель зависимости пополнения от родительского запаса. В качестве модели «запас–пополнение» 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:

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

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 резонансная модель аналогична моделям Бивертон-Холта [Beverton, Holt, 1957] (при $b \gg S_0$), хоккейной клюшки [Barrowman, Myers, 2000] ($b > S_0$), модели Криксунова-Снеткова [Криксунов, Снетков, 1985] ($b \leq S_0$).

Выбор данной 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 далее и их предосторожные оценки — буферные ориентиры — и по ним уже сформулировать ПРП. Такой модельный путь представляется нам более обоснованным, чем экспертная оценка граничного ориентира.

4. Стохастическая модель отклонений «фактического» пополнения от модели (4). В простейшем случае отклонения модельного пополнения от фактического можно описать каким-либо законом распределения. В нашей имитационной модели мы попытались добиться того, чтобы распределение невязок для запаса, рассчитанного

вперед, как можно более походило на наблюдаемое распределение в имеющемся наборе данных. Для этой цели был проведен анализ наблюдаемых отклонений (период 1967–1992 гг. — для кеты, 1997–2012 гг. — для нерки). С учетом того, что наблюдаемые значения пропуска и пополнения можно считать распределенными по логнормальному закону, и ошибки модели «запас–пополнение» в логнормальном пространстве в идеале должны быть распределены нормально:

$$Err = \ln(R_{obs}) - \ln(R_{mod}) = N(M; E), \quad (5)$$

где Err — ошибки; R_{obs} — наблюдаемое пополнение; R_{mod} — пополнение согласно модели; $N(M; E)$ — нормальное распределение с параметрами M (среднее ошибок) и E (стандартное отклонение ошибок).

Между тем фактическое распределение даже визуально далеко от нормального (рис. 2). Следовательно, нужно исходить из того, что параметры M и E не являются константами и их нужно описать отдельными моделями.

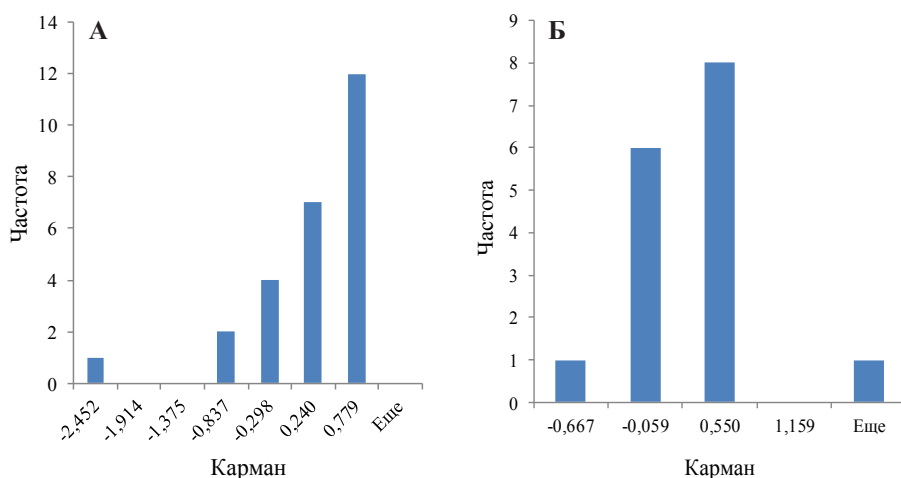


Рис. 2. Гистограмма распределения остатков модели «запас–пополнение» (А — для мейныпильгынской нерки; Б — для анадырской кеты)

Fig. 2. Histograms of the stock-recruitment model residuals for the Meynypilgyn sockeye salmon (A) and Anadychum salmon (B)

Результаты и их обсуждение

Модели пополнения, определение ориентиров пропуска и правил регулирования промысла

Из-за большого разброса данных для анадырской кеты было разработано три модели: для высоких, средних и низких значений выживаемости, ряды данных для мейныпильгынской нерки вполне удовлетворительно описывались одной кривой.

Оценка параметров для данных по запасу и пополнению анадырской кеты и мейныпильгынской нерки проводилась методом наименьших квадратов. Так, для кеты, исходя из предположения, что параметр S_0 является одинаковым для всех моделей, кривые воспроизводства максимальной и минимальной выживаемости позволили оценить его равным 425 тыс. экз. (табл. 1). Для средней модели, которая использовалась в разработке имитационной динамики запаса кеты, минимальная сумма квадратов отклонений составила $SSE = 36044544,0$, для нерки — $SSE = 232819,75$. Значения параметров модели для разных страт приведены в табл. 1.

Были установлены ориентиры пропуска производителей на нерестилища в соответствии с их функциональной нагрузкой (рис. 3):

1) граничный S_{lim} (точка пересечения модели (1) с равновесной $R = S$), при пропуске меньше граничного ориентира популяция будет стремиться к вымиранию;

Таблица 1

Параметры резонансной модели при разных уровнях численности, тыс. экз.

Table 1

Parameters of resonance model for certain levels of stock, 10³ ind.

Параметр	Уровень воспроизводства			
	Кета			Нерка
	Низкий	Средний	Высокий	Средний
a	891	1930	3941	626
b	263	539	1022	387
S_0	425	425	425	143

- 2) буферный ориентир S_{buf} (для кеты равен общему для всех моделей параметру S_0);
3) целевой ориентир пропуска S_{MSY} — пропуск, обеспечивающий максимальный вылов (определен численно с помощью решения задачи на оптимизацию).

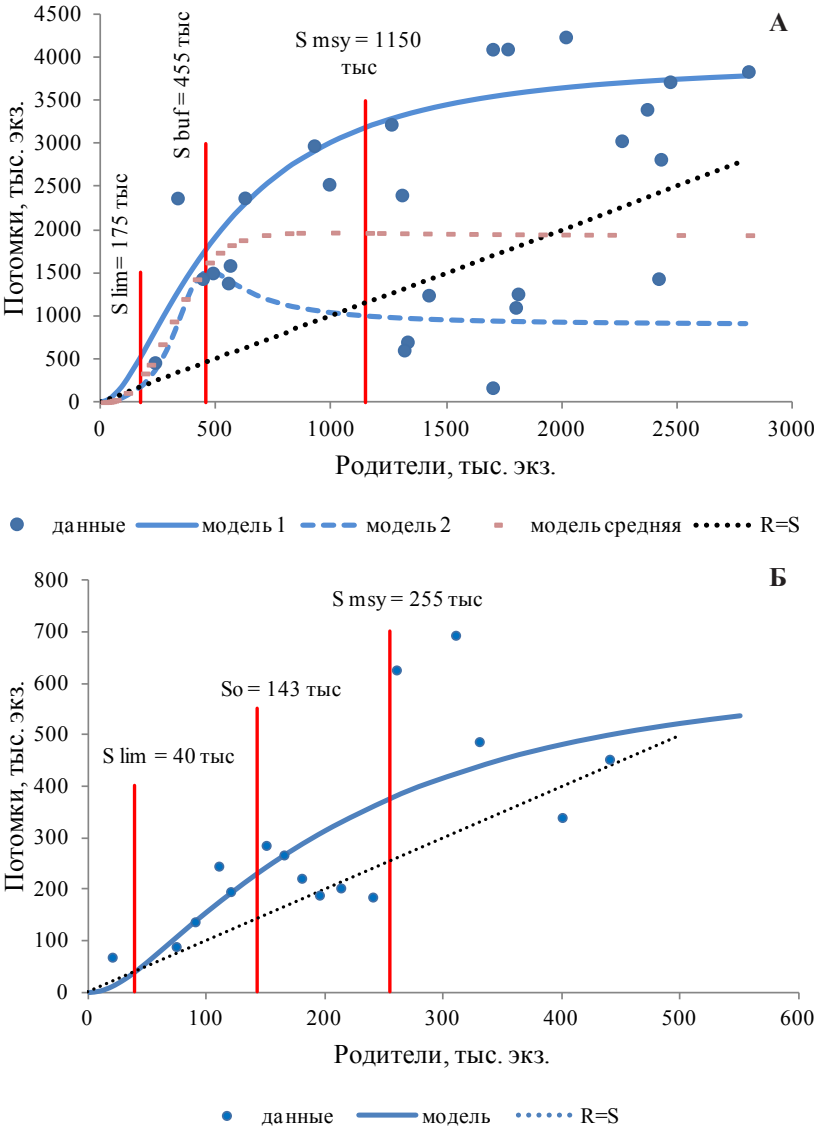


Рис. 3. Ориентиры пропуска анадырской кеты (А) и мейныпильгынской нерки (Б)
Fig. 3. Escapement reference values for the Anadyr chum salmon (А) and Meunypilgyn sockeye salmon (Б)

Построение имитационной модели

Моделирование стандартного отклонения ошибок S

Замечено, что ошибки модели пополнения имеют линейную зависимость от фактических значений запаса (рис. 4), чего, разумеется, не должно быть для хорошей модели. Однако такая картина достаточно характерна при анализе связи «запас–пополнение». Следовательно, следующим шагом нужно избавиться от данного линейного тренда путем его вычитания. Эта процедура проводилась не для всего набора отклонений, а для временного окна длиной в 7 лет. После вычитания тренда в таком окне для оставшихся ошибок вычислялось стандартное отклонение, далее осуществлялся сдвиг окна на одно наблюдение вперед, и процедура повторялась заново. Таким образом получили ряд *скользящего* стандартного отклонения для детрендированных остатков, зависимость которых от соответствующего модельного пополнения, полученного как скользящее среднее с тем же окном в 7 наблюдений, можно хорошо аппроксимировать с помощью модели обратного нормального распределения (рис. 5). Оставшиеся не-системные отклонения смоделированы как белый шум:

$$S = -O(d; e) + n(\mu; \sigma) + c, \quad (6)$$

где d, e, c — оцениваемые параметры обратного нормального распределения, а $n(\mu; \sigma)$ — белый шум остатков модели для стандартного отклонения.

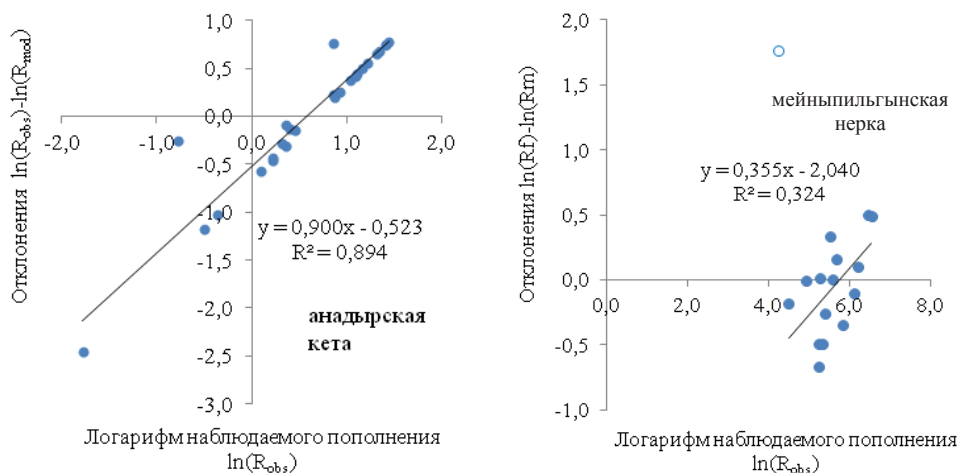


Рис. 4. Зависимость остатков модели «запас–пополнение» от целевой переменной (на рисунке справа не учитывается наблюдение с наименьшим наблюдаемым пополнением)

Fig. 4. Dependence of the stock-recruitment model residuals on the escapement reference value

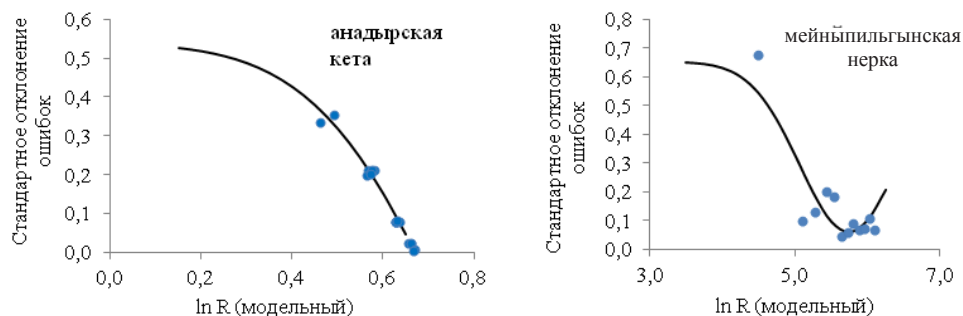


Рис. 5. Изменение скользящего стандартного отклонения детрендированных ошибок (окно в 7 наблюдений для кеты, 5 наблюдений для нерки) в зависимости от скользящего среднего модельного пополнения с тем же окном

Fig. 5. Smoothed standard deviation of detrended errors for chum salmon (7 years moving average) and chum salmon (5 years moving average) in dependence on modeled recruitments with the same smoothing

Наглядным результатом данной процедуры (вычитания тренда) является то, что спектральная плотность остатков до и после фильтрации существенно меняется (рис. 6), а именно нивелируется их цикличность с периодом $4\frac{1}{3}$ года (для кеты), которую потом мы вернем при моделировании параметра M — среднего модельных остатков. Аналогичная картина наблюдается и для мейныпильгынской нерки.

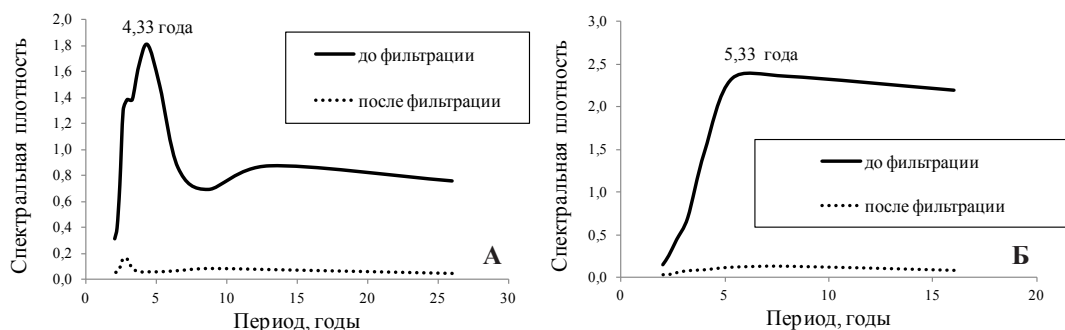


Рис. 6. Спектральная плотность остатков модели «запас–пополнение» до и после фильтрации (А — для анадырской кеты; Б — для мейныпильгынской нерки)

Fig. 6. Spectral density of the stock-recruitment model residuals before and after filtration (А — for the Anadyr chum salmon; Б — for the Meynypilgyn sockeye salmon)

Моделирование среднего ошибок M

Выше указано, что модельные остатки по данным спектрального анализа Фурье имеют ярко выраженную цикличность в $4\frac{1}{3}$ года, следовательно, среднее ошибок, которое мы обозначили как M , можно представить как неслучайную величину, изменяющуюся по закону гармонического колебания:

$$M = A \cdot \cos \frac{2\pi t}{T}, \quad (7)$$

где 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 13 годами (так как 13 лет — первое целочисленное число для периода $4\frac{1}{3}$ года). Аналогично для мейныпильгынской нерки, у которой $T = 5\frac{1}{3}$ года, стартовое t будет равномерно распределенной между величиной 1 и 16 годами.

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 -1 до $+1$. Собственно, задача имитационной модели совсем не в том, чтобы добиться высокого совпадения с наблюдаемой динамикой, а в том, чтобы кроме основных тенденций развития запаса (запас–пополнение, временная цикличность) учесть неопределенности или шумы. Поэтому достаточно визуально сравнить размах и циклику фактической и имитационной динамики отклонений (рис. 7).

Тестирование правил регулирования промысла

Основной целью РПП является максимизация вылова при минимальном риске появления неурожайных поколений.

Используемая нами модель РПП (3) определяется только буферными ориентирами по промысловому запасу и эксплуатации, целевые ориентиры будут использоваться для сверки со средними имитационными значениями промыслового запаса и эксплуатации.

Тестирование ориентира управления по эксплуатации E_{buf} проводилось в пределах от 55 до 95 % с учетом имеющихся неопределенностей для кеты и в более

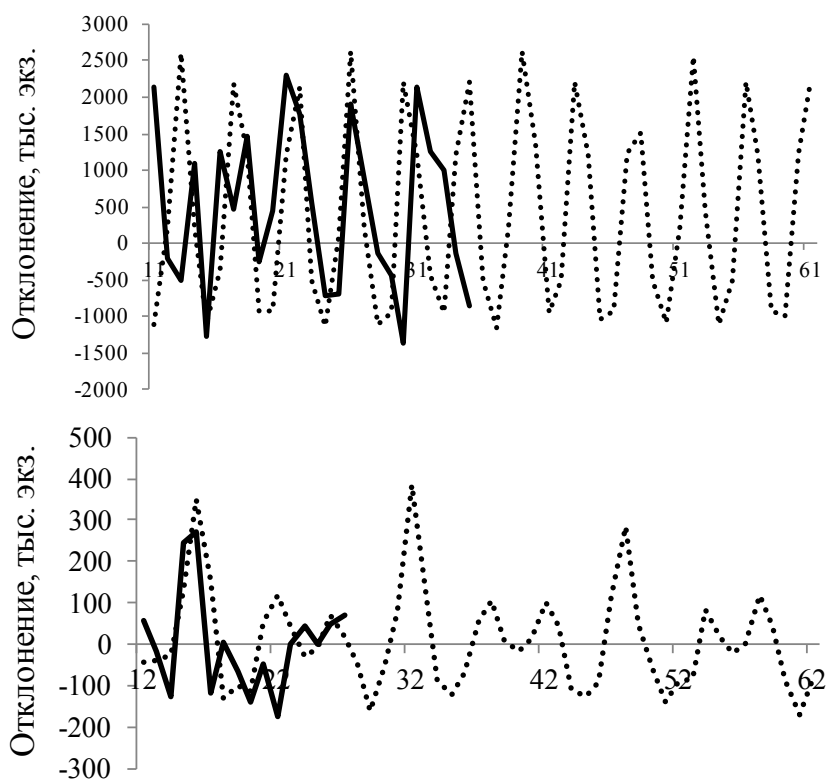


Рис. 7. Соответствие имитационных отклонений фактическим (А — для анадырской кеты; Б — для мейныпильгынской нерки). Сплошная линия — наблюдаемые отклонения, пунктирная — имитационные отклонения

Fig. 7. Observed (solid lines) and modeled (dotted lines) deviations of the Anadyr chum salmon (А) and Meynypilgyn sockeye salmon (Б) recruitment from....

узком диапазоне от 75 до 100 % для нерки с шагом в 5 % методом бутстреп-оценок (100 выборок по 500 поколений для каждого шага). Аналогично тестировался и буферный ориентир по промысловому запасу S_{buf} в пределах 350–475 тыс. экз. с шагом в 25 тыс. рыб для кеты и в диапазоне 140–180 тыс. экз. с шагом в 10 тыс. рыб для нерки.

Результаты тестирования параметров управления представлены на диаграммах (рис. 8, 9). Максимальные уловы кеты будут при параметрах S_{buf} от 350 до 425 тыс. рыб и E_{buf} выше 0,85. При этом минимальный риск будет в диапазоне 350–475 тыс. рыб для S_{buf} и 0,65–0,95 для E_{buf} . В то же время при максимизации вылова снижаются пропуск и общий подход в долгосрочной динамике. В качестве компромисса между максимизацией подхода и вылова оптимальными параметрами для ПРП (2) выбраны $S_{buf} = 450$ тыс. экз. (близок к определенному по модели пополнения) и $E_{buf} = 80$ % (рис. 8, нижний справа).

Максимальные уловы нерки будут при параметрах S_{buf} от 140 до 160 тыс. рыб и E_{buf} 0,75–0,85. Минимальный риск будет в диапазоне 140–160 тыс. рыб для S_{buf} и 0,8–1,0 для E_{buf} . В качестве оптимальных параметров для ПРП (2) нерки выбраны $S_{buf} = 150$ тыс. рыб и $E_{buf} = 80$ % (рис. 9, нижний справа).

Графически ПРП для обоих запасов представлены на рис. 10. По сравнению с фактическими данными за последние 10 лет следует заключить (табл. 2, 3), что запас и кеты, и нерки можно эксплуатировать интенсивнее. В зоне риска (левее S_{buf} и выше E_{buf}) ни одного наблюдения нет, все наблюдения располагаются значительно ниже кривой ПРП.

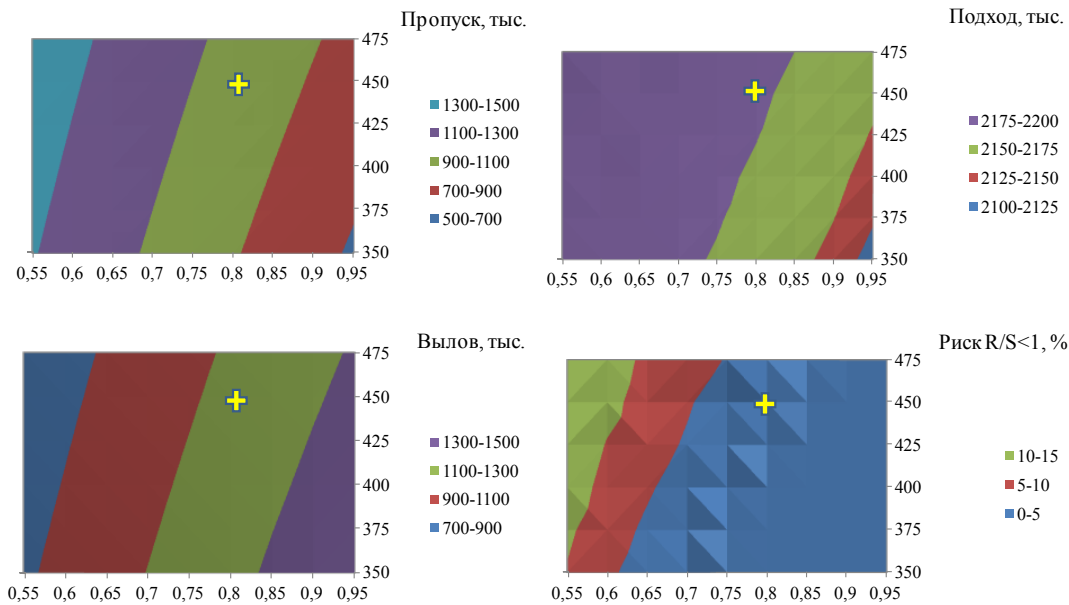


Рис. 8. Результаты тестирования параметров управления промыслом кеты Анадырского лимана

Fig. 8. Results of testing the fishery management parameters for chum salmon in the Anadyr estuary

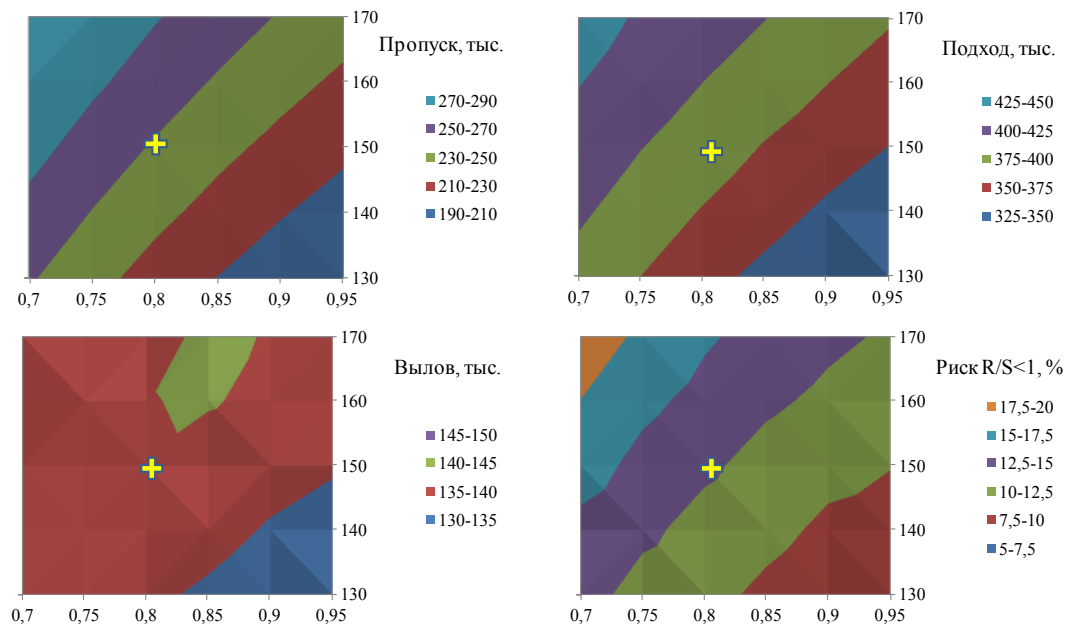


Рис. 9. Результаты тестирования параметров управления промыслом нерки Мейныпильгынской озерно-речной системы

Fig. 9. Results of testing the fishery management parameters for sockeye salmon in the Meynypilgyn lake-river system

Согласно ПРП средний подход 2210 тыс. особей для анадырской популяции кеты значительно меньше среднего значения за последние 10 лет (табл. 2). Это связано с тем, что ПРП основано на более старых наблюдениях 1967–1992 гг. (см. раздел «Материалы и методы»), обеспеченных прямыми авианаблюдениями за нерестом кеты.

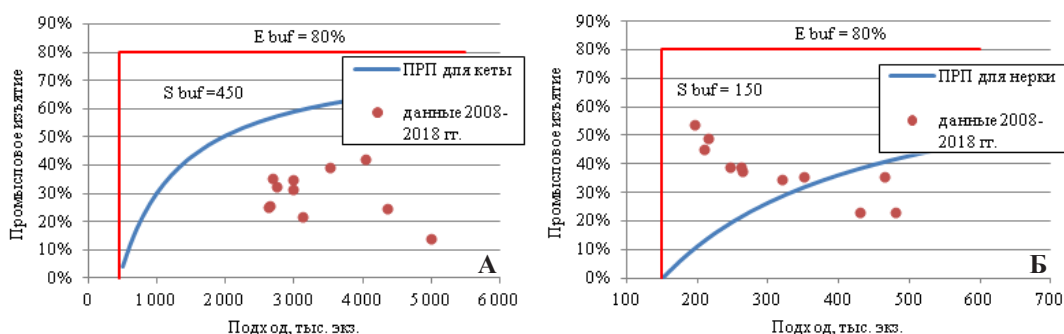


Рис. 10. Правила регулирования промысла анадырской кеты (А) и мейныпильгынской нерки (Б)

Fig. 10. Rules of adaptive fishery management for the Anadyr chum salmon (А) and Meynypilgyn sockeye salmon (Б)

Таблица 2

Параметры запаса анадырской кеты при соблюдении ПРП
по сравнению с наблюдаемыми данными в современный период

Table 2

Dynamics of stock for the Anadyr chum salmon under adaptive fishery management
in comparison with recent data

Показатель	2008–2018 гг.	По ПРП*	Изменение
Подход (N), тыс. экз.	3335	2210	–1125
Вылов (C), тыс. экз.	974	1174	+200
Пропуск (S), тыс. экз.	2361	1037	–1324
Интенсивность промысла, %	37	51	+14
Доля малочисленных поколений (R/S < 1), %	27	0	–27

* В расчетах использованы данные 1967–1992 гг.

Таблица 3

Параметры запаса мейныпильгынской нерки при соблюдении ПРП
по сравнению с наблюдаемыми данными в современный период

Table 3

Dynamics of stock for the Meynypilgyn sockeye salmon under adaptive fishery management
in comparison with recent data

Показатель	2014–2018 гг.	По ПРП*	Изменение
Подход (N), тыс.экз.	375	397	+22
Вылов (C), тыс.экз.	122	146	+24
Пропуск (S), тыс.экз.	254	251	–3
Интенсивность промысла, %	33	34	+1
Доля малочисленных поколений (R/S < 1), %	25	7,6	–17

* По данным 1997–2012 гг.

Современный запас, судя по всему, находится на более высоком уровне. Тем не менее даже по сравнению с ним ПРП показывают более высокие уловы (табл. 2).

Средняя эксплуатация нерки за последние 5 лет (33 %) фактически соответствует определенной согласно ПРП (34 %) в пределах погрешностей (табл. 3). Однако при малочисленных подходах фактическая эксплуатация чрезмерно высокая, а при высокочисленных, наоборот, низкая (рис. 10, А), что неблагоприятно сказывается на состоянии запаса: доля малочисленных поколений составляет 25 % (табл. 3). Применение ПРП должно существенно ее снизить — до 7,6 % — за счет увеличения пропуска и уменьшения эксплуатации в годы малочисленных подходов. Несмотря на это, величина среднего вылова возрастет за счет роста высоких подходов.

Графически результаты моделирования имитационной выборки при выбранных ПРП для запасов анадырской кеты и мейныпильгынской нерки представлены на рис. 11.

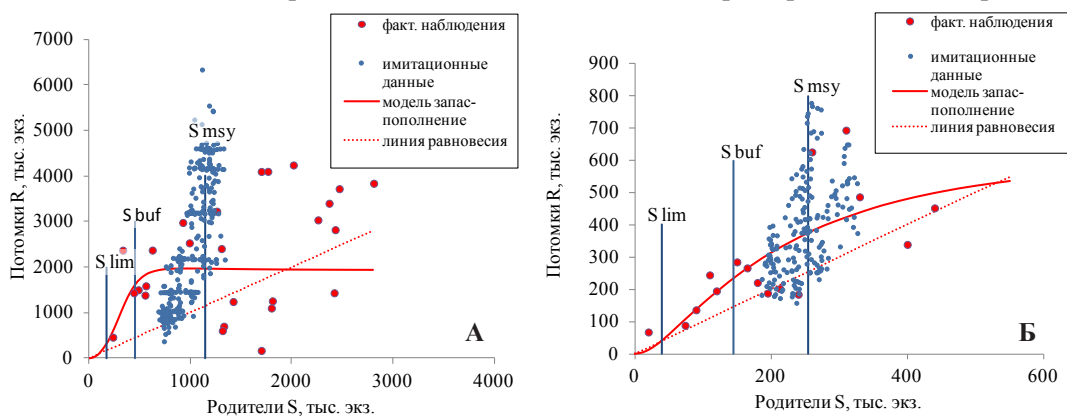


Рис. 11. Имитационное моделирование пополнения анадырской кеты (А) и мейныпильгынской нерки (Б) при выбранных ПРП

Fig. 11. Simulation of recruitment for the Anadyr chum salmon (A) and Meynypilgyn sockeye salmon (B) under choosen strategy of fishery management

Закключение

В настоящее время разрыв в методических подходах и моделях управления лососевым рыболовством, применяемых в различных российских регионах, становится все более ощутимым. В ряде случаев эффективность воспроизводства лососей определяется через прямое соответствие их численности нерестовым площадям в бассейнах рек, установленным либо прямыми наблюдениями, либо инструментальными методами [Макеев, 2011]. Соответствующим образом формируются и рекомендации к управлению лососевыми ресурсами в рыбопромысловых районах. Ревизия подходов к оценке нерестового фонда в противовес современной реализуемой практике пропуска производителей, например на Сахалине, в данном контексте формулируется как занижение репродуктивного потенциала прежними исследователями, приведшее в итоге к сокращению запасов лососей. При другом подходе эффективность воспроизводства популяций или их комплексов, приуроченных к определенным водотокам, оценивается через прямое соответствие числа производителей числу потомков в продуцируемых ими поколениях [Шевляков и др., 2019]. И хотя в данном случае отнюдь не исключается определяющая роль нерестовых площадей для воспроизводства, данная методология предполагает определение нерестовой емкости через возврат потомков как результат действия комплекса экосистемных факторов — от используемых производителями и реально эффективных нерестилищ до факторов плотности и зоосоциальных взаимодействий во время нереста [Паренский, 1992].

При этом вне зависимости от методологии оптимум пропуска как исследователями, так и существующими практиками управления рыболовством лососей до настоящего времени воспринимается как некая константа, обеспечивающая наивысший уровень воспроизводства и рыболовства. Между тем зачастую причина слабой обоснованности величины оптимума заключается в противоречии стратегии управления запасами определению этой величины. Для надежного описания зависимости численности потомков от численности родителей необходимы наблюдения как последствий явного избытка производителей, так и их дефицита, практика управления запасами направлена именно на исключение таких событий. В тех случаях, когда развитие натуралистического направления определения оптимума пропуска площадным способом предшествовало накоплению рядов наблюдений, все фактические отклонения от этой величины определялись исключительно факторами внешних условий и организации

рыболовства. Таким образом, отсутствие возможности удельного нормирования пропуска на нерестилища, управления факторами внешней среды и организационными аспектами рыболовства предопределяет рекомендательный характер регулирования промысла на основе пропуска статистического оптимума.

В данном исследовании предложена модель управления промыслом, основанная на обеспечении распределенного пропуска производителей, при котором среднегодовое количество пропуска равно целевому ориентиру, но в границах неопределенности оптимума и не ниже буферных ориентиров, предотвращающих избыточное изъятие. Предложены правила регулирования промысла (ПП) анадырской кеты и мейныпильгынской нерки, направленные на максимизацию вылова при минимальном риске появления неурожайных поколений, проведено их тестирование. Анализ промысла обеих популяций показал, что уровень эксплуатации анадырской кеты значительно ниже оптимального, а для запаса мейныпильгынской нерки желательно увеличивать пропуск на нерест при небольших подходах.

Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам отраслевых рыбохозяйственных институтов А.В. Евзерову, С.В. Путивкину, Е.В. Голубь и многим другим, в разные годы осуществлявшим сбор материалов по биологическому состоянию и численности чукотских популяций лососей в этом труднодоступном и суровом уголке России.

Финансирование работы

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Соблюдение этических стандартов

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

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

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

Биологическая характеристика и оценка состояния запаса тихоокеанских лососей материкового побережья Охотского моря и р. Анадырь : отчет о НИР (промежуточ.) / В.В. Волобуев, Л.И. Морозов, И.С. Голованов и др. / МоТИНРО. № 19367, № ГР 01825005276. — Владивосток, 1984. — 102 с.

Евзеров А.В. Заполнение лососями нерестилищ в бассейнах рек северного и северо-западного побережья Охотского моря, а также в бассейне р. Анадырь на Чукотке в 1976 г. по данным аэровизуального учета : отчет о НИР / МоТИНРО. № 15089. — Владивосток, 1976. — 18 с.

Евзеров А.В. Заполнение лососями нерестилищ в бассейнах рек северной части материкового побережья Охотского моря, а также в бассейнах рек Анадырь и Великая на Чукотке в 1979 г. по данным аэровизуального учета : отчет о НИР / МоТИНРО. № 16801. — Владивосток, 1980. — 32 с.

Евзеров А.В. Заполнение лососями нерестилищ в реках северного и северо-западного побережий Охотского моря, а также в бассейнах рек Анадырь и Великая на Чукотке в 1977 г. по данным аэровизуального учета : отчет о НИР / МоТИНРО. № 15655. — Владивосток, 1977. — 53 с.

Евзеров А.В. Заполнение нерестилищ рек северного и северо-западного побережья Охотского моря, а также в бассейнах рек Анадырь и Великая на Чукотке в 1978 г. по данным аэровизуального учета : отчет о НИР / МоТИНРО. № 16242. — Владивосток, 1979. — 38 с.

Евзеров А.В. Результаты аэровизуального учета лососей в реках северного побережья Охотского моря и Чукотки в 1980 г. : отчет о НИР / МоТИНРО. № 17574. — Владивосток, 1981. — 10 с.

Криксунов Е.А., Снетков М.А. Расширенная модель формирования пополнения нерестового стада рыб // Теория формирования численности стад промысловых рыб. — М. : Наука, 1985. — С. 46–55.

Макеев С.С. Новые подходы к оценке нерестового фонда рек Сахалина // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. — Владивосток : Дальнаука, 2011. — Вып. 5. — С. 329–345.

Оценка состояния запасов, биологическая характеристика и промысловое использование тихоокеанских лососей материкового побережья Охотского моря и р. Анадырь : отчет о НИР (промежуточ.) / В.В. Волобуев, Л.И. Морозов, И.С. Голованов и др. / МоТИНРО. № 19716. — Владивосток, 1985. — 95 с.

Паренский В.А. Этология нереста нерки : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 1992. — 113 с.

Путивкин С.В. Биология и динамика численности анадырской кеты : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ИБМ ДВО РАН, 1999. — 20 с.

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

Хилборн Р., Уолтерс К. Количественные методы оценки рыбных запасов: выбор, динамика и неопределенность : избр. гл. : пер. с англ. — СПб. : Политехника, 2001. — 228 с.

Шевляков Е.А., Фельдман М.Г., Островский В.И. и др. Ориентиры и оперативная оценка пропуска производителей на нерестилища как инструменты перспективного и краткосрочного управления запасами тихоокеанских лососей в реках Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 196. — С. 23–62. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-196-23-62.

Barrowman N.J., Myers R.A. Still more spawner-recruitment curves: the hockey stick and its generalizations // Can. J. Fish. Aquat. Sci. — 2000. — Vol. 57, Iss. 4. — P. 665–676. DOI: 10.1139/cjfas-57-4-665.

Beverton R.J.H., Holt S.J. On the dynamics of exploited fish populations. — L. : Chapman and Hall, 1957. — 533 p.

Holland D.S. Management Strategy Evaluation and Management Procedures: Tools for Rebuilding and Sustaining Fisheries // OECD Food, Agriculture and Fisheries. — 2010. — Working Papers № 25, OECD Publishing. DOI: 10.1787/5kmd77jhykxf-en.

Walters C.J., Hilborn R. Adaptive control of fishing systems // J. Fish. Res. Board Can. — 1976. — Vol. 33, № 1. — P. 145–159. DOI: 10.1139/f76-017.

References

Babayan, V.K., *Predostorozhnyi podkhod k otsenke obshchego dopustimogo ulova (ODU)* (The Precautionary Approach to the Assessment of Total Allowable Catch (TAC)), Moscow: VNIRO, 2000.

Volobuev, V.V., Morozov, L.I., Golovanov, I.S., Rogatnykh, A.Yu., and Putivkin, S.V., *Biologicheskaya kharakteristika i otsenka sostoyaniya zapasa tikhookeanskikh lososyev materikovogo poberezh'ya Okhotskogo morya i r. Anadyr' : promezhutochnyi otchet* (Biological characteristics and assessment of the state of the stock of Pacific salmon on the mainland coast of the Sea of Okhotsk and the Anadyr: interim report), Available from MoTINRO, 1984, Vladivostok, no. 19367, no. GR 01825005276.

Evzerov, A.V., *Otchet Nauchno-Issled. Rab. "Zapolneniye lososyami nerestilishch v basseynakh rek severnogo i severo-zapadnogo poberezh'ya Okhotskogo morya, a takzhe v basseynakh rek Anadyr' na Chukotke v 1976 g. po dannym aerovizual'nogo ucheta"* (Res. Rep. "Filling spawning grounds with salmon in the river basins of the northern and northwestern coasts of the Sea of Okhotsk, as well as in the river basin. Anadyr in Chukotka in 1976 according to aerovisual data"), Available from MoTINRO, 1976, Vladivostok, no. 15089.

Evzerov, A.V., *Otchet Nauchno-Issled. Rab. "Zapolneniye lososyami nerestilishch v basseynakh rek severnoy chasti materikovogo poberezh'ya Okhotskogo morya, a takzhe v basseynakh rek Anadyr' i Velikaya na Chukotke v 1979 g. po dannym aerovizual'nogo ucheta"* (Res. Rep. "Filling of spawning grounds with salmon in the river basins of the northern part of the mainland coast of the Sea of Okhotsk, as well as in the basins of the Anadyr and Velikaya rivers in Chukotka in 1979 according to aerovisual survey data"), Available from MoTINRO, 1980, Vladivostok, no. 16801.

Evzerov, A.V., *Otchet Nauchno-Issled. Rab. "Zapolneniye lososyami nerestilishch v rekakh severnogo i severo-zapadnogo poberezh'ya Okhotskogo morya, a takzhe v basseynakh rek Anadyr' i Velikaya na Chukotke v 1977 g. po dannym aerovizual'nogo ucheta"* (Res. Rep. "Filling of spawning grounds with salmon in the rivers of the northern and northwestern coasts of the Sea of Okhotsk, as well as in the basins of the Anadyr and Velikaya rivers in Chukotka in 1977 according to aerovisual survey data"), Available from MoTINRO, 1977, Vladivostok, no. 15655.

Evzerov, A.V., *Otchet Nauchno-Issled. Rab. "Zapolneniye nerestilishch rek severnogo i severo-zapadnogo poberezh'ya Okhotskogo morya, a takzhe v basseynakh rek Anadyr' i Velikaya na Chukotke"*

v 1978 g. po dannym aerovizual'nogo ucheta" (Res. Rep. "Filling of the spawning grounds of the rivers of the northern and northwestern coasts of the Sea of Okhotsk, as well as in the basins of the Anadyr and Velikaya rivers in Chukotka in 1978 according to aerial survey data"), Available from MoTINRO, 1979, Vladivostok, no. 16242.

Evzerov, A.V., *Otchet Nauchno-Issled. Rab. "Rezultaty aerovizual'nogo ucheta lososey v rekakh severnogo poberezh'ya Okhotskogo morya i Chukotki v 1980 g."* (Res. Rep. "Results of aerial survey of salmon in the rivers of the northern coast of the Sea of Okhotsk and Chukotka in 1980"), Available from MoTINRO, 1981, Vladivostok, no. 17574.

Kriksunov, E.A. and Snetkov, M.A., An extended model of the formation of the replenishment of the spawning stock of fish, in *Teoriya formirovaniya chislennosti stad promyslovyykh ryb* (Theory of the formation of the number of stocks of commercial fish), Moscow: Nauka, 1985, pp. 46–55.

Makeev, S.S., New approaches to assessing the spawning fund of Sakhalin rivers, in *Chteniya pamyati Vladimira Yakovlevicha Levanidova* (Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings), Vladivostok: Dal'nauka, 2011, vol. 5, pp. 329–345.

Volobuev, V.V., Morozov, L.I., Golovanov, I.S., Rogatnykh, A.Yu., Putivkin, S.V., and Postnikov, V.M., *Otsenka sostoyaniya zapasov, biologicheskaya kharakteristika i promyslovoye ispol'zovaniye tikhookeanskikh lososey materikovogo poberezh'ya Okhotskogo morya i r. Anadyr': promezhutochnyy otchet* (Assessment of the state of stocks, biological characteristics and commercial use of Pacific salmon on the mainland coast of the Sea of Okhotsk and the Anadyr: interim report), Available from MoTINRO, 1985, Vladivostok, no. 19716.

Parensky, V.A., *Etologiya neresta nerki* (Ethology of Sockeye Salmon Spawning), Vladivostok: Dal'nauka, 1992.

Putivkin, S.V., Biology and dynamics of the number of Anadyr chum salmon, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: Inst. Biol. Morya, Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk, 1999.

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

Hilborn, R. and Walters, C.J., Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty, New York: Chapman and Hall, 1992.

Shevlyakov, E.A., Feldman, M.G., Ostrovsky, V.I., Volobuev, V.V., Kaev, A.M., Golub, E.V., Barabanshchikov, E.I., Golovanov, I.S., Limits and operational evaluation of the spawners escapement to the spawning grounds as tools for prospective and short-term management of the pacific salmon stocks in the rivers of the Far-Eastern fisheries Basin, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 196, pp. 23–62, doi 10.26428/1606-9919-2019-196-23-62

Barrowman, N.J. and Myers, R.A., Still more spawner-recruitment curves: the hockey stick and its generalizations, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2000, vol. 57, no. 4, pp. 665–676. doi 10.1139/cjfas-57-4-665

Beverton, R.J.H. and Holt S.J., *On the dynamics of exploited fish populations*, London: Chapman and Hall, 1957.

Holland, D.S., Management Strategy Evaluation and Management Procedures: Tools for Rebuilding and Sustaining Fisheries, *OECD Food, Agriculture and Fisheries*, 2010, Working Papers no. 25, OECD Publishing. doi 10.1787/5kmd77jlvkjf-en

Walters, C.J. and Hilborn, R., Adaptive control of fishing systems, *J. Fish. Res. Board Can.*, 1976, vol. 33, no. 1, pp. 145–159. doi 10.1139/f76-017

Lososi–2020 (putinnyy prognoz) (Salmon — 2020 (Putin's forecast)), Vladivostok: TINRO, 2020.

UN. Agreement for the implementation of the provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 Desember 1982 relating to the concervation and menegement of stranddling fish stocks and highly migratory fish stocks, *UN General Assembly Annex 3, A/Conf. 164/37*, 8 September 1995, pp. 45–81.

Поступила 25.05.2021 г.

После доработки 21.07.2021 г.

Принята к публикации 16.08.2021 г.