

УДК 595.384.2:639.281.8(265.53)

О.И. Ильин, П.Ю. Иванов*

Камчатский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, 683000, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, 18

ОБ ОДНОМ МОДЕЛЬНОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ЗАПАСОВ КАМЧАТСКОГО КРАБА *PARALITHODES CAMTSCHATICUS* ЗАПАДНОКАМЧАТСКОГО ШЕЛЬФА

Рассматривается один из возможных модельных подходов к оценке состояния запасов морских промысловых видов беспозвоночных (крабов) на основе модели динамики трех функциональных групп (рекруты, пререкруты, промысловые самцы). Оценка состояния запаса и неизвестных параметров модели сводится к решению совместной задачи оптимальной фильтрации (интерполяции) и идентификации. В качестве примера рассматривается применение указанного подхода к оценке состояния запасов камчатского краба шельфа западной Камчатки.

Ключевые слова: камчатский краб, оценка запасов, шельф западной Камчатки, фильтр Калмана.

Ilyin O.I., Ivanov P.Yu. On one model approach to stock assessment for red king crab *Paralithodes camtschaticus* on the shelf of West Kamchatka // Izv. TINRO. — 2015. — Vol. 182. — P. 38–47.

A possible model approach to stock assessment of marine commercial invertebrates is discussed based on modeling of year-to-year dynamics for three functional groups (recruits, prerecruits, and commercial males). The model parameters are determined by joint solution of the tasks of optimal filtration and identification. As an example, this approach is used for assessment of the stock of king crab on the shelf of West Kamchatka. For this case, the data on actual catch are used obtained from reports of customs in Japan, Korea, USA, and China about the volume of crab products imported from Russia. The modeling confirms the conclusion from direct observations about rapid growth of the red king crab stock at West Kamchatka in recent years. Following to these results, the value of total allowable catch (TAC) can be substantially increased for this species. The officially recommended TAC of red king crab at West Kamchatka for 2016 is below of the 95 % confidence interval of the really possible catch. This value does not account the species stock recovery and hamper rational utilization of the valued natural resource.

Key words: king crab, stock assessment, shelf of West Kamchatka, Kalman filter.

Введение

Одним из важнейших промысловых объектов западнокамчатского шельфа является камчатский краб *Paralithodes camtschaticus*. До относительно недавнего времени популяция этого вида обеспечивала не менее половины общего вылова крабов во всех дальневосточных морях России.

* Ильин Олег Игоревич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, e-mail: ilin.o.i@kamniro.ru; Иванов Павел Юрьевич, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, e-mail: ivanov.p.u@kamniro.ru.

Ilyin Oleg I., Ph.D., head of laboratory, e-mail: ilin.o.i@kamniro.ru; Ivanov Pavel Yu., Ph.D., head of laboratory, e-mail: ivanov.p.u@kamniro.ru.

Промысел камчатского краба западной Камчатки был возобновлен в 2013 г. после многолетнего запрета, действующего в 2004–2005 и 2007–2012 гг. Ограничения на добычу были введены из-за резкого сокращения численности промысловых самцов и пререкрутов в начале 2000-х гг., вызванного главным образом прессом браконьерства. Впервые за последнее десятилетие наметившийся в 2011 г. отчетливый тренд повышения численности камчатского краба западной Камчатки стал следствием в том числе и действия запрета на промысел. Исследованиями КамчатНИРО и ТИНРО-центра в 2013 и 2014 гг. практически полное восстановление популяции камчатского краба подтвердилось. Её общая численность оказалась максимальной за последние 16 лет исследований и достигла почти 240 млн экз., а крабовая путина 2014 г. была такой же успешной, как и в предыдущем году.

Между тем рекордные промысловые показатели последних двух лет вполне очевидно свидетельствуют о том, что применяемые на сегодняшний день традиционные методы прогнозирования запаса и определения величины изъятия камчатского краба западной Камчатки излишне предосторожны, обоснованы недостаточно аргументированно и не в полной мере удовлетворяют современному уровню развития методов прогнозирования.

Для оценки запасов крабов используются как методы прямого учета, так и математические методы теории рыболовства, основанные на данных промысловой статистики и использующие данные наблюдений в качестве дополнительной информации.

Из методов прямого учёта для оценки запасов крабов применяются траловые и ловушечные учетные съёмки.

Траловые съёмки в прикамчатских водах выполняются с 1950-х гг. На западной Камчатке они проводятся регулярно, практически ежегодно. С начала съёмок была принята стандартная сетка станций, которая используется и в настоящее время. На протяжении всего периода исследований орудием лова служит донный трал ДТ 27,1, что делает имеющиеся материалы сравнимыми.

В районах со сложными грунтами, где применение донного трала для учета крабов невозможно, по стандартной сетке станций проводятся ловушечные съёмки.

Получение надежного индекса запаса по данным регулярно проводимых учетных съёмок — одна из важнейших задач, так как результаты съёмок обычно используются для настройки входных параметров математической модели.

Давно известно, что анализ антропогенного воздействия разумно проводить методами математического моделирования, так как это не требует больших материальных затрат и дополнительного вторжения в природную среду. Оценкой состояния запасов с помощью моделей теории рыболовства и прогнозированием величины ОДУ морских промысловых беспозвоночных шельфа западной Камчатки, в том числе камчатского краба, занимался в начале 2000-х гг. В.П. Максименко (Максименко, Лысенко, 2002; Максименко, 2003). Он использовал популярные когортные методы ВПА (Pope, Shepherd, 1985) и CAGEAN (Deriso et al., 1985). Однако при моделировании запасов не принимался во внимание неофициальный вылов, тогда как в то время он превышал ОДУ и официальный вылов в несколько раз. Вследствие этого В.П. Максименко были получены заниженные оценки запаса. После этих работ оценка состояния запасов промысловых беспозвоночных западнокамчатского шельфа с помощью математических методов фактически не производилась.

Исходя из структуры и объема накопленной на сегодняшний день информации по камчатскому крабу западнокамчатского шельфа, по нашему мнению, наиболее интересны два направления в моделировании динамики запасов этого объекта.

Первый путь предполагает выделение возрастных групп из размерных рядов с помощью специально разработанных процедур (Basson et al., 1988; Лысенко, Гайдаев, 2005; Михеев, 2011) и использование для оценки состояния запасов когортных моделей. На сегодняшний день разработано огромное количество когортных моделей, хорошо себя зарекомендовавшие модели зарубежных специалистов можно найти на сайте NOAA (<http://nft.nefsc.noaa.gov/>). Из разработок отечественных специалистов для бес-

позвоночных можно указать стохастическую когортную модель с прерывистым ростом (Михеев, 2003). Однако на этапе выделения возрастных групп по размерному составу уловов с помощью указанных выше процедур могут возникать трудности.

Второй путь, которым мы и следовали в настоящей работе, предполагает использование моделей на базе CSA (Collie, Sissenwine, 1983; Collie, Kruse, 1998), описывающих динамику функциональных групп (молодь, пререкруты, рекруты, промысловые самцы, самки). Использование подобных моделей целесообразно в том случае, когда возраст особей определить не удается, но по линейным размерам можно судить об их принадлежности к той или иной функциональной группе.

Оценка состояния запасов морских промысловых биоресурсов, как правило, сводится к задаче определения вектора состояния (численность возрастных, размерных, функциональных групп) по результатам ряда наблюдений. Наблюдения сопровождаются случайными ошибками, а значит, следует говорить не об определении состояния системы, а о его оценивании путем статистической обработки результатов наблюдений. Так как моделью рассматриваемой нами системы «запас–промысел» служит система стохастических разностных уравнений линейной регрессии, целесообразно применить методы линейной оптимальной фильтрации и интерполяции.

Материалы и методы

Так как в модель должен закладываться фактический, а не официальный вылов, прежде всего нам надо было постараться оценить объемы реального вылова. Такие оценки мы получили, основываясь на данных таможен Японии, Кореи, США, Китая об объемах импорта крабовой продукции из Российской Федерации*. По этим данным можно приближенно оценить фактический вылов камчатского краба на западной Камчатке, считая, что он пропорционален доле ОДУ камчатского краба на западнокамчатском шельфе от всего ОДУ камчатского краба на Дальнем Востоке. По нашим данным, фактический и официальный вылов заметно различаются (рис. 1). Этот фактический вылов и был заложен в расчеты.

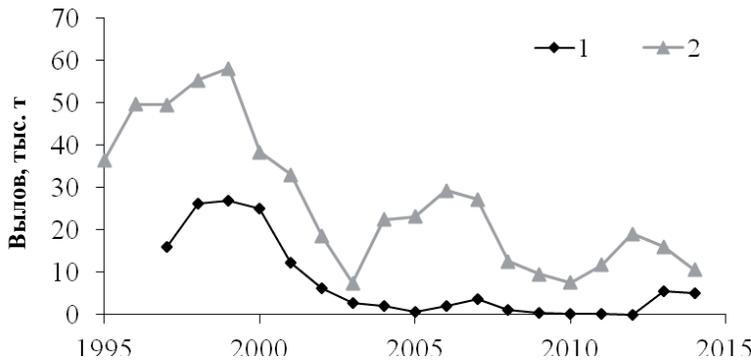


Рис. 1. Официальный (1) и фактический (2) вылов камчатского краба шельфа западной Камчатки

Fig. 1. Official (1) and actual (2) catch of red king crab on the shelf of West Kamchatka

Представленная ниже модель описывает динамику трех функциональных групп (1 — пререкруты, 2 — рекруты, 3 — промысловые самцы). Возможно обобщение этой модели путем введения еще двух функциональных групп — молодь и самки.

Уравнения динамики численности функциональных групп имеют вид:

$$N_{i,2} = p_1 N_{i-1,1} S_{i-1,1} + (1 - p_2) N_{i-1,2} S_{i-1,2} + \varepsilon_{xi,2},$$

$$N_{i,3} = p_2 N_{i-1,2} S_{i-1,2} + N_{i-1,3} S_{i-1,3} + \varepsilon_{xi,3},$$

$$S_{i,j} = \exp(-Z_{i,j}), Z_{i,j} = M_{i,j} + F_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где $N_{i,1}$, $N_{i,2}$, $N_{i,3}$ — численность функциональных групп — пререкрутов, рекрутов и промысловых самцов в i -м году; M_{ij} — мгновенные коэффициенты естественной смертности; F_{ij} — мгновенные коэффициенты промысловой смертности в i -м году;

* Крабы–2014 (путинный прогноз). Владивосток: ТИПРО-центр, 2014. 121 с.; Крабы–2015 (путинный прогноз). Владивосток: ТИПРО-центр, 2015. 120 с.

Z_{ij} — мгновенные коэффициенты общей смертности в i -м году; S_{ij} — коэффициенты выживаемости в i -м году; p_j — вероятность линьки в j -й функциональной группе, $j = 1, 2, 3$. Смысл появления в уравнениях ошибки процесса ε_x в том, что соотношения, определяющие изменения численности функциональных групп во времени, неточны, но в них присутствует ошибка в виде последовательности нормального белого шума.

Будем предполагать, что коэффициенты промысловой смертности могут быть представлены в виде произведения, зависящего только от влияния промыслового пресса f_i и от функциональной группы фактора селективности s_j : $F_{ij} = f_i s_j$. Коэффициенты селективности нормированы: $0 < s_j \leq 1, s_3 = 1$, т.е. селективно полностью облавливаются функциональная группа промысловых самцов.

Будем предполагать также, что данные наблюдений (фактические уловы по функциональным группам (C_{ij}), данные траловых (I_{ij}) и ловушечных (U_i) съемок) отличаются от их модельных «аналогов» на случайную величину ε_y :

$$C_{i,j} = \mu_{i,j} N_{i,j} + (\varepsilon_y^C)_{i,j}, \mu_{i,j} = \frac{F_{i,j}}{Z_{i,j}} (1 - S_{i,j}), j = 1, 2, 3,$$

$$I_{i,1-2} = q_{1-2} (N_{i,1} S_{i,1}^{\Delta_i} + N_{i,2} S_{i,2}^{\Delta_i}) + (\varepsilon_y^I)_{i,1-2},$$

$$I_{i,3} = q_3 N_{i,3} S_{i,3}^{\Delta_i} + (\varepsilon_y^I)_{i,3},$$

$$U_i = q_U N_{i,3} S_{i,3}^{\Delta_U} + (\varepsilon_y^U)_i, i = 1, 2, \dots, n,$$

где Δ_i и Δ_U — продолжительность времени (в долях от года) от начала календарного года до времени проведения соответственно траловых и ловушечных съемок; q_1, q_2, q_U — подлежащие оценке коэффициенты пропорциональности.

Для упрощения дальнейших выкладок соотношения модели записываются в эквивалентной матричной форме в пространстве состояний:

$$X_i = A_{i-1} X_{i-1} + \varepsilon_{xi}, i = 1, 2, \dots, n,$$

$$Y_i = B_i X_i + \varepsilon_{yi},$$

$$A_{i-1} = \begin{vmatrix} \alpha_{i-1} & 0 & 0 \\ p_1 S_{i-1,1} & (1 - p_2) S_{i-1,2} & 0 \\ 0 & p_2 S_{i-1,2} & S_{i-1,3} \end{vmatrix}$$

$$B_i = \begin{vmatrix} q_{1-2} S_{i,1}^{\Delta_i} & q_{1-2} S_{i,2}^{\Delta_i} & 0 \\ 0 & 0 & q_3 S_{i,3}^{\Delta_i} \\ \mu_{i,1} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{i,2} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{i,3} \\ 0 & 0 & q_U S_{i,3}^{\Delta_U} \end{vmatrix}$$

$$X_i = (N_{i,j}, N_{i,j}, N_{i,j})^T; Y_i = (I_{i,1-2}, I_{i,3}, C_{i,1}, C_{i,2}, C_{i,3}, U_i)^T.$$

Здесь i — год, X_i — вектор состояния запаса, Y_i — вектор-столбец наблюдений, A_i — переходная матрица, B_i — матрица наблюдения, T — операция транспонирования, вспомогательный параметр α_{i-1} выражает отношение численности пререкрутов в i -м году к численности пререкрутов в $i-1$ -м году.

Вектор наблюдений Y_i в i -м году составляют данные траловых съемок о численности рекрутов и пререкрутов $N_{i,1-2}$, промысловых самцов $N_{i,3}$, промысловые уловы пререкрутов $C_{i,1}$, рекрутов $C_{i,2}$, промысловых самцов $C_{i,3}$, уловы на единицу промыслового усилия промысловых самцов по данным ловушечных съемок U_i . Шум наблюдения ε_y учитывает совокупное влияние ошибок определения размера, принадлежности к функциональной группе, ошибки в самих уловах и данных прямого учета. Компонен-

ты вектора ε_y суть шумы компонент вектора Y_i . Предполагается, что $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ имеют вид последовательностей нормального белого шума:

$$\varepsilon_{xi} = (0, \varepsilon_{xi,1}, \varepsilon_{xi,2})^T, M(\varepsilon_{xi}\varepsilon_{xj}^T) = \text{diag}(\bar{v}_{xi}), \bar{v}_{xi} = (0, \sigma_x^2, \sigma_x^2)^T;$$

$$\varepsilon_{yi} = ((\varepsilon_y^I)_{i,1-2}, (\varepsilon_y^I)_{i,3}, (\varepsilon_y^C)_{i,1}, (\varepsilon_y^C)_{i,2}, (\varepsilon_y^C)_{i,3}, (\varepsilon_y^U)_i)^T, M(\varepsilon_{yi}\varepsilon_{yj}^T) = \text{diag}(\bar{v}_{yi}),$$

$$\bar{v}_{yi} = (\sigma_{I12}^2, \sigma_{I3}^2, \sigma_C^2, \sigma_C^2, \sigma_C^2, \sigma_U^2)^T,$$

где T — операция транспонирования; M — оператор математического ожидания; $\text{diag}(v_{xi})$ — диагональная матрица, у которой на главной диагонали стоят компоненты вектора v_{xi} .

Далее, для оценки вектора состояния запаса сначала применяется линейный фильтр Калмана-Бьюси (Вису, Joseph, 1968):

предиктор

$$\hat{X}_i(-) = A_{i-1}\hat{X}_{i-1}(+),$$

$$R_i(-) = A_{i-1}R_{i-1}(+)A_{i-1}^T + v_{xi},$$

корректор

$$\hat{X}_i(+) = \hat{X}_i(-) + \beta_i(Y_i - B_i\hat{X}_{i-1}(-)),$$

$$R_i(+) = (I - \beta_i B_i)R_i(-),$$

$$\beta_i = R_i(-)B_i^T [B_i R_i(-)B_i^T + v_{yi}]^{-1},$$

где $X_i(-)$ и $X_i(+)$ — априорные и апостериорные оценки вектора состояния, $R_i(-)$ и $R_i(+)$ — априорные и апостериорные ковариационные матрицы ошибок фильтрации. Начальные условия

$$M(X_0) = \hat{X}_0(+) = \hat{X}_0, M(X_0 - \hat{X}_0)(X_0 - \hat{X}_0) = R_0(+) = R_0$$

задают оценки стартовых значений численностей функциональных групп X_0 и их ковариационную матрицу ошибок оценивания R_0 .

Фильтрационные уравнения в форме предиктор-корректор дают рекуррентные оценки вектора состояния запаса при поступлении новых наблюдений Y , т.е. $\hat{X}_i(+) = M(X_i | Y_1, Y_2, \dots, Y_i)$. Уравнения фильтра выводятся из условий несмещенности оценок вектора состояния запаса и их эффективности на классе несмещенных оценок. Фильтр Калмана в каждый момент времени использует наблюдения только до текущего момента времени включительно. Чтобы задействовать все наблюдения, применяется алгоритм среднеквадратически оптимальной интерполяции (Grewal, Andrews, 1993):

$$\hat{X}_i^n = M(X_i | Y_1, Y_2, \dots, Y_n) = \hat{X}_i(+) + Q_i(\hat{X}_{i+1}^n - \hat{X}_{i+1}(+)), i = n-1, n-2, \dots, 1,$$

$$Q_i = R_i(+)A_i^T R_{i+1}^{-1}(-),$$

$$R_i^n = R_i(+) + Q_i(R_{i+1}^n - R_{i+1}(-))Q_i^T,$$

с условиями на конце интервала оценивания n :

$$\hat{X}_n^n = \hat{X}_n(+), R_n^n = R_n(+),$$

где $\hat{X}_i^n = M(X_i | Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ — оценка среднеквадратически оптимальной интерполяции; R_i^n — ковариационная матрица ошибки интерполяции.

Неизвестными параметрами являются начальные численности функциональных групп (N_{0j}), вспомогательные коэффициенты α_r , коэффициенты промысловой смертности f_r , коэффициенты селективности s_r , коэффициенты пропорциональности q_{1-2}, q_3, q_n , а также $\sigma_{I12}, \sigma_{I3}, \sigma_C, \sigma_U$, если они не известны заранее. Матрицы и векторы, входящие в представленные выше фильтрационные уравнения, зависят от вектора неизвестных параметров. Оценки этих неизвестных параметров определяются по методу максимального правдоподобия:

$$-\frac{1}{2} \sum_i [(Y_i - B_i\hat{X}_{i-1}(-))^T J_i^{-1} (Y_i - B_i\hat{X}_{i-1}(-)) + \ln(\det(J_i))] \rightarrow \max,$$

$$J_i = B_i R_i(-) B_i^T + v_{yi},$$

где J_i — ковариационная матрица обновляющего процесса.

Отметим, что для вычисления оценки фильтра Калмана необходимо знать начальную ковариацию R_0 . Но она вообще может быть неизвестной, и мы в лучшем случае можем ее только предугадать. Пусть задана начальная догадка для R_0 . После того как получены оценки максимального правдоподобия для неизвестных параметров при этой начальной догадке, можно найти ковариацию ошибки оценивания начального вектора состояния X_0 через инверсию матрицы Гессе для логарифма функции правдоподобия в точке максимума. Полученную ковариацию можно принять в качестве R_0 и повторить вычисления.

Алгоритм представленной модели динамики функциональных групп с фильтром Калмана и учетом вероятности линьки был реализован в виде скриптов под бесплатным распространяемый статистический язык программирования R (<http://cran.r-project.org/>).

Подобная схема может быть использована для оценки запасов других морских промысловых беспозвоночных и рыб.

Результаты и их обсуждение

Исходными данными для оценки состояния запасов камчатского краба шельфа западной Камчатки с помощью изложенных выше алгоритмов оптимальной фильтрации и интерполяции послужили:

— данные о фактическом вылове (млн экз.) камчатского краба по функциональным группам (1 — пререкруты, 2 — рекруты, 3 — промысловые самцы) и годам (1996–2014 гг.);

— мгновенные коэффициенты естественной смертности (приняли равными 0,2 в год для всех трех функциональных групп);

— вероятность линьки по функциональным группам (Лысенко, 2001);

— данные учетных траловых съемок о численности промысловых самцов, рекрутов и пререкрутов камчатского краба на шельфе западной Камчатки;

— данные об уловах промысловых самцов на единицу промыслового усилия по данным ловушечных съемок.

Основные результаты расчетов представлены на рис. 2–3 и в табл. 1. Они показывают, что рост запасов по данным наблюдений в последние годы не является следствием ошибок измерения, он объективен и обусловлен снижением пресса промысла (в основном браконьерского) на популяцию. Численность промысловых самцов на начало 2014 г. оценивается нами на уровне 59,71 млн экз., биомасса — 136,13 тыс. т. На рис. 3 (В) также представлены интервальные оценки прогноза состояния промыслового запаса в 2016 г. По модельным оценкам, в ближайшие два года на шельфе западной Камчатки продолжится бурный рост численности промысловых самцов камчатского краба.

В настоящей работе мы не ставили перед собой цель определить оптимальную долю изъятия для камчатского краба западнокамчатского шельфа. Мы ограничимся лишь приблизительными и, на наш взгляд, весьма предосторожными оценками для величин возможного вылова на 2016 г. и сравним их с официально рекомендуемой величиной ОДУ. В табл. 2 даны процентиля бутстреп-распределения некоторых биологических ориентиров. Первые четыре из представленных ориентиров довольно часто используются в качестве «заменителей» F_{msy} и как целевые ориентиры по промысловой смертности, а последние два, как правило, основные кандидаты в граничные ориентиры по биомассе.

Попробуем взять в качестве целевого ориентира по промысловой смертности нижнюю границу 95 %-ного доверительного интервала самого предосторожного из них, т.е. $F_{tr} = 0,202$ в год. Соответствующий целевой ориентир по биомассе промысловых самцов легко определить по кривой равновесной промысловой биомассы на пререкрута (рис. 4). При численности пререкрутов на среднемноголетнем уровне (27,1 млн экз.) и средней массе промысловых самцов 2,28 кг он составит 92,56 тыс. т. Формула для нахождения значений равновесной промысловой биомассы на пререкрута имеет вид

$$\frac{FSB}{N_1}(f) = \frac{2,28N_3}{N_1}(f) = 2,28 \frac{p_1 p_2 \exp(-fs_1 - M_1) \exp(-fs_2 - M_2)}{(1 - \exp(-fs_3 - M_3))(1 - (1 - p_2) \exp(-fs_2 - M_2))}.$$

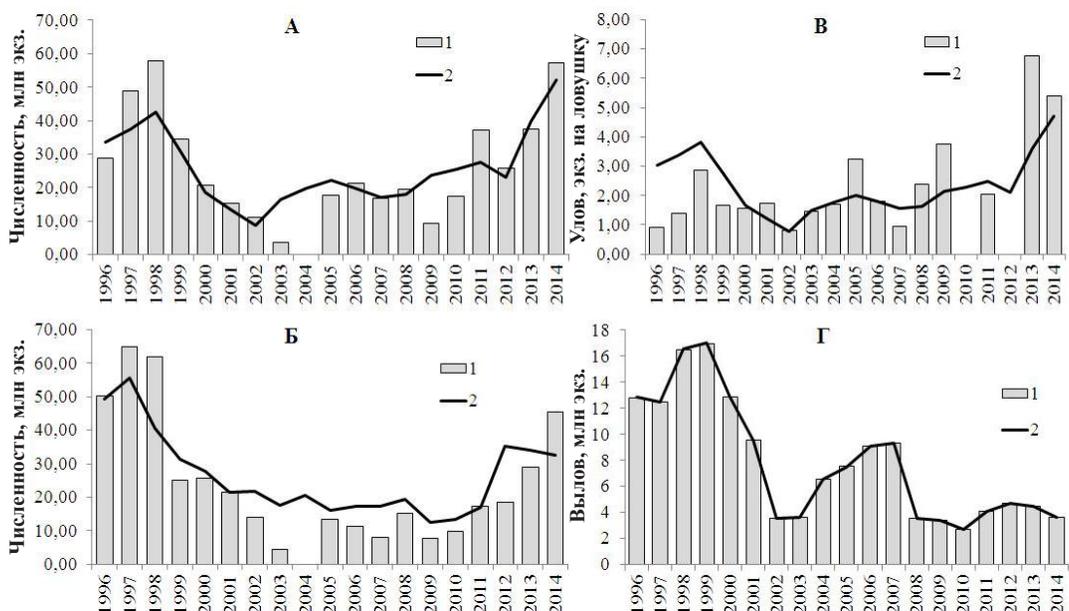


Рис. 2. Исходные (1) и отфильтрованные (2) данные учетных траловых съёмок о численности промысловых самцов (А), рекрутов и пререкрутов (Б), об уловах промысловых самцов на ловушку (В), фактическом вылове промысловых самцов (Г)

Fig. 2. Initial (1) and filtered (2) data of trawl surveys on the number of commercial males (А), recruits and prerecruits (Б), on the catch of males per trap (В), and on actual catch of commercial males (Г)

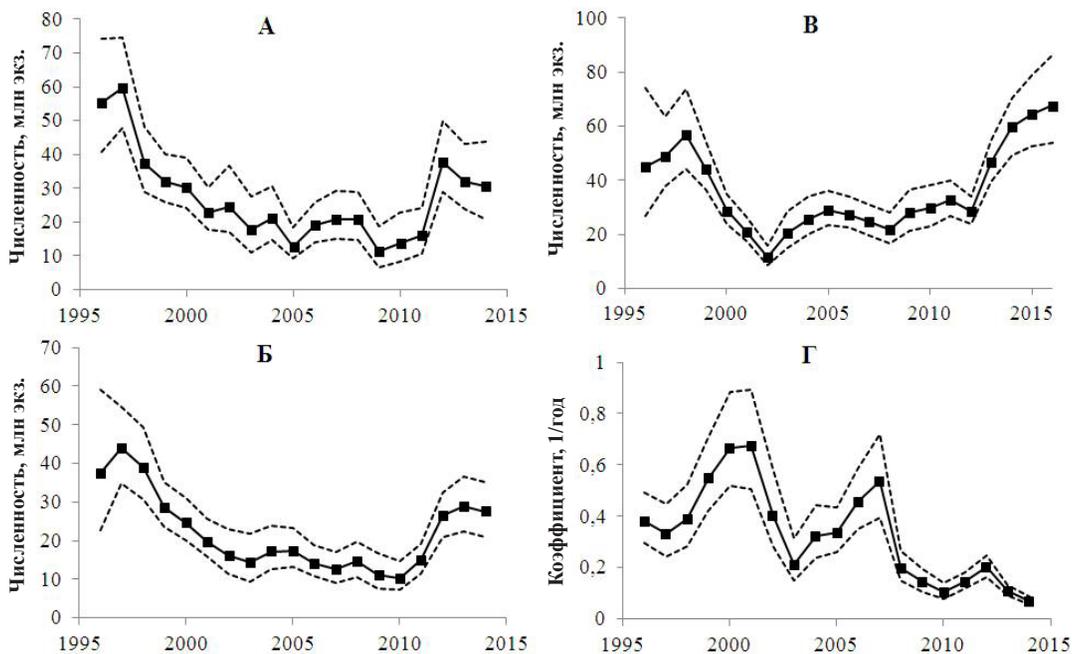


Рис. 3. Межгодовая динамика численности пререкрутов (А), рекрутов (Б), промысловых самцов (В) и коэффициентов промысловой смертности промысловых самцов (Г) камчатского краба на шельфе западной Камчатки. Пунктирные линии показывают 90 %-ные доверительные интервалы

Fig. 3. Year-to-year dynamics of abundance for prerecruits (А), recruits (Б), commercial males (В) and of fishing mortality rate for commercial males (Г) on the shelf of West Kamchatka. Dotted lines indicate 90 % confidence intervals

На начало 2016 г. прогнозная оценка численности промысловых самцов, согласно расчетам по уравнению состояния, составит 67,97 млн экз., биомасса — 154,97 тыс. т (см.

Оценки максимального правдоподобия (ОМП) и коэффициенты вариации (CV) популяционных параметров

Table 1

Maximum likelihood estimates (ОМП) and coefficients of variation (CV) for the population parameters

Параметр	ОМП	CV	Параметр	ОМП	CV	Параметр	ОМП	CV
f_{1996}	0,379	0,158	f_{2011}	0,146	0,132	α_{2007}	0,994	0,171
f_{1997}	0,329	0,186	f_{2012}	0,201	0,127	α_{2008}	0,540	0,264
f_{1998}	0,384	0,185	f_{2013}	0,111	0,110	α_{2009}	1,227	0,324
f_{1999}	0,545	0,159	f_{2014}	0,069	0,125	α_{2010}	1,161	0,287
f_{2000}	0,673	0,164	α_{1996}	1,013	0,128	α_{2011}	2,361	0,193
f_{2001}	0,680	0,177	α_{1997}	0,629	0,070	α_{2012}	0,849	0,142
f_{2002}	0,404	0,225	α_{1998}	0,853	0,091	α_{2013}	0,958	0,205
f_{2003}	0,218	0,222	α_{1999}	0,946	0,104	N_1	55,432	0,175
f_{2004}	0,327	0,187	α_{2000}	0,758	0,132	N_2	37,517	0,303
f_{2005}	0,335	0,158	α_{2001}	1,074	0,208	N_3	44,871	0,314
f_{2006}	0,452	0,166	α_{2002}	0,716	0,198	q_{1-2}	0,628	0,121
f_{2007}	0,530	0,189	α_{2003}	1,193	0,185	q_3	1,000	0,001
f_{2008}	0,198	0,180	α_{2004}	0,610	0,164	q_u	0,090	0,160
f_{2009}	0,143	0,185	α_{2005}	1,475	0,160	s_1	0,321	0,145
f_{2010}	0,105	0,168	α_{2006}	1,104	0,155	s_2	0,392	0,119

Таблица 2

Интервальные оценки биологических ориентиров

Table 2

Interval estimates for biological reference points

Параметр	2,50	50	97,50
F_{lim} (Caddy, 1998), 1/год	0,227	0,236	0,243
$F_{45\%}$, 1/год	0,202	0,218	0,231
$F_{40\%}$, 1/год	0,243	0,264	0,282
$F_{0,1}$, 1/год	0,222	0,245	0,265
V_{loss} , тыс. т	19,99	26,67	36,61
$V_{20\%}$, тыс. т	35,30	42,24	50,22

Рис. 4. Кривые равновесного улова (I) и равновесной биомассы промысловых самцов (2) на пререкрута

Fig. 4. Sustainable catch per prerecruit (I) and sustainable biomass of commercial males per prerecruit (2)

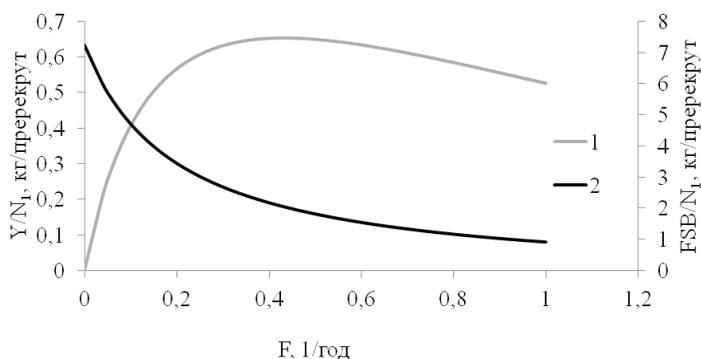


рис. 3, В). Нижняя граница 90 %-ного доверительного интервала этой оценки (53,76 млн экз. и 122,51 тыс. т) превосходит значение указанного выше целевого ориентира по биомассе. Для прогнозирования состояния запаса использовали те же значения мгновенных коэффициентов естественной смертности и селективности, что и в ретроспективе, а коэффициенты промысловой смертности в 2015 г. приняли соответствующими установленным величинам ОДУ камчатского краба западнокамчатского шельфа на 2015 г. (7,38 тыс. т). Относительно представленных выше ориентиров прогноз состояния запаса более чем оптимистичный и предполагает интенсивность изъятия на уровне целевого ориентира. Статистические характеристики оценки возможного вылова камчатского краба шельфа западной Камчатки в 2016 г. представлены в табл. 3.

Таблица 3

Статистические характеристики оценки возможного вылова камчатского краба шельфа западной Камчатки в 2016 г., тыс. т

Table 3

Statistical parameters for estimation of total allowable catch (TAC) of red king crab on the shelf of West Kamchatka in 2016, 10³ t

σ	2,5%	5%	15%	50%	85%	95%	97,5%
3,709	19,76	20,38	22,19	25,64	29,89	32,75	33,82

На момент подготовки к печати данной публикации официально рекомендуемая величина ОДУ камчатского краба западнокамчатского шельфа на 2016 г. значительно ниже определенной нами нижней границы 95 %-ного доверительного интервала возможного вылова (19,76 тыс. т) — около 9,12 тыс. т. К нашему сожалению, методика обоснования этой величины, на фоне результатов учетных траловых съемок последних лет (см. рис. 2), остается неизвестной. Появились ссылки на некую никак биологически не обоснованную лимитирующую величину (от 12 до 23 %), которую не должна превышать относительная разность в ОДУ смежных лет. Нетрудно подсчитать, для того чтобы с такого рода ограничением повысить ОДУ с 9,12 до 19,76 тыс. т, понадобится четыре года. Располагая целым набором фактов, объективно указывающих на восстановление запаса камчатского краба западной Камчатки, не использовать столь востребованный ресурс по крайней мере не рационально.

Заключение

В данной работе рассмотрен один из возможных модельных подходов к оценке состояния запасов камчатского краба шельфа западной Камчатки на основе модели динамики трех функциональных групп (рекруты, пререкруты, промысловые самцы). Оценка состояния запаса и неизвестных параметров модели сводится к решению совместной задачи оптимальной фильтрации (интерполяции) и идентификации. В модельные расчеты заложен фактический вылов, приближенные оценки которого были получены на основе данных таможен Японии, Кореи, США, Китая об объемах импорта крабовой продукции из России. Результаты моделирования подтверждают данные прямых наблюдений о бурном росте запасов камчатского краба западнокамчатского шельфа в последние годы и, более того, говорят о том, что рекомендуемая к вылову величина ОДУ этого ценного вида биоресурсов может быть существенно увеличена.

Список литературы

- Лысенко В.Н.** Особенности линьки камчатского краба (*Paralithodes camtschaticus*) на западнокамчатском шельфе // Исследования биологии промысловых ракообразных и водорослей морей России. — М. : ВНИРО, 2001. — С. 111–119.
- Лысенко В.Н., Гайдаев В.Э.** Рост камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в северной части западнокамчатского шельфа // Изв. ТИНРО. — 2005. — Т. 143. — С. 119–127.
- Максименко В.П.** Оценка запасов и ОДУ камчатского краба западнокамчатского шельфа методом когортного анализа с учетом вероятностей его линьки : отчет о НИР / КамчатНИРО. № 7051. — Петропавловск-Камчатский, 2003. — 18 с.
- Максименко В.П., Лысенко В.Н.** Оценка промыслового запаса и возможного вылова синего краба северо-восточной части Охотского моря методом виртуально-популяционного анализа // Исслед. вод. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2002. — Вып. 6. — С. 131–134.
- Михеев А.А.** Возрастная классификация беспозвоночных на основе размерных рядов // Морские прибрежные экосистемы. Водоросли, беспозвоночные и продукты их переработки : тез. докл. четвертой междунар. науч.-практ. конф. — Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2011. — С. 150–151.
- Михеев А.А.** Стохастическая когортная модель с прерывистым ростом // Тр. СахНИРО. — 2003. — Т. 5. — С. 216–242.
- Basson M., Rosenberg A.A., Beddington J.R.** The accuracy and reliability of two new methods for estimating growth parameters from length-frequency data // J. Cons. Int. Explor. Mer. — 1988. — Vol. 44, № 3. — P. 277–285.

Bucy R.S., Joseph P.D. Filtering for stochastic processes with application to guidance. — N.Y. : Wiley Interscience Publishers, 1968. — 195 p.

Caddy J.F. A short review of precautionary reference points and some proposals for their use in data-poor situations : FAO Fish. Techn. Paper. — 1998. — № 379. — 30 p.

Collie J.S., Kruse G.H. Estimating king crab (*Paralithodes camtschaticus*) abundance from commercial catch and research survey data // Proceedings of the North Pacific Symposium on Invertebrate Stock Assessment and Management : Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. — 1998. — Vol. 125. — P. 73–83.

Collie J.S., Sissenwine M.P. Estimating population size from relative abundance data measured with error // Can. J. Fish. Aquat. Sci. — 1983. — Vol. 40. — P. 1871–1879.

Deriso R.B., Quinn II T.J., Neal P.R. Catch-age analysis with auxiliary information // Can. J. Fish. Aquat. Sci. — 1985. — Vol. 42. — P. 815–824.

Grewal M.S., Andrews A.P. Kalman filtering: theory and practice. — New Jersey : Prentice-Hall, 1993. — 380 p.

Pope J.G., Shepherd J.G. A comparison of the performance of various methods for tuning VPAs using effort data // J. Cons. Int. Explor. Mer. — 1985. — Vol. 42, № 2. — P. 129–151.

Поступила в редакцию 15.05.15 г.