

Научная статья

УДК [639.2.053.2:597.556.35]/(265.53)

DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-466-497

EDN: FHOWDD



ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗАПАСА ЧЕРНОГО ПАЛТУСА (*REINHARDTIUS HIPPOGLOSSOIDES MATSUURAE*) В ОХОТСКОМ МОРЕ

В.В. Кулик¹, И.И. Глебов¹, Н.Л. Асеева¹, Р.Н. Новиков^{2*}

¹ Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;

² Камчатский филиал ВНИРО (КамчатНИРО),
683000, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, 18

Аннотация. Промысловый запас черного палтуса в рыболовной зоне «Охотское море» оценен с вероятностью в 97,5 % как переловленный с продолжающимся переловом. Такой результат получен методом двойной фильтрации апостериорных оценок параметров обобщенной модели прибавочной продукции в пространстве состояний (JABBA) и дополнительной настройки на основе ее результатов новой модели. Значительных изменений в индикаторах внешней среды и в режимах параметров не найдено. Основной причиной перелова считаем завышенный ориентир управления ($H = 10$ % от общей биомассы), назначенный на Дальнем Востоке России до его внутримодельных обоснований и применявшийся как ориентир для сравнения корректности модельной настройки до 2021 г. Некорректность его прежнего определения связана с неверными расчетами возрастной структуры черного палтуса из-за неточного метода определения возраста рыб по чешуе. Предложен новый и независимый от ошибок определения возраста метод определения состояния запаса и промысла на основе дополнительной фильтрации результатов модели JABBA. Предложено перейти на использование нового метода до окончательного исправления размерно-возрастного ключа, который прежде значительно занижал возраст черного палтуса. Новый ориентир управления промыслом H находится в 95 %-ном доверительном интервале от 2,5 до 5,4 % с медианой около 3,75 %. Предлагаемый ориентир незначительно выше используемого в Международном совете по исследованию моря для черного палтуса в северо-восточной Арктике ($H = 3,5$ %), где начаты обсуждения мер по его снижению до 2,5 %. Однако там условия обитания и, вероятно, скорость роста черного палтуса не совпадают с таковыми Охотского моря, поэтому мы должны продолжать собственные исследования оптимального уровня эксплуатации, а не принимать аналогичные из других районов ареала данного вида.

Ключевые слова: черный палтус, промысловый запас, Охотское море, прибавочная продукция, байесовский подход

* Кулик Владимир Владимирович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, vladimir.kulik@tinro-center.ru, ORCID 0000-0003-0920-5312; Глебов Игорь Иванович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, igor.glebov@tinro-center.ru; Асеева Надежда Леонидовна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, nadezhda.aseeva@tinro-center.ru; Новиков Роман Николаевич, старший научный сотрудник, novikov.r.n@kamniro.ru.

Для цитирования: Кулик В.В., Глебов И.И., Асеева Н.Л., Новиков Р.Н. Оценка состояния запаса черного палтуса (*Reinhardtius hippoglossoides matsuurae*) в Охотском море // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 2. — С. 466–497. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-466-497. EDN: FHOWDD.

Original article

Assessment of the stock status for greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides matsuurae*) in the Okhotsk Sea

Vladimir V. Kulik¹, Igor I. Glebov¹, Nadezhda L. Aseeva¹, Roman N. Novikov²

¹ Ph.D., head of laboratory, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, vladimir.kulik@tinro-center.ru; Ph.D., leading researcher, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, igor.glebov@tinro-center.ru; Ph.D., leading researcher, Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia, nadezhda.aseeva@tinro-center.ru

² senior researcher, Kamchatka branch of VNIRO (KamchatNIRO), 18, Naberezhnaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000, Russia, novikov.r.n@kamniro.ru

Abstract. State of the greenland halibut stock in the Sea of Okhotsk fishing zone is evaluated as overfished with a high probability of 97.5 % by the index of fishable biomass, and the overfishing continued in 2021. This conclusion is based on results of double filtering the posterior parameter estimates in the state-space generalized surplus production model JABBA (Just Another Bayesian Biomass Assessment), with additional tuning of the new model taking into account these results. The overfishing was not caused by significant changes of environmental parameters (average SST and EOF modes of SST were examined), but its main reason was the overestimated target harvest rate established for the Far East of Russia as 10 % of the total biomass or a half of natural annual mortality (20 %). This incorrect value of the rate was based on incorrect determination of age structure and terminal age for the halibut by the fish scale method. The new approach of the stock status evaluation with JABBA model is independent on the age data. It includes the additional filtering of the JABBA model result, its refinement with stringent tuning using the algorithm of No-U-Turn sampler, and checking additional parameters on hyperstability or hypersensitivity. The new reference point of the target harvest rate is between 2.5 and 5.4 % (95 % credible interval) of the total biomass, with a median of about 3.75 %. This new value is slightly higher than that one used by ICES for greenland halibut in the northeastern Atlantic (3.5 % for fishable biomass, its reduction to 2.5 % is discussed), but these values cannot be compared because of different habitat conditions and probably different growth rate of greenland halibut in the Okhotsk Sea and the Atlantic. Researches on the optimal level of greenland halibut exploitation should be continued; anyway, the new reference point of the target harvest rate has to be implemented immediately and to be used at least until correction of the age-length key for greenland halibut in the Okhotsk Sea. The input data and Stan code of the new model are presented in the annexes.

Keywords: greenland halibut, stock status, Okhotsk Sea, surplus production, Bayesian approach

For citation: Kulik V.V., Glebov I.I., Aseeva N.L., Novikov R.N. Assessment of the stock status for greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides matsuurae*) in the Okhotsk Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 2, pp. 466–497. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-466-497. EDN: FHOWDD.

Введение

Оценка состояния запаса и промысла требуется для определения рекомендуемой интенсивности эксплуатации гидробионтов, которая должна снижаться согласно правилу регулирования промысла (ПРП), если эти оценки вышли из безопасной зоны нахождения или режима постоянной интенсивности промысла [Бабаян, 2000]. Важно также учитывать тенденции в динамике биомассы и ее изъятия, в силу того что найденное в текущем году состояние запаса может значительно измениться в последующие годы в зависимости от промысла и неуправляемых и, что еще хуже, непредсказуемых компонентов биогеоценоза, которые и дают существенный вклад в неопределенность

моделей [Hilborn, 2020]. Даже в самых обеспеченных информацией оценках все равно могут находиться большие неопределенности в связи с ошибками модельных допущений [Punt, 2008]. Например, оценки состояния запаса очень чувствительны к предположениям о естественной смертности по возрасту [Jiao et al., 2012], селективности орудий лова [Brooks et al., 2009] и взаимосвязи между запасом и пополнением [Cury et al., 2014]. Ошибки в этих допущениях или параметрах (в моделях, где они подбираются) влияют на оценки биомасс и рекомендуемых уловов [Punt et al., 2021]. В методах, отслеживающих изменения длины рыб, ошибки могут быть настолько велики, что без калибровки относительно моделей роста рыб их вообще не рекомендуется использовать для определения состояния запаса, хотя они и могут показать тенденции в запасе [Kell et al., 2022].

Прогнозирование осуществляется с использованием моделей биологических процессов в лучшем случае, а в худшем — на основе моделей временных рядов. Любой эксплуатируемый запас содержит достаточно информации для определения максимального устойчивого улова (MSY — maximum sustainable yield), если сохранена история его уловов, которая позволит использовать модели, требующие такую информацию, но только уловов недостаточно для определения состояния запаса [Ovando et al., 2022]. Точная оценка состояния запаса возможна в моделях прибавочной продукции, если были заданы достаточно точные априорные распределения двух параметров: приемной емкости — K и мгновенного коэффициента популяционного роста — r , но все равно требуется их дополнительная фильтрация с оглядкой на биологию вида [Ovando et al., 2022]. В любом случае точность определения параметров моделей влияет на доверительный интервал прогноза.

Термин «перелов» не имеет общепринятого определения. Например, в Чили и комиссиях по управлению промыслом тунцов — ICCAT [www.iccat.int], IATTC [www.iattc.org], WCPFC [www.wcpfc.int] и IOTC [www.iotc.org] — переловленным считается запас, чья нерестовая биомасса (SSB — spawning stock biomass) ниже той, что обеспечивает MSY. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций (ФАО ООН) перелов определяет при снижении биомассы (B) ниже $0,8 \times B_{MSY}$, а в США и Новой Зеландии этот же запас будет считаться переловленным, если $B < 0,5 \times B_{MSY}$ [Hilborn, 2020]. Комиссия по рыболовству в северной части Тихого океана (СТО) [www.npfrc.int] пока не имеет утвержденного определения термина «перелов». Там предлагалось придавать статус переловленного запаса сайре при $B < k \times B_{MSY}$ ($k \leq 0,25$) для учета ее высокой скорости роста, но до окончательной оценки стратегии управления (MSE — management strategy evaluation) и разработки ПРП принимают $k = 1$ ($B < B_{MSY}$). Таким образом, состояние перелова может изменяться на иное в связи с другим определением такого термина.

Объем допустимого улова (ОДУ) в России определяется согласно ПРП на 1 год вперед и зависит от прогноза оценки состояния запаса через 1 год и более, если запас переловлен. Будущие состояния сильно зависят от неопределенности текущих оценок, которые ни в одном из методов оценки запасов не бывают абсолютно точными. Подготовка материалов, обосновывающих ОДУ черного палтуса *Reinhardtius hippoglossoides matsuiuae* в Охотском море, производится сначала для всей рыболовной зоны «Охотское море» целиком, а затем разделяется по входящим в нее промысловым подзонам: Северо-Охотоморской, Западно-Камчатской, Восточно-Сахалинской и Камчатско-Курильской. Разделение производится на основании информации, полученной на промысле и при проведении научных съемок.

Основанием для изначально общей оценки запаса является то, что в Охотском море обитает единая группировка черного палтуса предположительно подразделяющаяся на две субпопуляции [Дьяков, 1984, 1991; Николенко, Катугин, 1998]. У западнокамчатской субпопуляции размножение происходит в основном в желобе Лебедя и впадине ТИНРО, а развитие молоди — в зал. Шелихова и частично в северо-западной

части моря. Значительно меньшие объемы нереста наблюдаются на склонах впадины Дерюгина, где проходит основной нерест сахалинской части субпопуляции, а молодь обитает в заливах Сахалина. По мере взросления молодь совершает миграции в районы воспроизводства. Нагульная область половозрелых особей включает практически всю акваторию моря. Зависимость сахалинской субпопуляции от пополнения из камчатской была показана в результате имитации распространения агентов (пассивных частиц), представляющих планктонную стадию жизни черного палтуса, но значимого влияния моделируемых течений на камчатскую субпопуляцию выявить не удалось [Кулик и др., 2020a].

Оценка состояния запаса черного палтуса в Охотском море производится, как для единой популяции, поэтому правомочно применение моделей биологических процессов. Эти модели подразделяются согласно уровню информационного обеспечения на структурированные, например по возрасту (I уровень), и неструктурированные (II и III уровень) согласно приказу Росрыболовства № 104 от 06.02.2015 г. Материалы ОДУ водных биологических ресурсов, включающие оценку состояния запаса и промысла черного палтуса в зоне «Охотское море», были представлены для общественных обсуждений на сайте ТИНРО с 23 марта по 22 апреля 2022 г. [<http://tinro.vniro.ru>]. Наша оценка получена с использованием как I уровня информационного обеспечения в статистической когортной модели Синтез [Ильин и др., 2014] согласно рекомендациям ВНИРО [Бабаян и др., 2020], так и уровня II, реализованного в модели прибавочной продукции в пространстве состояний с использованием байесовского подхода — JABBA (Just Another Bayesian Biomass Assessment) [Winker et al., 2018]. Рекомендации ВНИРО включают разрешение использовать «модели-аналоги, прошедшие апробацию в международных организациях по рыболовству и профильных ведомствах развитых стран» [Бабаян и др., 2020, с. 275]. Модель JABBA используется во множестве международных комиссий по рыболовству, включая Комиссию СТО. Таким образом, формальных ограничений применения модели JABBA в дополнение к рекомендованной ВНИРО модели Синтез нет. Необходимость настройки модели JABBA возникла по причине отсутствия возможности в модели Синтез найти биологические ориентиры, обеспечивающие MSY, или их аналоги, имеющие значения, относительно которых устанавливаются целевые ориентиры управления промыслом. Это могло случиться из-за нахождения запаса в неизвестном, но в неизменном состоянии в течение всего периода, для которого применялась модель Синтез (с 2001 по 2021 г.).

Модель Синтез используется нами ежегодно с 2017 г., сначала по сумме уловов в трех подзонах [Кулик и др., 2020a], а с 2020 г. во всей зоне «Охотское море» по данным с 2001 г. Ранее 2001 г. информации о возрастной структуре уловов подготовлено не было. Ее надежность также вызвала сомнения из-за отсутствия актуальных для тех лет размерно-возрастных ключей. Используемый сейчас размерно-возрастной ключ построен по определениям возраста по чешуе, собранной в 2013 и 2017 гг. Мы допускали, что из-за предельного возраста в 17 лет, использованного в матрице уловов для модели Синтез, наблюдения уловов более старших возрастных групп особой роли играть не будут, так как они уже полностью элиминируют в модели. В модели Синтез плюс группы нет, а все особи старше 17 лет считались исчезнувшими.

Проблемы в настройке связаны с неизвестностью точного вылова, который полагался более высоким (чем сообщалось в официальной отчетности) из-за «нахлебничества» косаток и объедания улова придонными гидробионтами при длительных застоях донных сетей и ярусов, что приводит к потере улова или товарного вида и занижению сообщаемого улова, который рассчитывается от выпущенной продукции. Проблема «нахлебничества» косаток при промысле черного палтуса широко известна во всем мире, включая Охотское море [Николенко, 2010; Белонович, Бурканов, 2012; Зуенко и др., 2019] и Берингово, в котором средние потери из-за косаток колеблются от 9 до 28 % [Peterson et al., 2013]. В абсолютных величинах потери улова черного палтуса

в Охотском море могут составлять 2,6 тыс. т за сезон [Корнев и др., 2014]. Ранее мы уже пытались учесть различные доли потерь (от 0 до 1/3) и абсолютных величин, но прежние оценки публиковались только в виде материалов ОДУ для общественных обсуждений. В последних материалах ОДУ на 2023 г. оптимальными (но не по всем исследованным показателям качества настройки модели) оказались потери около 20 % изначального улова в модели Синтез.

Научная съемка донными травами в Охотском море в диапазоне обитания большей части черного палтуса в последний раз проведена в 2018 г. Тогда промысловый запас черного палтуса оценивался методом площадей около 116,9 тыс. т, а общий запас примерно равнялся 119,58 тыс. т. Предыдущие научные съемки в 2013 и 2010 гг. показали намного более высокие биомассы, поэтому была поставлена под сомнение оценка 2018 г. Сначала мы предположили, что в 2018 г. черный палтус еще не успел выйти в традиционные районы летнего нагула, а часть его находилась за пределами обследованной акватории, где плотность скоплений была выше, чем в летне-осенний период. Учетная съемка 2013 г. весьма схожа со съемкой, выполненной в 2010 г.

За пятилетний период, прошедший с предыдущих исследований 2013 г., по результатам съемки 2018 г. проявилось резкое снижение запасов черного палтуса в трех промысловых подзонах Охотского моря (рис. 1). Если в 2013 г. биомасса черного палтуса в пределах съемки была оценена в 206,2 тыс. т (промысловый запас — 190,8 тыс. т), то по результатам исследований весны 2018 г. ресурсы черного палтуса в трех подзонах оценены всего в 113,0 тыс. т, а промысловый запас — 110,4 тыс. т.

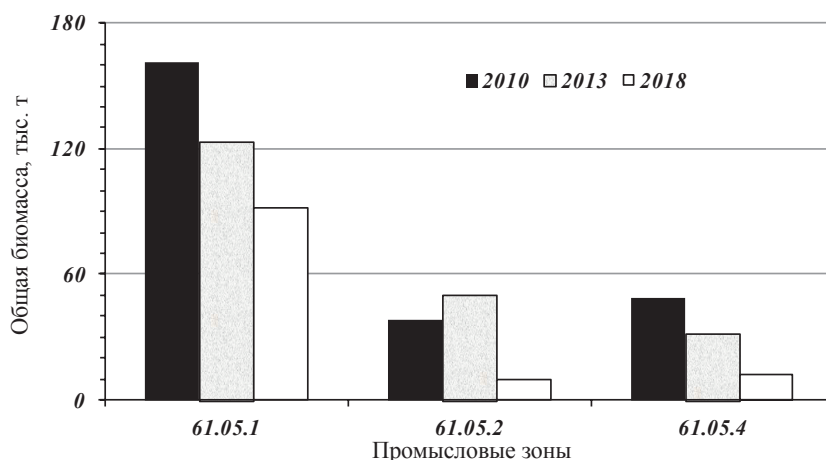


Рис. 1. Распределение общей биомассы черного палтуса по результатам донных учетных съемок 2010, 2013 и 2018 гг. по промысловым подзонам: 61.05.1 — Северо-Охотоморская, 61.05.2 — Западно-Камчатская, 61.05.4 — Камчатско-Курильская

Fig. 1. Total biomass ($\times 10^3$ metric ton) of greenland halibut in the fishing subzones: 61.05.1 — North Okhotsk Sea, 61.05.2 — West Kamchatka, 61.05.4 — Kamchatka-Kuril according to area-swept method applied to fishery-independent bottom trawl surveys in 2010, 2013, and 2018

Значительный для модели Синтез источник вероятных ошибок динамики численности черного палтуса обнаружен в 2021 г. Результаты сравнительной оценки возраста черного палтуса в Охотском море показали, что прежний метод определения возраста по чешуе значительно занижает возраст рыб длиннее 50 см [Бадаев и др., 2022]. Проведенных измерений возраста более точным методом (срезами через бугорок) пока недостаточно для создания нового размерно-возрастного ключа, а для повышения скорости и эффективности подготовки отолитов требуется высокоточная низкоскоростная пила [Бадаев и др., 2022]. Разница между определением возраста по новому методу (срезами через бугорок отолита) и по поверхности уже достигала 20 лет для крупного черного

палтуса в восточной части Берингова моря, составив в среднем 5 лет, а для мелких рыб была незначительной [Gregg et al., 2006]. Модель Синтез настроена в основном по данным ярусных уловов, в которых мелкий палтус не встречается. Следовательно, проведение уточнения размерно-возрастных ключей черного палтуса в Охотском море позволит снизить ошибки модели Синтез, но пока это невозможно, поэтому результаты модели Синтез здесь не будут рассматриваться.

В итоге цель данной работы заключается в повышении точности оценки состояния запаса черного палтуса в зоне «Охотское море» с использованием байесовского подхода в модели, не зависящей от корректности определения возраста рыб. Такой моделью является JABBA, но в ней мы уже обнаруживали сочетания параметров в апостериорных распределениях, приводящие к абсурдным (отрицательным) биомассам в долгосрочном прогнозе. Следовательно, нам необходимо дополнительно улучшить результаты из модели JABBA, подобрав более строгий алгоритм оптимизации параметров.

Материалы и методы

В данной работе используется вся доступная в ТИНРО статистическая информация по промыслу черного палтуса в Охотском море с 1976 по 2021 г. Более ранние данные по промысловой статистике содержат информацию по общему вылову палтусов без разделения по видам и морям [Пискунов, Фадеев, 1976].

Отдельно по подзонам Охотского моря вылов черного палтуса указывается только с 1995 г. Для уточнения вылова черного палтуса были дополнительно проанализированы материалы обзоров ТУРНИФ по промысловой обстановке в тихоокеанском бассейне в 1970–1988 гг. В период интенсивного промысла, 1976–1978 гг., за три года было выловлено более 35 тыс. т в восточной части моря. Сюда также включены данные донного сетного промысла японскими судами у восточного Сахалина и в нейтральной зоне Охотского моря в 1985–1993 гг. [Кодолов, Савин, 1994]. В обзорах сырьевой базы рыбной промышленности Дальневосточного бассейна 1971–1980 гг. уже отмечалось существование неучтенного статистикой вылова, поэтому нельзя считать найденные в архивных обзорах уловы точными. Модель JABBA по умолчанию допускает коэффициент вариации (CV) уловов в 5 %, но с учетом коррекции уловов из-за предполагаемых 20 % потерь, связанных с косатками и прочими причинами порчи улова, мы повысили CV до 30 %.

Общая промысловая статистика в виде судовых суточных донесений (ССД) доступна в отраслевой системе мониторинга (ОСМ) Росрыболовства [Пырклов и др., 2015], которая ведется в Центре системы мониторинга рыболовства и связи [<http://cfmc.ru/>] и сохраняется в ТИНРО при помощи сотрудников Института космических исследований Российской академии наук. Эта информация является важнейшей для настройки моделей II уровня информационного обеспечения.

В простейшем случае уловы (C) зависят от усилий (E , например судо-сутки или протравленная площадь), промысловой биомассы (B — fishable biomass) и улавливаемости запаса (q) по формуле (1) [Ovando et al., 2022]

$$C_t = q E_t B_t, \text{ тогда } U_t = C_t / E_t = q_t B_t, \quad (1)$$

где t — время, например год; U_t — улов на единицу усилия.

В худшем случае при наличии информации только по уловам пришлось бы допустить q и E какими-то константами. Благодаря ССД мы можем хорошо оценить усилия (E_t) начиная с суточного масштаба с 1997 г., а благодаря научным съемкам можем иметь априорное суждение о распределении q для них, если используем биомассы, найденные в съемках, вместо U_t . В промысловых обзорах нам также доступны U_t до периода сохранения ССД.

В модели JABBA также связь между U_t и B_t подразумевается прямопропорциональной, а улавливаемость q — стационарной по всем годам. Мы постараемся учесть

эффект гиперстабильности или гиперчувствительности [Hilborn, Walters, 1992] индексов по формуле

$$U_i = qB_i^h, \quad (2)$$

где h — параметр гиперчувствительности индекса численности при $h > 1$ или его гиперстабильности при $h < 1$ [Bannerot, Austin, 1983].

Настройка нашей новой модели из результатов модели JABBA и ее анализ будут проходить в языках программирования Stan* и R** посредством их связи через пакет RStan***. Ключевые параметры r и K зададим в нормальных априорных распределениях, но в логарифмическом масштабе, позволяя в Stan трансформировать их в естественный масштаб, что ускоряет настройку, поэтому формула (2) переведена в логарифмический масштаб:

$$\text{Ln}(U_i) = \text{Ln}(q) + h\text{Ln}(B_i). \quad (3)$$

В связи с тем что на вход новой модели в RStan вместо U_i будет дан ряд медиан B_i из модели JABBA, мы зададим узкие априорные равномерные распределения h от 0,7 до 1,3 и $\text{Ln}(q)$ от $\text{Ln}(0,7)$ до $\text{Ln}(1,3)$.

Уравнения обобщенной модели прибавочной продукции в пространстве состояний с использованием байесова подхода опубликованы [Brown et al., 2020] вместе с исходным текстом под свободной лицензией с указанием авторства (Creative Commons Attribution 4.0 International License) на языке Stan [<https://github.com/cbrown5/surplus-prodn-model>]. Наш исходный текст для Stan является упрощением уже опубликованного [Brown et al., 2020] ввиду замены двух периодов для q на один, оценки которых нам кажутся избыточными из-за отсутствия гипотезы о смене q по периодам, а также дополнением оценки параметра h по формуле (3). Наш исходный текст программы также доступен под идентичной лицензией в приложении (см. на сайте BSPM.stan). Эта модель далее в тексте будет называться BSPM.stan.

Априорное распределение $\text{Ln}(q)$ в оригинальном тексте [Brown et al., 2020] задано в гораздо более широком равномерном интервале: от $\text{Ln}(0,01)$ до $\text{Ln}(5)$ — потому что там q является неизвестным для промысловых индексов. Мы же уточняем биомассу из модели JABBA, подавая ее вместо U_i , следовательно, в идеале наш $q = 1$. Аналогичная ситуация может сложиться, если вместо U_i даются оценки биомасс по съемкам с учетом верного коэффициента уловистости (КУ). Если для каждого траления не определяется свой КУ, исходя из особенностей траления и его состава, а также аномалий окружающей среды, а используется одинаковый КУ для всех тралений, то смысл в отдельном КУ в моделях прибавочной продукции остается лишь для его проверки. В формуле (1) уже есть общий учет корректирующего усилия (коим может быть и исследованная площадь) через q , который для выделения тогда называют коэффициентом доступности запаса для съемки. В модели JABBA он ищется для любого индекса численности независимо от остальных в интервале от 10^{-30} до 10^3 , если не указать их сцепленность принудительно [Winker et al., 2018].

В данной работе абсолютный масштаб динамики биомассы калибруется относительно оценок, полученных в научных съемках, с использованием оценки коэффициента доступности запаса. Калибровка может быть пропущена назначением $q = 1$, что упростило бы модель, но не допускается в оригинальной модели JABBA. Тем не менее в Комиссии СТО есть неопубликованная модификация модели JABBA японских специалистов [Oshima et al., 2019], позволяющая указывать конкретные априорные

* Stan Development Team. Stan Modeling Language Users Guide and Reference Manual, 2022, StanHeaders version 2.21.0-7. <https://mc-stan.org>.

** R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022, version 4.1.3 <https://www.R-project.org/>.

*** Stan Development Team. RStan: the R interface to Stan, 2022, R package version 2.21.3, <https://mc-stan.org>.

распределения q для различных индексов. Жесткая фиксация $q = 1$ могла бы быть оправдана тем, что используемый КУ научных тралений абсолютно точен и не зависит от особенностей траления, а использованный метод оценки биомассы по научным съемкам точно отражает истинную биомассу. Последние допущения крайне наивны. Даже если не изменять метод пространственной интерполяции плотностей в тралениях на более адекватный, чем использовался ранее, что также требует отдельного исследования [Волвенко, 1998], то все равно начиная с расчета самих плотностей имеются большие вопросы. Например, опубликован КУ = 0,5 для черного палтуса длиннее 12 см и КУ = 0,2 для более мелких особей [Макрофауна..., 2014], а использованный КУ в материалах ОДУ для черного палтуса равен 0,4. В рейсовых отчетах КУ мог быть равен и 0,3 в некоторые годы. Таким образом, только из-за КУ оценки биомасс в научных съемках могут различаться минимум на 10 %. Более заметные различия в оценках биомасс по донным тралениям научных съемок могут достигаться в результате применения разных методов пространственной интерполяции. Например, общий запас черного палтуса в Охотском море оценивался в 2018 г. традиционным в ТИНРО методом площадей около 119,58 тыс. т, а по более корректной обобщенной аддитивной модели (GAM — generalized additive model [Hastie, Tibshirani, 2014; Wood, 2017]) составил в среднем 198,2 тыс. т, что выше предыдущей оценки на 66 %. Эта GAM, кроме самого улова и площади, учитывала и другие особенности траления: скорость, вертикальное раскрытие, глубину и придонную температуру, которая оказывала значимое влияние на распределение рыб, описывая 8,7 % их дисперсии [Кулик, Мазникова, 2021].

Следующим по сомнительной точности в научных съемках донными тралями (ДТ) является коэффициент пересчета горизонтального раскрытия траля от длины верхней подборы, равный 0,55 [Волвенко, 2013], как среднее из вероятного диапазона от 0,5 до 0,6 [Коротков, 1998]. Такой коэффициент в рейсовых отчетах и в материалах ОДУ не использовался, а использовалось среднее горизонтальное раскрытие, равное 16 м для стандартного донного траля с длиной верхней подборы 27,1 м (ДТ 27,1/24,4), но на шельфе западной части Берингова моря эта средняя уже выше — 16,4 м [Захаров, Емелин, 2016]. В экспериментах ТИНРО установлены отклонения от средней величины в 16 м в диапазоне от 60 % недоучета до 27 % переучета численности гидробионтов, а значение 16 м в инструментальных измерениях встречалось всего в 32 % случаев [Захаров и др., 2013]. И.В. Волвенко [2013] предложил вместо 16 м горизонтального раскрытия для ДТ 27,1/24,4 использовать 14,9 м. Переход на оценку И.В. Волвенко позволил бы увеличить биомассу почти на 7 %, что, например, для черного палтуса выражалось бы в увеличении общей биомассы на 14,2 тыс. т в 2012 г. Однако известна нелинейная положительная связь горизонтального раскрытия со скоростью траления [Волвенко, 2013], с длиной вытравленных ваеров, которая увеличивается с глубиной донного траления, например, при длине ваеров 900 м горизонтальное раскрытие ДТ 27,1/24,4 составит уже 20,1 м [Захаров, Емелин, 2016]. Даже на шельфе, где черный палтус встречается реже, чем на свале глубин, допущение о 16 м горизонтального раскрытия привело к более чем 10 % переучета его биомассы [Захаров, Емелин, 2016]. К сожалению, в Охотском море такие сравнительные работы не проведены.

Экспериментальные работы в ТИНРО показали, что ни КУ [Вдовин, 2000], ни горизонтальное раскрытие ДТ 27,1 [Захаров и др., 2019] не являются постоянными величинами и зависят от многих причин. Следовательно, нельзя считать оценки биомасс по съемкам абсолютно точными, поэтому мы допустили их ошибку в модели JABBA, соответствующую CV = 10 %, считая биомассы индексами U_i . В итоге, если использованный нами КУ = 0,4 и горизонтальное раскрытие 16 м были бы близки к истине, то коэффициент доступности (q) должен оказаться примерно равным 1. Априорные распределения для q в оригинальной модели JABBA не могут быть заданы, поэтому мы не сможем подогнать q для научных съемок к 1 преднамеренно.

Только три съемки донными тралями в Охотском море (в 2010, 2013 и 2018 гг.) были достаточно репрезентативными для черного палтуса, а остальные проводились

на шельфе, где черный палтус встречается редко. Всего трех съемок недостаточно для объективной настройки модели JABBA. Снизить субъективность оценок мы попытались привлечением промысловых индексов численности (CPUE — catch per unit of effort), полученных нами в ТИНРО в результате стандартизации наблюдений из баз данных (БД) «Промысел»* и «Ярусный промысел»**.

Материалы ОДУ доступны в период общественных обсуждений на сайте ТИНРО, но после них файлы удаляются. Следовательно, важные для данной работы части мы повторим ниже. При подготовке материалов ОДУ черного палтуса в зоне «Охотское море» на 2023 г. для настройки модели JABBA были использованы следующие оценки и обозначения.

- Catch — уловы в тысячах тонн (kt) с 1976 по 2021 г., завышенные в 1,25 раза для учета 20 % потерь, даны в приложении (см. на сайте CatchReinh_Ox.csv).

- Bsc — оценки общей биомассы по научным донным траловым съемкам в 2010 г. (249,46 тыс. т), 2013 (206,12 тыс. т) и 2018 гг. (198,18 тыс. т).

- FSBi — индекс эксплуатируемой биомассы из модели Синтез.

- i1 — CPUE с 1976 по 1992 г., соответствующие обзорам промысла в архиве ТИНРО, в тоннах за судо-сутки.

- i2 — стандартизированный индекс CPUE с 1976 по 1984 г. из помесечных CPUE.

- FMS — стандартизированный индекс CPUE из ССД из БД «Промысел» и ОСМ.

- LL — стандартизированный индекс CPUE из БД «Ярусный промысел» с 1996 г.

Все индексы представлены в приложении (см. на сайте cpueReinh_Ox.csv), также в приложении (см. на сайте seReinh_Ox.csv) доступны назначенные для Bsc, FSBi и i1 или рассчитанные для i2, FMS и LL стандартные ошибки индексов. Индексы i2, FSBi, FMS и LL даны там в относительном масштабе: экспоненцированы после центрирования средней в логарифмическом масштабе. В нашем случае FSBi аналогично ИКЕС в абсолютном масштабе меньше нерестового запаса, но не из-за порога в 45 см, отделяющего промысловых особей от непромысловых, как в районах 1–2 ИКЕС, а по другой причине. Мы рассчитали эксплуатируемую биомассу (FSBi) по формуле [Quinn, Deriso, 1999]

$$FSB_i = \sum_a^A s_a N_{a,i} W_{a,i}, \quad (4)$$

где i — год промысла; s — селективность, а интервал от a до A соответствует возрасту рыб в промысловых уловах (по существующему размерно-возрастному ключу от 3 до 17 лет); N — численность рыб; W — средняя масса, кг, которая по всем годам в настройке модели Синтез различалась только по возрасту. Оценки этих величин даны в приложении (см. на сайте SynthesisFSBi.xlsx).

Оптимальная s в модели Синтез найдена не логистической формы, а экспоненциально логистической:

$$s_a = \frac{\exp(a\beta(\gamma-a))}{1-\beta(1-\exp(a(\gamma-a)))}, \quad (5)$$

где оптимизированные коэффициенты модели $\alpha = 1,109$, $\beta = 0,232$, $\gamma = 9,347$, a — возраст рыб.

Селективность снижается после максимума на 9-м году жизни (при определении возраста черного палтуса по чешуе), что вызвано тем, что мгновенная естественная смертность M , оптимизированная в модели Синтез, с возрастом увеличивается (рис. 2), вероятно, из-за самцов, жизненный цикл которых короче, чем у самок. Другие формы M и s приводили к большим ошибкам в модели Синтез. Таким образом, нерестовый запас из-за логистической функции созревания оказывается выше эксплуатируемой

* Свидетельство № 6393 от 01.08.2000 г. о регистрации в Государственном регистре базы данных за № 0220006764 «Промысел».

** Свидетельство № 2017620882 от 11.08.2017 г. о государственной регистрации базы данных «Ярусный промысел».

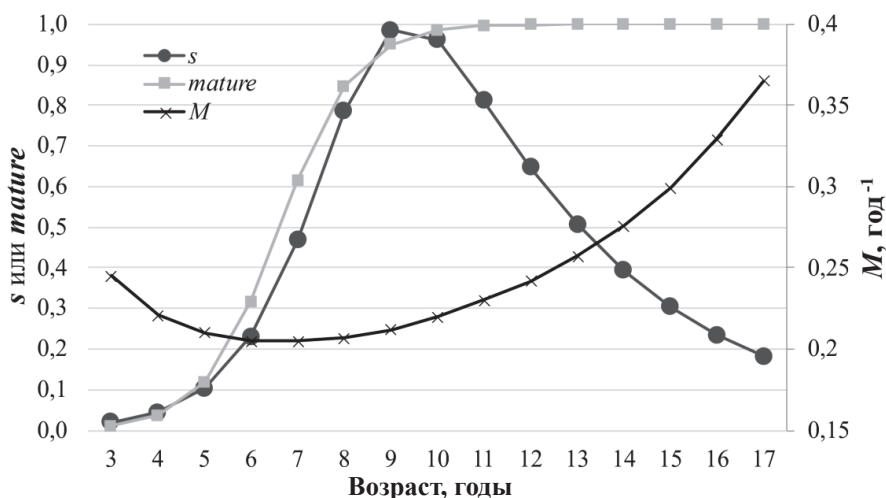


Рис. 2. Селективность (s), доля половозрелых рыб ($mature$) и мгновенная естественная смертность (M) черного палтуса в промысловой зоне «Охотское море», оптимальные для модели Синтез по определениям возраста рыб по чешуе

Fig. 2. Selectivity (s), maturity ($mature$) and instantaneous natural mortality (M) of greenland halibut in the Sea of Okhotsk fishing zone, which are optimal for the model Синтез if the age of fish was determined from scales

части популяции (рис. 3). Стоит обратить внимание, что в модели Синтез минимальная M вдвое выше средней опубликованной $M = 0,112 \text{ год}^{-1}$, которая была рассчитана по ГСИ [Cooper et al., 2007]. Это может служить очередным доказательством некорректных входных оценок численностей по возрасту рыб ($N_{a,i}$) для модели Синтез, поэтому FSBi, полученный из нее, передан в модель JABBA не точным, а с ошибкой около 5 %.

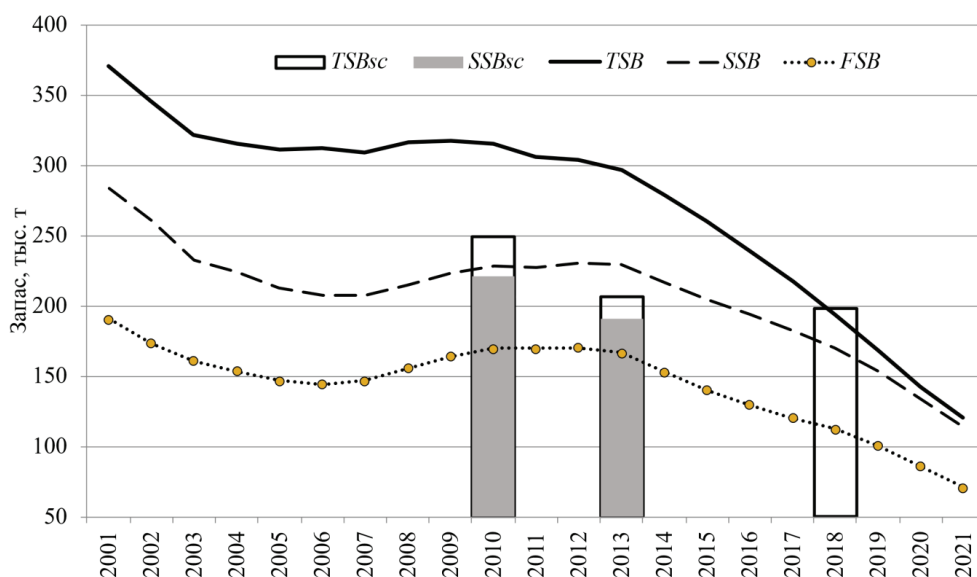


Рис. 3. Динамика из модели Синтез общего (TSB), промыслового (FSB) и нерестового (SSB) запасов черного палтуса на фоне оценок TSB и SSB по научным съемкам ($TSBsc$ и $SSBsc$)

Fig. 3. Dynamics of total stock (TSB), commercial stock (FSB), and spawning stock (SSB) for greenland halibut from the model Синтез compared to those estimated from fishery-independent surveys ($TSBsc$ and $SSBsc$)

Стандартизация CPUE предназначена для усиления связи индекса численности из CPUE с динамикой промыслового запаса посредством фильтрации отклонений,

влияющих на эффективность лова [Maunder, Punt, 2004]. Индекс CPUE может играть более важную роль в настройке модели, чем более редкие оценки биомасс из научных съемок, поэтому необходимо стандартизировать CPUE.

Стандартизации подвергнуты индексы $i2$, FMS и LL, исходя из самой дробной единицы улова. Среди них самой грубой единицей усилия являлись т/судо-сутки в уже агрегированном месячном масштабе, а исходная таблица для стандартизации CPUE по годам для $i2$ не включала никакой дополнительной информации, кроме месяца. Стандартизации $i2$ проведена в логлинейной модели [Quinn, Deriso, 1999] согласно рекомендациям, опубликованным в рецензируемом журнале ИКЕС [Bentley et al., 2012] по формуле

$$\ln(\text{CPUE}_i) = \alpha_{\text{year}_i}^{\text{Year}} + \alpha_{\text{month}_i}^{\text{Month}}, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{year}_i}^{\text{Year}}$ — коэффициент i -го года (year_i) из вектора соответствующих коэффициентов в диагонали матрицы Year, аналогично по месяцам (Month).

Логарифмическая трансформация биологических наблюдений, имеющих только положительные значения (как CPUE), используется давно [Beverton, Holt, 1957] и предлагалась во ВНИРО [Аксютин, 1970] и в ТИНРО для трансформации данных из научных тралений [Волвенко, 1998]. Более сложные трансформации или модели для среднемесячных CPUE по годам нам кажутся избыточными. Учет эффекта месяца в году по формуле (6) позволил снизить дисперсию логлинейной модели на 6,8 % из общей учтенной дисперсии около 12,5 %.

Следующей по дробности исходной информацией являлась стандартизация ССД в FMS с 1997 г., т.е. минимальный масштаб уже не месяц, а сутки для каждого судна. Наш опыт показывает, что в Охотском море большую часть дисперсии при стандартизации CPUE может описывать такой фактор, как код судна [Кулик и др., 2020a]. С этой целью широко используются обобщенные линейные модели (GLM — generalized linear model) с каким-либо распределением из экспоненциального семейства и аддитивной ошибкой [Venables, Ripley, 2002]. Потому мы начали с уже опубликованного варианта стандартизации [Кулик и др., 2020a], но, следуя аналогичному подходу [Кулик и др., 2020b], нашли более оптимальную GAM в пакете «mgcv» [<https://cran.r-project.org/package=mgcv>] для языка программирования R. Оптимальная по информационному критерию Шварца-Байеса (BIC) [Sakamoto et al., 1986] GAM с учетом всех доступных независимых переменных найдена по формуле линейного предиктора (η)

$$\eta_i = \alpha_{\text{year}_i}^{\text{Year}} + \alpha_{\text{idves}_i}^{\text{IdVes}} + f(\text{month}_i | \text{Subzone}_i), \quad (7)$$

где $E(\text{CPUE}_i) = \exp(\eta_i)$, а дисперсия имела степенную связь с математическим ожиданием (μ) в составном распределении Пуассона-Гамма (или Твиди) степенной функцией с параметром p [Jørgensen, 1997] по формуле $\sigma^2 = \text{Var}(\mu) \phi = \mu^p \phi$, где ϕ — коэффициент масштаба дисперсии; $\alpha_{\text{idves}_i}^{\text{IdVes}}$ — коэффициент i -го судна (idves_i) из вектора соответствующих коэффициентов в диагонали матрицы IdVes; f — тонкоплечный регрессионный сплайн (TPC) [Wood, 2003], аппроксимирующий изменения эффективности лова по месяцам (month_i) для каждой промысловой подзоны отдельно (Subzone_i).

Параметр p оценивался вместе с остальными коэффициентами. Если этот параметр приблизился к 2, тогда распределение Твиди можно было бы заменить на распределение Гамма, а если к 1, то Пуассона [Dunn, Smyth, 2005]. В данном случае он найден меньше 2 ($p = 1,96$).

Включение в стандартизацию CPUE кодов (IdVes) или названий судов как факторов является стандартной практикой [Bentley et al., 2012]. Это логично, если вспомнить, что суда одного типа могут значительно различаться оснащенностью и мощностью, а их капитаны и команды опытностью. Наша GAM по FMS объяснила 19,4 % отклонений (в логарифмическом масштабе функции связи), в то время как модель из прошлой публикации [Кулик и др., 2020a] описала только 15,9 % дисперсии с учетом новых CPUE, а модель, не включавшая ничего, кроме фактора лет, объясняла всего 2,9 % дисперсии.

Эффект месяцев по подзонам увязал 3,7 % дисперсии, а коды судов — 11,2 %. В последние 6 лет оценки из GAM значительно ниже аналогичных при стандартизации только по годам, без учета прочих факторов (рис. 4). Следовательно, стандартизация была действительно необходима.

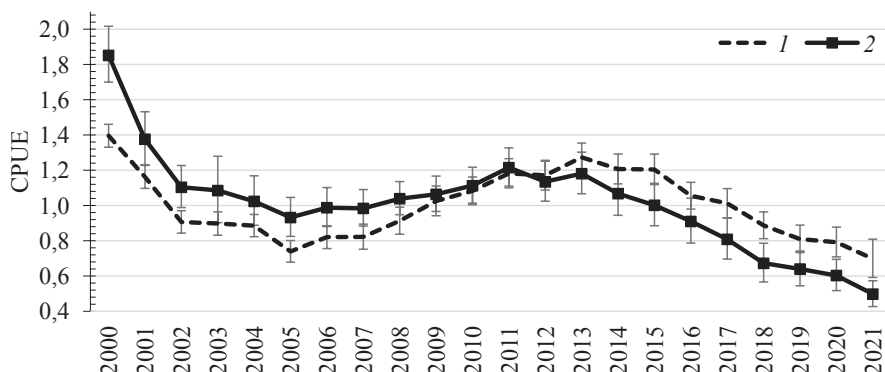


Рис. 4. Безразмерные CPUE черного палтуса в зоне «Охотское море» при стандартизации только по годам (1) и в GAM (2), центрированные средними в масштабе Ln, а затем экспоненцированные. Усы показывают 95 %-ные доверительные интервалы оценок

Fig. 4. Dimensionless CPUE of greenland halibut in the Sea of Okhotsk fishing zone when standardized by years (1) and in GAM (2), centered by averages on the Ln scale, and then exponential. Whiskers show 95 % confidence intervals of the estimates

Самая подробная информация доступна нам из БД «Ярусный промысел» по каждой наблюдаемой операции в килограммах на 1000 крючков. Стандартизация CPUE для LL проведена по следующим независимым переменным.

- LnT — логарифмически трансформированная длительность застоя яруса в часах.
- Year — год как категориальный фактор.
- Month — месяц как категориальный фактор.
- LnH — логарифмически трансформированные глубины в метрах по позициям лова, уточненные из Общей батиметрической карты океанов [The GEBCO_2019 Grid, <http://www.gebco.net>] при их отсутствии.
- months — цифровой порядковый номер месяца в году.
- x — долгота постановки в десятичных географических градусах.
- y — широта постановки в десятичных географических градусах.
- xkm — долгота постановки в универсальной трансверсальной проекции Меркатора для 56-й зоны Северного полушария (UTM56N) на километровой сетке.
- ykm — широта постановки на километровой сетке в UTM56N.

Оптимальной по BIC оказалась GAM по формуле

$$\eta_i = f(\text{LnT}) + \alpha_{\text{year}_i}^{\text{Year}} + f(\text{months}) + f(\text{LnH}) + f(\text{xkm}, \text{ykm}). \quad (8)$$

Оптимизация числа псевдоузлов TPC в GAM проведена методом обобщенной кросс-валидации [Wood, 2004, 2011]. Оптимальное число псевдоузлов TPC для LnH и months искалось в пределах от 1 до 4 во избежание переобучения модели в «mgcv» одновременно с другими параметрами.

Вследствие неравномерного покрытия и малочисленных наблюдений полученный индекс LL достигал 14 % ошибки в логарифмическом масштабе. Это не так сомнительно, как резкие изменения LL, необъяснимые с точки зрения результатов оценки биомассы в модели JABBA (рис. 5).

Входной информацией для новой модели BSPM.stan служили медианы отфильтрованных вероятных уловов и биомассы. Фильтрация сочетаний параметров осуществляется в три этапа. Первый этап — скользящая перекрестная проверка. Она включает отброс тех сочетаний параметров, что при прогнозировании из прошлого на

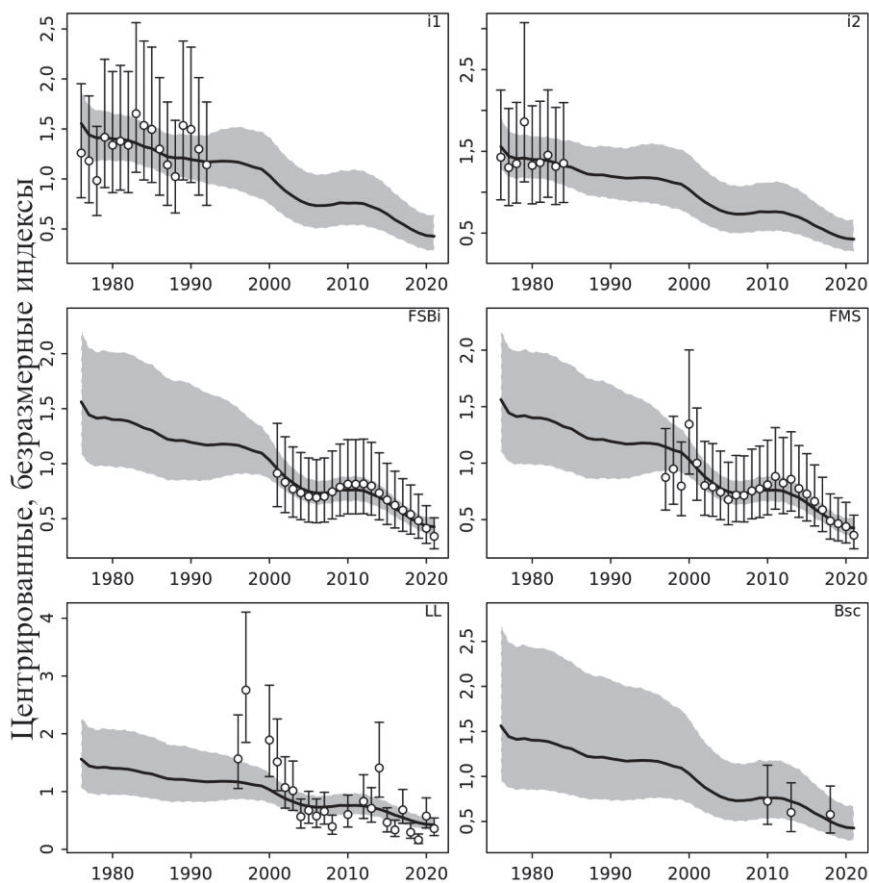


Рис. 5. Относительная динамика биомассы черного палтуса в промысловой зоне «Охотское море» из модели JABBA (черная кривая) с доверительными интервалами (серая заливка) в масштабе коэффициентов центрированных индексов: **i1** — CPUE; **FSBi** — FSB из модели Синтез. Стандартизированные CPUE: **LL** — по данным наблюдателей на ярусном промысле из GAM по формуле (8), **i2** — с учетом месяцев промысла по формуле (6), **FMS** — по данным ССД из GAM по формуле (7) и **Bsc** — из научных донных траловых съемок

Fig. 5. Relative dynamics of the greenland halibut biomass in the Sea of Okhotsk fishing zone from the JABBA model (black curve) with credible intervals (gray shading) in the scale of coefficients of centered indices: **i1** — CPUE; **FSBi** — commercial stock from Sintez model. Standardized CPUE: **LL** — longline fishery observers data processed with GAM (Formula 8), **i2** — the same taking into account the months of fishing (Formula 6), **FMS** — daily catch per vessel data processed with GAM (Formula 7), and **Bsc** — the data of accounting bottom trawl surveys

1 год вперед, начиная с 2014 г., не попадали в межквартильный интервал финальных оценок состояний запаса следующего года. Второй этап включал отброс тех сочетаний параметров, что при прогнозировании из 2014 г. не попадали в межквартильный интервал финальных оценок состояний запаса 2021 г. Наконец мы удаляли сочетания параметров, полученных от уловов, которые оказались меньше официальных, что могло случиться из-за высокого $CV = 30\%$. В новой модели BSPM.stan алгоритм настройки сконфигурирован так, чтобы отсекал сочетания параметров или их цепочки целиком, если они приводят к отрицательным биомассам в перспективе.

Дополнительно к исследованию влияния промысла на динамику запаса черного палтуса мы начнем исследование изменений в окружающей среде. Самой высокой пространственной и временной точностью из непрерывных рядов обладают синтезированные из различных источников оценки температуры поверхности моря (SST — Sea Surface Temperature). Они сохранены в ячейках с разрешением 0,01 географического

градуса по широте и долготе за каждый день четвертого уровня обработки в проекте JPL MUR MEaSURES Project* и извлечены нами для Охотского моря с 2003 по 2021 г. Их помесечное осреднение проведено по рыболовным подзонам в Охотском море и равноплощадным гексагонам при помощи пакета `exactextractr`** для языка R. Размеры гексагонов подобраны таким образом, чтобы было можно провести анализ эмпирических ортогональных функций (ЭОФ [Zhang, Moore, 2015]). Их число должно было быть меньше числа временных срезов (19 лет по 12 месяцев). Такому количеству (менее 228) соответствовала гексагональная сетка разрешения № 7 в пакете `dggridR`*** для языка R. Площадь каждого гексагона составила 23,3 тыс. км² с расстояниями между ними около 151 и 172 км. Выделение главных компонент из ЭОФ проведено в пакете `«wql»`**** для языка R.

Анализ временных рядов проведен как по средним SST по подзонам, так и по компонентам ЭОФ из гексагональной сетки при помощи периодического сезонного разложения локально взвешенной регрессии [Cleveland et al., 1990] согласно рекомендациям в пакете `«fpp3»`***** для языка R.

Оценка значимости линейной тенденции в годовых компонентах средних SST и их ЭОФ проведена с учетом авторегрессии первого порядка, если в ошибках линейной регрессии обнаруживались значимые ($p < 0,05$) по тесту Дарбина-Уотса [Fox, 2016] отклонения от их независимости по времени согласно рекомендациям [Blanchard et al., 2010].

Таким образом, самые точные данные нам доступны только в 21-м веке, а за 20-й век нам придется сделать допущение об аналогичной стационарности параметров. Это не будет способствовать повышению точности наших результатов, но иного пути мы не видим. Однако именно в 21-м веке биомасса черного палтуса в Охотском море резко снизилась, поэтому наш интерес к последней паре десятилетий считаем оправданным.

Результаты и их обсуждение

Вылов является важной управляющей переменной в моделях прибавочной продукции, поэтому перед использованием его вероятных оценок из модели JABBA (рис. 6) мы удалили все те сочетания параметров, которые были найдены при допущении улова ниже официальных, и получили новые оценки медиан вероятных уловов, доступные в приложении за все годы (см. на сайте `Catch.csv`). В итоге оказалось, что в среднем доля потерь уловов в последние годы выше 20 % и растет, а состояние запаса резко ухудшилось в 2017 г. (рис. 7).

Итогом такой фильтрации явились новые оценки медиан биомассы черного палтуса, которые были использованы в нашей новой модели `BSPM.stan` как индекс численности, доступный в приложении (см. на сайте `srue.csv`). Также на сайте доступен скрипт для повторения настройки модели `BSPM.stan`, содержащий стартовые значения параметров и использованную конфигурацию модели в приложении (см. на сайте `start.R`).

Еще до уточнения параметров модели согласно нашей новой методике уже очевидно, что отношение биомассы MSY к приемной емкости (P_{MSY}) не пересекалось

* JPL MUR MEaSURES Project. GHR SST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis Ver. 4.1, PO.DAAC, CA, USA, 2015. doi 10.5067/GHGM-4FJ04.

** Baston D. `exactextractr`: Fast Extraction from Raster Datasets using Polygons. R package version 0.7.2. 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=exactextractr>.

*** Barnes R. and Sahr K. `dggridR`: Discrete Global Grids. R package version 3.0.0. 2021. <https://github.com/r-barnes/dggridR/>.

**** Jassby A.D., Cloern J.E. `wql`: Exploring Water Quality Monitoring Data. R package version 0.4.9. 2017. <https://cran.r-project.org/package=wql>.

***** Hyndman R. `fpp3`: Data for «Forecasting: Principles and Practice» (3rd Edition). 2022. <https://github.com/robjhyndman/fpp3-package>, <https://OTexts.com/fpp3/>.

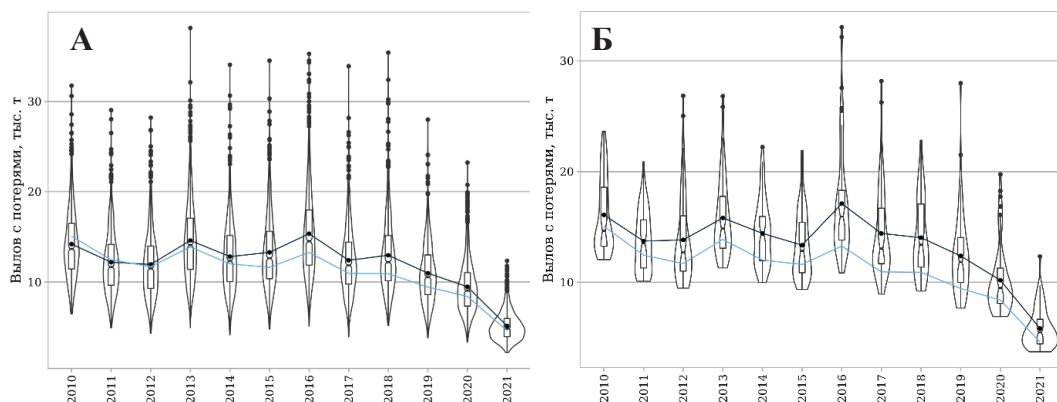


Рис. 6. Распределение вероятных уловов в модели JABBA в виде виолончельных графиков и ящиков по квартилям с усами, в которых черная кривая соединяет средние значения, а синяя показывает заложенный улов с учетом 20 % потерь: **А** — с предварительным учетом 20 % потерь и $CV = 30\%$; **Б** — после удаления из **А** всех уловов менее суммы уловов из ССД

Fig. 6. Distribution of probable catches in JABBA model in the form of violin plots and boxes by quartiles with whiskers. Black curve connects the average values, blue curve shows the catch, considering 20 % losses: **A** — with preliminary allowance for 20 % losses and $CV = 30\%$; **B** — after removal of all daily catches less than the daily sum of catches from the fishery statistics

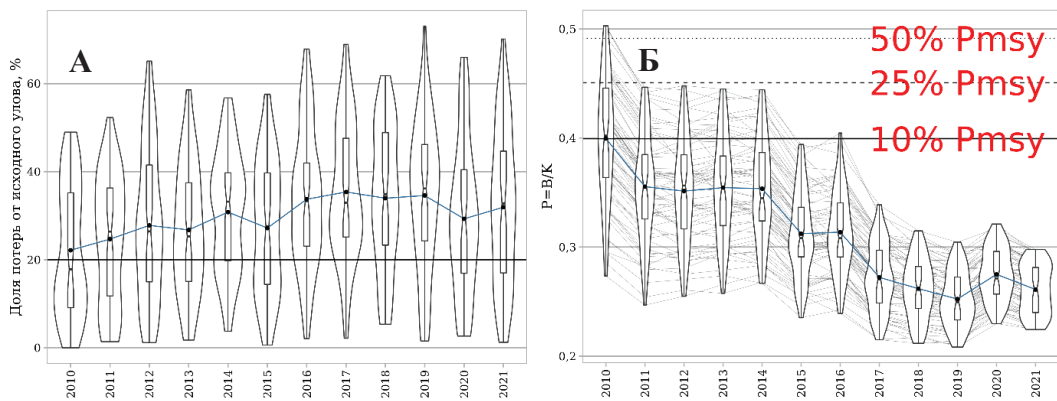


Рис. 7. Распределение вероятных оценок: **А** — потери уловов в процентах от изначально пойманных рыб (потери в 20 % отмечены горизонтальной чертой); **Б** — биомассы (В) в долях от приемной емкости (К). Кривая соединяет средние оценки. Pmsy отмечает перцентили распределения B_{MSY}/K

Fig. 7. Distribution of probable estimates: **A** — loss of catches as a percentage of initially caught fish (losses of 20 % are marked by horizontal line); **B** — biomass (B) relative to the carrying capacity (K). Blue curve connects the average values. Percentiles of the B/K distribution are marked

никакими из всех вероятных значений относительной динамики биомассы ($P = B/K$) черного палтуса с 2011 г., а с 2017 г. отсутствует пересечение любых P с 90 %-ным доверительным интервалом P_{MSY} (рис. 7).

Уточнение параметров модели произведено относительно медиан, найденных в модели JABBA, уловов и биомасс. В итоге удалось очень точно воспроизвести индекс численности в новой программной реализации модели прибавочной продукции BSPM.stan: коэффициент детерминации между входной B из JABBA и выходной $B(CPUE)$ из BSPM.stan достиг 0,9999773 (рис. 8).

Новые оценки параметров BSPM.stan и их доверительные интервалы (CI) показаны в сравнении с таковыми из модели JABBA в табл. 1. Ключевые параметры: уравновешенная биомасса девственного запаса, или приемная емкость (K), и мгновенный коэффициент популяционного роста (r) найдены в более узком доверительном

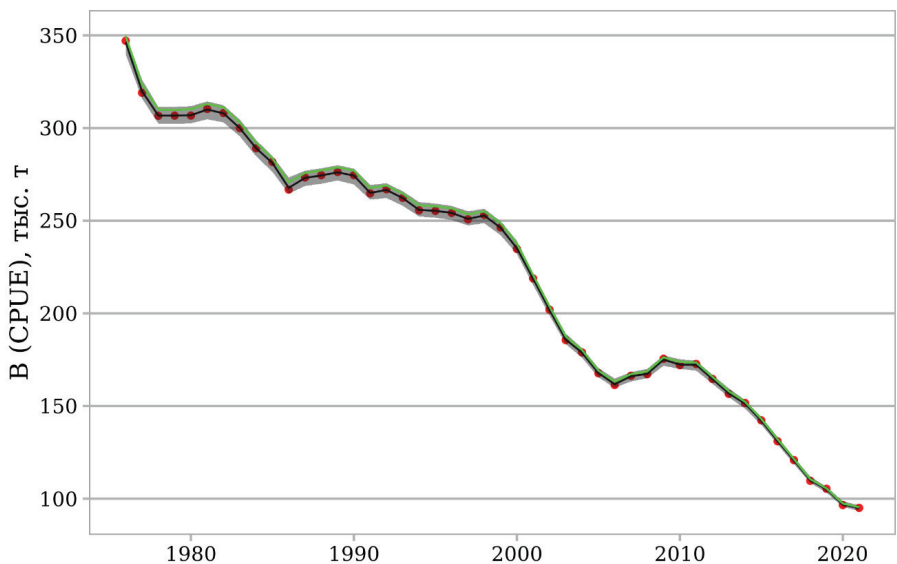


Рис. 8. Медиана оценок B из модели JABBA (зеленая кривая) на фоне 95 %-ного доверительного интервала оценок CPUE из модели BSPM.stan (серая заливка) и их медиан (черная кривая и красные точки)

Fig. 8. Median of B estimates from JABBA model (green curve) on the background of 95 % confidence interval of the CPUE estimates from the new model (gray shading) and their medians (black curve and red dots)

Таблица 1

Оценки параметров из модели JABBA и новой модели (BSPM.stan)

Table 1

Estimates of parameter from JABBA model and new model (BSPM.stan)

Параметр	Модель	Медиана	CI, 2,5 %	CI, 97,5 %
K , тыс.т	JABBA	365,651	263,896	541,623
	BSPM.stan	393,653	324,925	485,928
r	JABBA	0,098	0,063	0,156
	BSPM.stan	0,088	0,062	0,122
$P_{1976} = B_{1976}/K$	JABBA	0,972	0,888	1,060
	BSPM.stan	0,900	0,709	0,994
Ошибка процесса	JABBA	0,053	0,034	0,086
	BSPM.stan	0,0068	0,0026	0,0147
Параметр формы	JABBA	2,042	0,939	4,826
	BSPM.stan	2,375	1,617	3,227
h	BSPM.stan	0,996	0,939	1,069
q	BSPM.stan	1,021	0,718	1,288

интервале, чем ранее, но стартовое в ряду наблюдений соотношение P_{1976} наоборот, стало менее определенным. Однако последующие P становились с каждым годом все более точными (рис. 9). Найденные параметры гиперстабильности (h) и улавливаемости (q) незначительно отличались от единицы. Однако улавливаемость находилась в более широких пределах.

Приемная емкость (K) определяет масштаб биомассы моделей JABBA и BSPM.stan, в которых настройка ведется в относительном масштабе изменений P . Мгновенный коэффициент популяционного роста (r) тесно связан с оптимальным уровнем эксплуатации. Таким образом, получив более определенный, но низкий r , мы также получили и более низкий H_{MSY} . Новые ориентиры сравниваются с полученными ранее в модели JABBA (табл. 2).

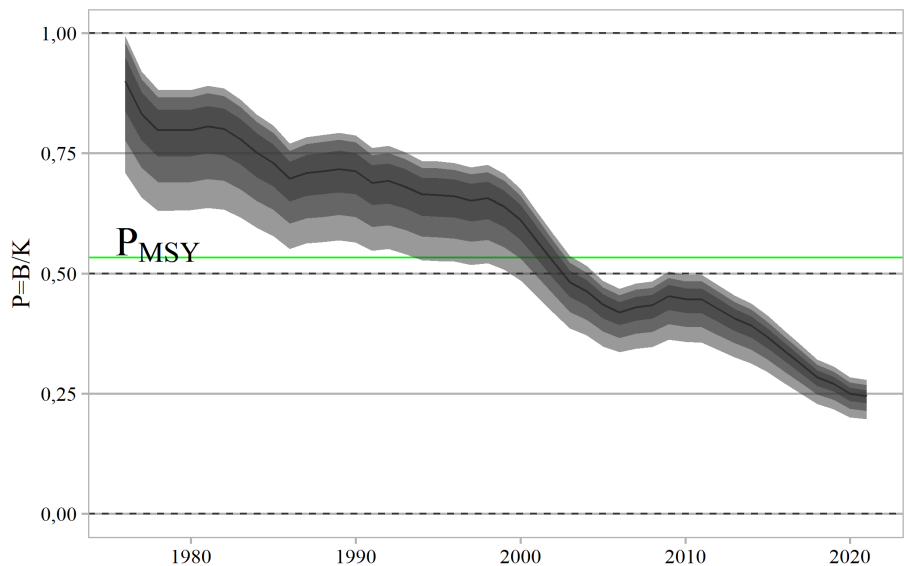


Рис. 9. Медиана оценок состояния запаса черного палтуса в промысловой зоне «Охотское море» в модели BSPM.stan (черная кривая) и ее доверительные интервалы 95 %, 80 и 50 % (показаны серой заливкой различной интенсивности)

Fig. 9. Median estimates of the greenland halibut stock status in the Sea of Okhotsk fishing zone found in the BSPM.stan model (black curve), and its credible intervals of 95 %, 80 and 50 % (gray shading of different intensity)

Таблица 2

Биологические ориентиры управления промыслом черного палтуса в промысловой зоне «Охотское море»

Table 2

Biological reference points for the stock of greenland halibut in the Sea of Okhotsk fishing zone

Ориентир	Модель	Медиана	CI, 2,5 %	CI, 97,5 %
H_{MSY}	JABBA	0,052	0,020	0,108
	BSPM.stan	0,037	0,025	0,054
B_{MSY} , тыс. т	JABBA	181,740	99,572	327,944
	BSPM.stan	209,373	160,093	270,879
MSY, тыс. т	JABBA	9,091	5,550	12,759
	BSPM.stan	7,895	6,091	9,791
B_{2021}/B_{MSY}	JABBA	0,507	0,326	0,771
	BSPM.stan	0,245	0,197	0,279

В результате более точной настройки модели BSPM.stan мы можем утверждать, что биомасса черного палтуса в промысловой зоне «Охотское море» однозначно находится ниже оптимального уровня и с вероятностью 97,5 % эксплуатация запаса находится в состоянии продолжающегося не первый год перелова и состоявшегося перелова в 2021 г. (рис. 10). Взяв за целевые ориентиры MSY-точки, мы можем предложить следующее ПРП (рис. 11). Согласно этому ПРП, минимальный улов в 21-м веке (в 2021 г.) был выше безопасного.

Альтернативные методы определения ОДУ сильно зависят от точности определения возраста рыб. Например, в оценке запаса черного палтуса в восточной части Берингова моря естественная смертность M принята равной $0,112 \text{ год}^{-1}$ по гонадосоматическому индексу (ГСИ) [Cooper et al., 2007]. Идентичная величина $M = 0,112 \text{ год}^{-1}$ получена по предельному возрасту рыбы в 37 лет [Hoenig, 1983], что хорошо согласуется с известной оценкой предельного возраста в 36 лет [Gregg et al., 2006]. Целевой ориентир по промысловой эксплуатации в России для дальневосточного черного палтуса ранее 2017 г. принимался равным половине естественной убыли, но последняя при-

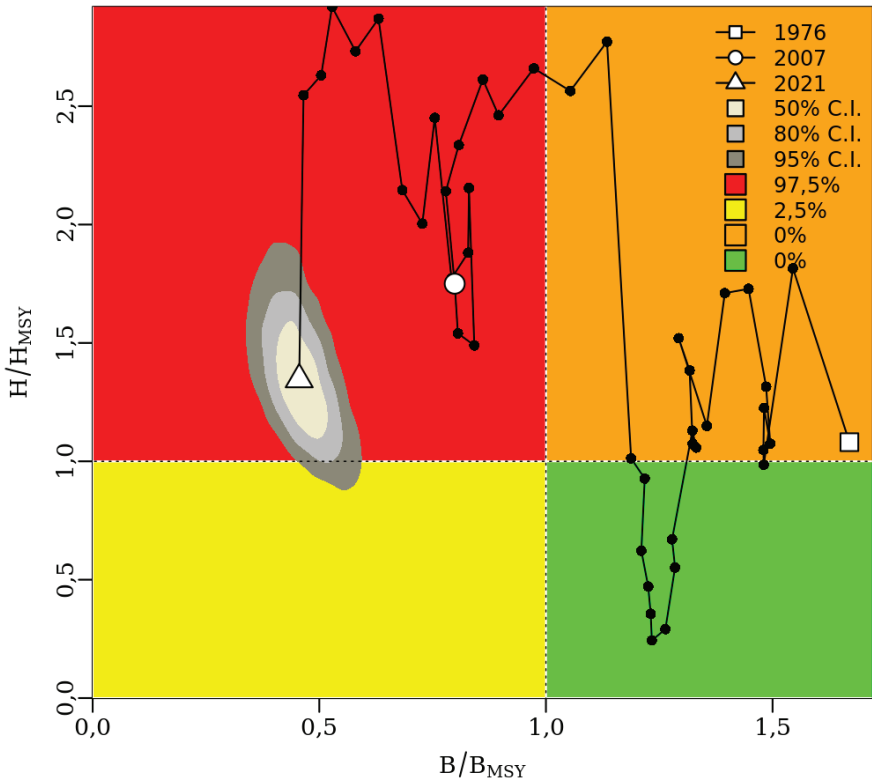


Рис. 10. Состояние запаса и промысла черного палтуса в промысловой зоне «Охотское море», найденное в модели BSPM.stan в 2021 г., а также их медианные оценки в прошлом
Fig. 10. Stock status and state of exploitation for greenland halibut in the Sea of Okhotsk fishing zone in 2021 and its median estimates in the past

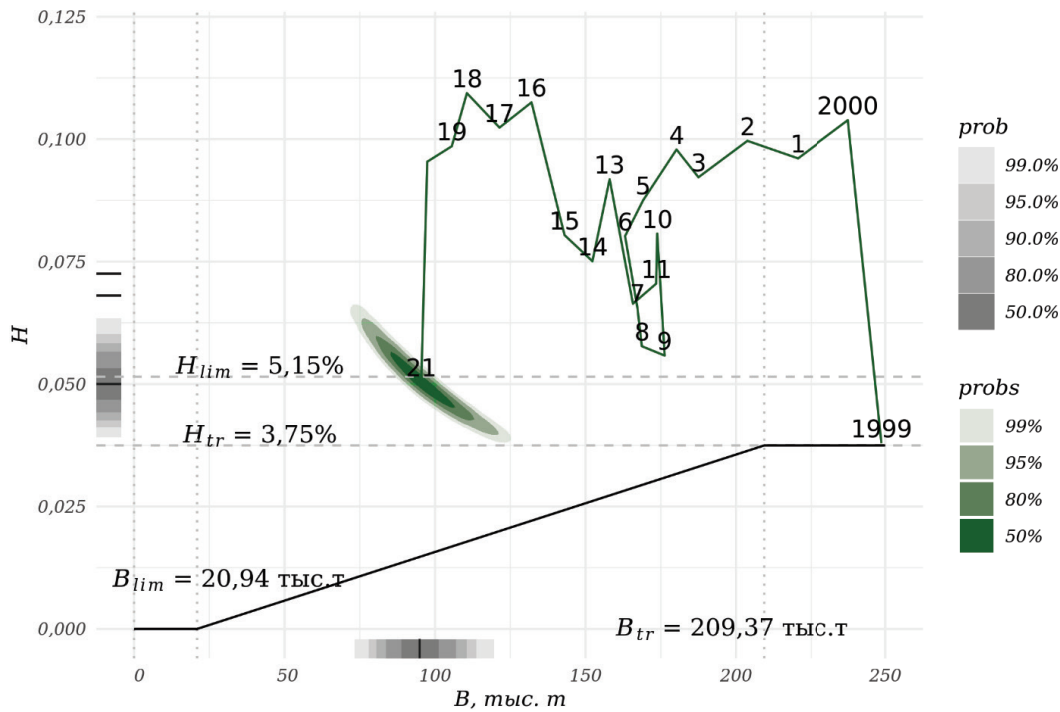


Рис. 11. ПРП черного палтуса в промысловой зоне «Охотское море»
Fig. 11. Harvest control rule for greenland halibut in the Sea of Okhotsk fishing zone

нималась равной 20 %, поэтому H принимали на уровне 10 % для российских частей Охотского и Берингова морей. Согласно идентичным источникам, использованным при обосновании прежнего $H = 10$ %, естественная убыль для рыб с предельным возрастом 35 лет составляет 13 % [Тюрин, 1967], а оптимальный уровень эксплуатации $0,4 \cdot M$ [Alverson, Pereyga, 1969] составит 5,2 %. Если допустить $M = 0,112 \text{ год}^{-1}$ и $F = M/2$, то H находится около 5,15 % после перевода мгновенных коэффициентов в долю по формуле $H = F/Z(1-e^{-Z})$, где $Z = F + M$ [Quinn, Deriso, 1999]. Таким образом, ОДУ в 2018 г., когда промысловый запас оценивался в 3 подзонах в 110,4 тыс. т (см. рис. 1), не должен был превышать 5,7 тыс. т, а только официальный улов (от выпущенной продукции) там превысил 8,3 тыс. т. Следовательно, перелов в тот год уже можно было обнаружить, опираясь на традиционные методы и обновленный ориентир управления промыслом ($H = 5,15$ %, или 5,2 %).

Несмотря на принятую в восточной части Берингова моря $M = 0,112 \text{ год}^{-1}$, целевой ориентир по промысловой эксплуатации черного палтуса там — это $F_{\text{ABC}} = H_{35\%}$ — как аналог H_{MSY} принят на уровне 18 % [Bryan et al., 2020], что в разы выше, чем полученный $H = 5,15$ %. Однако промысел восточноберингоморского черного палтуса управляется относительно нерестового запаса самок, а не общей или промысловой биомассы, и этот запас не оценивается как переловленный.

Используя таблицы к оценке запаса восточноберингоморского черного палтуса [Bryan et al., 2020], можно рассчитать его эксплуатацию относительно общего запаса. Тогда оказывается, что ни $H = 10$ %, ни $H = 5,15$ % по многу лет не превышались, а биомасса все равно снижалась, пока не стабилизировалась около 100 тыс. т в конце наблюдаемого периода. Следовательно, целевой ориентир для общей биомассы черного палтуса должен был бы быть ниже 5,15 %.

Оценки ориентиров управления, взятые по аналогии из других работ, зачастую бывают сильно смещены относительно истинных (в симуляциях), в отличие от внутримодельных оценок, полученных с учетом неопределенности всех параметров модели [Trijoulet et al., 2022], поэтому мы обязаны продолжить уточнение своих внутримодельных ориентиров, а не использовать известные в других частях ареала черного палтуса. Согласно последним материалам ОДУ (на 2023 г.), что западноберингоморский черный палтус, что охотоморский получили целевой ориентир по эксплуатации H_{MSY} найденный по медиане апостериорных оценок в модели JABBA, примерно равный получаемому выше из предельного возраста рыб в 35 лет: медиана $H = 5,2$ % в Охотском море и $H = 5,3$ % в западной части Берингова моря. Однако в обоих случаях 95 %-ные доверительные интервалы полученных оценок H_{MSY} включают традиционный в дальневосточных филиалах ВНИРО $H = 10$ %: от 2,0 до 10,8 % в зоне «Охотское море» и от 2,2 до 15,0 % в зоне Западно-Берингоморской.

Широкие доверительные интервалы затрудняют определение состояния запаса. Следовательно, необходимо провести дополнительное исследование, иначе мы можем допустить неверные выводы о состоянии запаса, что в конечном счете может привести к его коллапсу.

В Международном совете по исследованию моря (ICES, или ИКЕС) H и биомасса рассчитываются для промысловой части черного палтуса крупнее 45 см — Fishable biomass (FB)*. Такой порог соответствует минимальной промысловой длине, хотя он выше, чем порог созревания 50 % самцов. Таким образом, нерестовый запас должен быть выше, а эксплуатация ниже, если вести управление по нерестовому запасу. Эксплуатация должна быть еще ниже, если вести управление по общей биомассе.

Таким образом, применение $H = 10$ % к общей биомассе, как это осуществлялось ранее 2017 г. в дальневосточных филиалах ВНИРО, будет вводить в заблуждение ис-

* ICES, Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) in subareas 1 and 2 (Northeast Arctic) // Report of the ICES Advisory Committee, ICES Advice. 2021. ghl.27.1-2. DOI: 10.17895/ices.advice.8198.

следователей состояния запаса при точном сравнении с запасом в районах ИКЕС, но уже очевидно, что ИКЕС рекомендовал в разы более низкую эксплуатацию черного палтуса там, чем филиалы ВНИРО на Дальнем Востоке России.

Целевой ориентир по H в ИКЕС установлен по результатам множества симуляций, выбран такой, что при его превышении в равновесном состоянии запаса и промысла при среднем пополнении биомасса устремится вниз*. Таким образом, превышение предосторожного целевого ориентира управления $HR_{pa} = 3,5\%$ после 2015 г. могло определить отрицательную тенденцию в динамике FB. ИКЕС приступил к обсуждению мер по снижению HR_{pa} до $2,5\%$ в 2021 г.*

Согласно предосторожному подходу целевой ориентир H может быть занижен с учетом ошибки его определения [Бабаян, 2000]. В нашем случае минимальные H в пределах доверительных интервалов уже находились ниже 3% : минимум в пределах 95% -ного доверительного интервала — $2,0\%$ в Охотском море и $2,2\%$ — в российской части Берингова моря. Целевые ориентиры могут и совпадать с MSY -ориентирами, если они определены достаточно точно и рекомендованы в результате MSE, как это было сделано в ИКЕС. В России состояние запаса тоже может оцениваться относительно MSY -ориентиров, если они совпадают с целевыми. Например, если биомасса (нерестовая или промысловая соответственно на I и II уровне информационного обеспечения) ниже целевой (B_{MSY}) и промысловая смертность (мгновенная F на I уровне или коэффициент эксплуатации H на II уровне) ниже целевой (соответственно F_{MSY} или H_{MSY}), то рекомендуется режим постоянной интенсивности промысла [Бабаян, 2000], а запас считается непереловленным и неподверженным перелову (находящимся в безопасной зоне эксплуатации, или в режиме постоянной интенсивности промысла). Названия остальных состояний зависят от используемого ПРП и диагностических графиков.

Разработка ПРП может быть продолжительной из-за проведения MSE, основанной на операционной модели, которую тоже еще нужно разработать, или отсутствия согласованных административно ориентиров управления. Например, в Комиссии СТО уже более 6 лет ведется разработка ПРП для сайры и более 4 лет — MSE по скумбрии восточной. До сих пор для определения состояния запасов там применяется график Кобе. Этот график включает всего 4 состояния, из которых безопасная зона находится в зеленом квадранте, а самая опасная зона перелова (перелов произошел — $B < B_{MSY}$ — и продолжается — $H > H_{MSY}$) — в красном. В желтом квадранте находится зона произошедшего перелова ($B < B_{MSY}$), но сниженной интенсивности промысла ($H < H_{MSY}$), поэтому этот квадрант называют состоянием восстановления. В оранжевом квадранте находится зона повышенной интенсивности промысла ($H > H_{MSY}$), но отсутствия перелова ($B > B_{MSY}$), или состояния происходящего перелова. Байесовский подход позволяет оценить апостериорные вероятности состояний запаса, в том числе по квадрантам Кобэ, а модель JABBA позволяет отобразить его. Согласно последней оценке в материалах ОДУ на 2023 г., публично представленной на общественные обсуждения в 2022 г., вероятность нахождения опасного состояния запаса черного палтуса в зоне «Охотское море» в 2021 г. превысила 58% (рис. 12).

В связи с этим и крайне низкой оценкой биологически обоснованной величины ОДУ в модели Синтез на 2022–2023 гг. было рекомендовано закрыть специализированный промысел черного палтуса в районах его основных нерестовых скоплений — у западной Камчатки — в 2022 г.

Проведенное здесь исследование подтверждает статус перелова черного палтуса в Охотском море при условии стационарности условий обитания в 21-м веке. Эта стационарность нами проверена далее всего лишь по одному признаку — SST, но SST регулярно наблюдается с высоким разрешением по времени и пространству. Остальные факторы, близкие к более вероятным причинам колебания численности черного

* ICES, Arctic Fisheries Working Group (AFWG). ICES Scientific Reports. 2021. Vol. 3, № 58. DOI: 10.17895/ices.pub.8196.

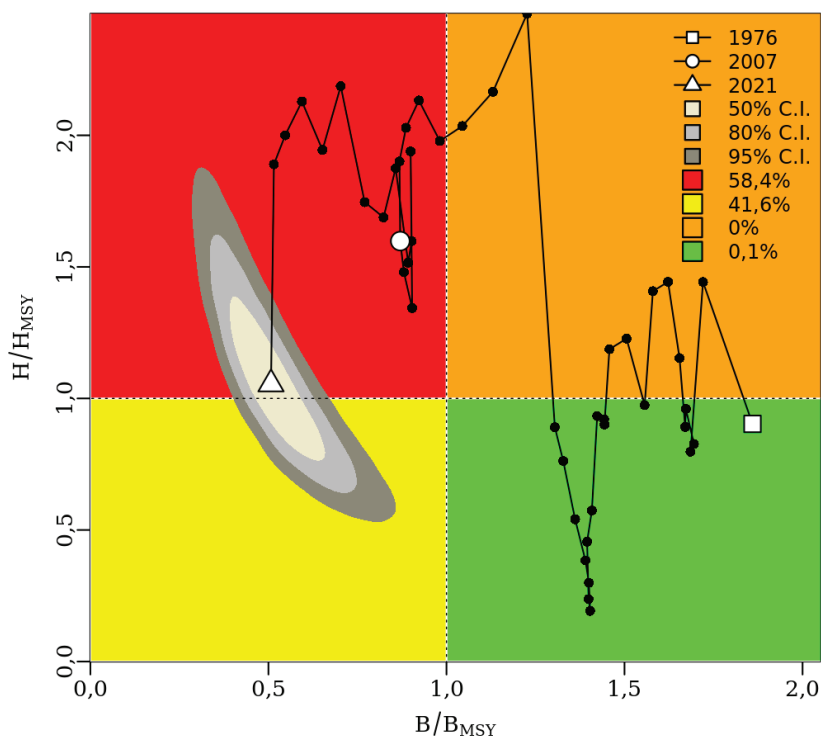


Рис. 12. Оценка состояния запаса и промысла черного палтуса в Охотском море, найденная в модели JABBA, с доверительными интервалами (C.I.) и вероятностями нахождения по квадрантам графика Кобэ и траектория медиан предыдущих оценок, представленная на общественные обсуждения на сайте ТИНРО с 23 марта по 22 апреля 2022 г.

Fig. 12. Stock status (Kobe plot) and its credible intervals (C.I.) for greenland halibut in the Okhotsk Sea found in JABBA model with time series of median B -ratio and H -ratio for 1976–2021 that was available through public auditions in TINRO between March 23 and April 22, 2022

палтуса, например температура воды и прочие гидрологические характеристики у дна, наличие необходимого количества кормовых объектов на разных стадиях жизненного цикла в зоне первых бросков личинок и дальше по мере взросления, а также прочие факторы важны, но наблюдаются эпизодически и не повсеместно либо вообще не наблюдаются. Таким образом, далее исследуется только SST, а остальные факторы должны быть исследованы в последующих работах.

Периодическое сезонное разложение локально взвешенной регрессией (STL) среднемесячных температур по всем подзонам Охотского моря показано ранее (см. на сайте SSTsz.docx). Проверка автокорреляций первого порядка (AR1) в годовых компонентах STL показала, что ее значения по всем подзонам в отдельности высоко значимы ($p < 0,001$) и находятся в пределах от 0,95 до 0,99. Это значит, что в классических линейных моделях без учета автокорреляции нельзя оценивать значимость коэффициента тренда. При помощи метода обобщенных наименьших квадратов мы произвели такую оценку с учетом автокорреляции первого порядка (табл. 3).

Значимые положительные тенденции ($p < 0,05$ и тренд > 0) обнаружены в курильских подзонах и прилегающей к ним Восточно-Сахалинской подзоне, а в остальных подзонах Охотского моря значимых тенденций не обнаружено (табл. 3), несмотря на высоко значимые ($p < 0,001$) и сильные корреляции ($r > 0,9$) среднемесячных SST между собой среди всех рассмотренных подзон. Такое наблюдение хорошо согласуется с выводом об установлении нового режима SST с 2005 г. в Охотском море [Хен и др., 2022]. Однако потепление продолжается лишь в юго-западной части моря, а не во всем море целиком. Северо-восточная часть Охотского моря холоднее юго-западной части,

Таблица 3

Оценки коэффициентов линейного тренда помесечных SST и их статистической значимости по рыболовным подзонам Охотского моря и прилежащих вод

Table 3

Coefficients of linear trends for monthly SST in the Okhotsk Sea and adjacent waters and their statistical significance, by fishing subzones

Код	Район	Тренд	Стандартная ошибка (s.e.)	P, %
610301	Подзона Северо-Курильская Тихоокеанская	0,00451	0,00245	6,7
610302	Подзона Северо-Курильская Охотоморская	0,00587	0,00202	0,4
610401	Подзона Южно-Курильская Тихоокеанская	0,00602	0,00217	0,6
610402	Подзона Южно-Курильская Охотоморская	0,00814	0,00229	0
610501	Подзона Северо-Охотоморская	0,00324	0,00254	20,3
610502	Подзона Западно-Камчатская	-0,00020	0,00224	92,7
610503	Подзона Восточно-Сахалинская	0,00763	0,00205	0
610504	Подзона Камчатско-Курильская	0,00194	0,00272	47,6
615200	Подрайон Центральная часть Охотского моря	0,00431	0,00341	20,8
618200	Зона Япония Охотоморская	0,00932	0,00287	0,1

но во всех подзонах колебания среднемесячных SST так высоки в течение года, что найденные средние значения не имеют статистической значимости (табл. 4).

Таблица 4

Оценки общего смещения линейного тренда помесечных SST и их статистической значимости по рыболовным подзонам Охотского моря и прилежащих вод

Table 4

Estimates of intercepts for linear trends of monthly SST in the Okhotsk Sea and adjacent waters and their statistical significance, by fishing subzones

Код	Район	Смещение	s.e.	p
610301	Подзона Северо-Курильская Тихоокеанская	4,647	14,434	74,8
610302	Подзона Северо-Курильская Охотоморская	3,842	21,741	86,0
610401	Подзона Южно-Курильская Тихоокеанская	6,345	14,877	67,0
610402	Подзона Южно-Курильская Охотоморская	4,873	27,045	85,7
610501	Подзона Северо-Охотоморская	3,293	19,005	86,3
610502	Подзона Западно-Камчатская	2,618	36,937	94,4
610503	Подзона Восточно-Сахалинская	3,943	23,056	86,4
610504	Подзона Камчатско-Курильская	4,493	17,635	79,9
615200	Подрайон Центральная часть Охотского моря	3,826	21,462	85,9
618200	Зона Япония Охотоморская	5,828	36,612	87,4

Разложение ЭОФ позволило рассмотреть максимально различные участки Охотского моря по динамике SST. Выделено 5 мод ЭОФ, которые вместе описывают 99 % дисперсии, хотя даже первой моды ЭОФ (рис. 13) достаточно для описания 96,1 % дисперсии. Остальные 4 компоненты показаны ранее (см. на сайте EOF.docx). Все они действительно имеют различный сезонный и годовой ход амплитуды, а не только различия в пространстве. Тем не менее ни в одной из ЭОФ не было выделено значимых линейных тенденций с учетом AR1, а не учитывать ее нельзя, так как все годовые компоненты амплитуды ЭОФ обладали высоко значимыми значениями теста Дарбина-Уотса. Таким образом, можно заключить, что с 2003 г. в Охотском море изменения SST близки к процессу случайного блуждания и являются стационарными, что снова поддерживает вывод об установлении одного режима SST в Охотском море.

ТИНРО регулярно проводит исследования менее опосредованных факторов среды, чем SST, которая может повлиять на скорость роста только эпипелагической молоди черного палтуса при прочих равных условиях. Гидрохимические и гидробиологические

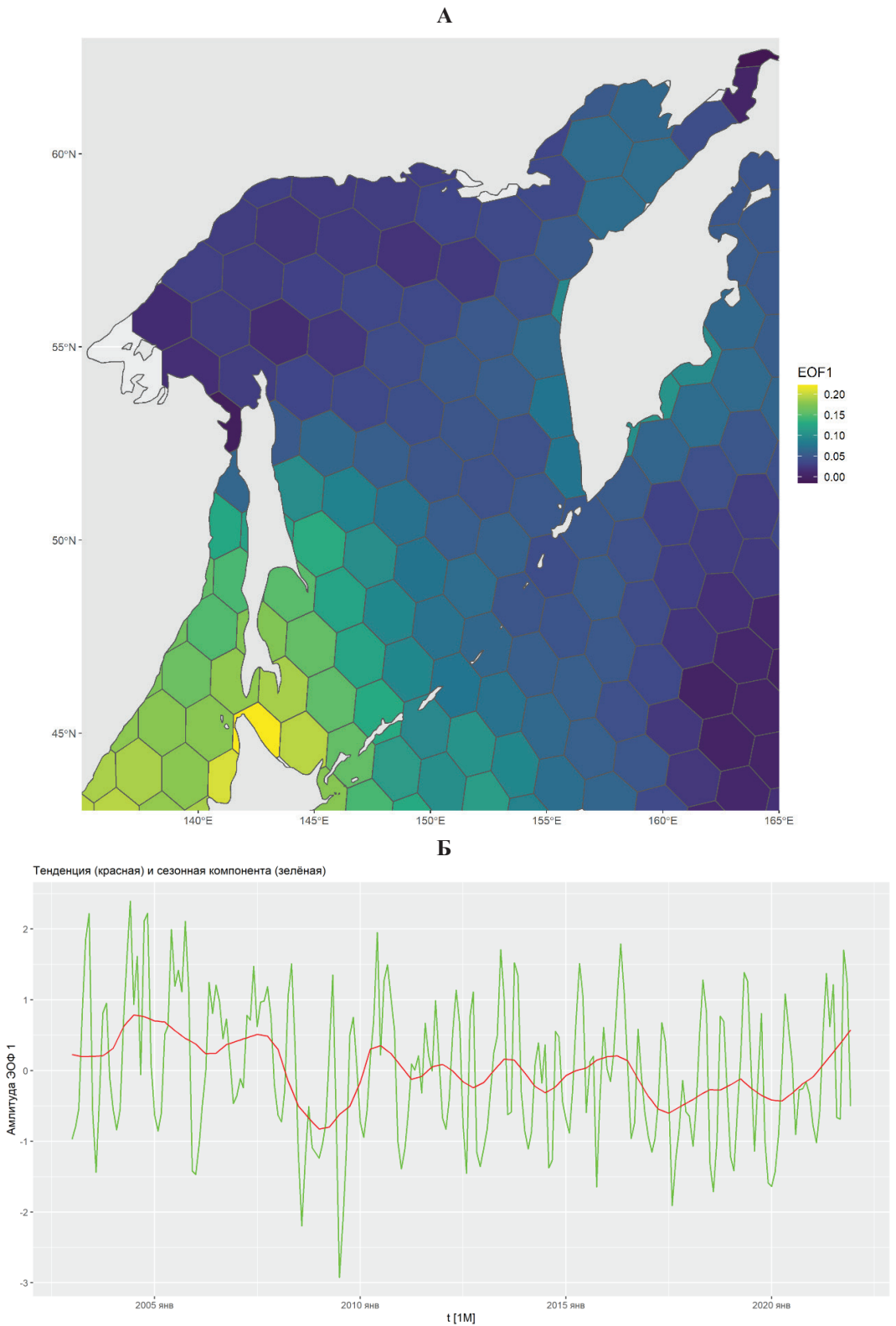


Рис. 13. Пространственная (А) и временная (Б) компоненты SST согласно первой ЭОФ (EOF1)
Fig. 13. Spatial (A) and temporal (Б) components of the first EOF (EOF1) for monthly averaged SST

исследования Охотского моря и его обитателей в ТИНРО могут помочь разобраться в причинах колебания естественной смертности, которая в моделях прибавочной продукции в явном виде отсутствует. Последние работы по оценке содержания кислорода в Охотском море [Зуенко и др., 2021] показали, что есть отрицательная тенденция, особенно в глубинных слоях.

Тогда Ю.И. Зуенко с соавторами [2021] предположили, что такое снижение могло способствовать перераспределению черного палтуса, находящегося на нижней периферии батиметрического диапазона его обитания, но усомнились во влиянии снижения концентраций кислорода в глубинных водах на его выживание [Зуенко и др., 2021]. Считаем такое сомнение оправданным в связи с тем, что молодь черного палтуса опускается сначала из эпипелагических вод, где кислорода в избытке, на шельф, а после взросления из шельфовых, где также дефицита кислорода не найдено, на свал глубин. Следовательно, мы пока не нашли иных причин резкого снижения численности черного палтуса в 21-м веке, кроме промысла.

Заключение

Проведенная фильтрация результатов модели JABBA показала, что запас черного палтуса в промысловой зоне «Охотское море» однозначно переловлен с 2017 г. Вероятность состояния его перелова в 2021 г. составляет около 97,5 % в новой модели, что выше, чем в оригинальной модели JABBA (58,4 %). Уточнение параметров модели JABBA новым методом позволяет утверждать, что траектория оценки состояния запаса вышла за MSY-ориентиры в зону перелова в 2002 г.

Перелов связан с неточным определением возраста черного палтуса по чешуе, что вело к некорректной работе модели Синтез, а также завышенному определению целевого ориентира по промысловой эксплуатации $H = 10\%$ до применения моделей в начале 21-го века. Предлагаем новый ориентир $H_{MSY} = 3,75\%$ в качестве целевого. Он найден по медиане апостериорных распределений в результате уточнения модели JABBA согласно новой модели (BSPM.stan) (см. табл. 2). Его доверительный интервал гораздо уже (от 2,5 до 5,4 %), чем был в модели JABBA (от 2,0 до 10,8 %), что позволяет более точно оценивать состояние запаса черного палтуса в Охотском море.

Начато исследование динамики хорошо наблюдаемого фактора внешней среды (SST). Известно два режимных сдвига SST в Охотском море 1981 и 2005 гг. на фоне положительной линейной тенденции с коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,66$) в масштабах десятилетий [Хен и др., 2022]. За рассмотренный период с 2003 по 2021 г. нами не обнаружено значимых тенденций в модах эмпирических ортогональных функций SST в Охотском море. Единственная подзона в зоне «Охотское море», имеющая значимую положительную тенденцию SST, — Восточно-Сахалинская. Часть запасов черного палтуса, обитающая в подзоне Восточно-Сахалинской, в разы ниже по численности, чем в других подзонах. Таким образом, среди рассмотренных факторов среды (SST и деоксигенезация) мы не нашли виновников резкого сокращения биомассы черного палтуса в 21-м веке. Однако детальные исследования иных факторов среды и за более продолжительный период времени выходят за рамки данной работы. Именно поэтому к данной работе прилагаются все исходные данные и код программы, а также результаты ее настройки. Мы приглашаем гидрологов и гидробиологов воспользоваться ими для проверки новых гипотез о вероятных причинах колебания численности черного палтуса.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают признательность всем участникам научных рейсов и наблюдателям на промысле черного палтуса в Охотском море, чьи материалы использованы для настройки моделей, а также сотрудникам Центра системы мониторинга рыболовства и связи (ЦСМС) и Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) за предоставление доступа к базе данных ОСМ.

The authors express their gratitude to all participants of scientific cruises and observers at the greenland halibut fishery in the Okhotsk Sea, whose materials were used to adjust the models, as well as to the Centre of Fishery Monitoring and Communications and the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences for providing access to the vessel monitoring system.

Финансирование работы (FUNDING)

Оценка состояния запаса черного палтуса в Охотском море проведена в рамках государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00002-21-00 на 2021 г. и на плановый период 2022 и 2023 гг.

The stock state for greenland halibut in the Okhotsk Sea was assessed in the framework of the state task to Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO) No. 076-00002-21-00 for 2021 and for the planned period of 2022 and 2023.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Авторы заявляют, что настоящая работа не содержит собственных экспериментальных данных, полученных с использованием животных или с участием людей. Библиографические ссылки на все использованные данные других авторов оформлены в соответствии с ГОСТом.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

The authors declare that this work does not contain their own experimental data obtained using animals or with the participation of people. Bibliographic references to all used data of other authors are designed in accordance with the state standards of Russia.

The authors declare that they have no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

В.В. Кулик провел обзор методов, настройку и описание моделей GLM и GAM, Синтез, JABBA и новой модели в Stan, И.И. Глебов подготовил обзор оценок биомассы из научных съемок и промысловых показателей, Н.Л. Асеева и Р.Н. Новиков подготовили материалы для настройки моделей. В анализе и обсуждении результатов принимали участие все авторы.

V.V. Kulik conducted a review of the methods, tuning and description of the GLM and GAM models, models Sintez and JABBA, and the new model in Stan. I.I. Glebov prepared a review of biomass estimates on the data of accounting surveys and fishery statistics. N.L. Aseeva and R.N. Novikov prepared materials for setting up the models. All authors took part in analysis and discussion of the results.

Список литературы

Аксютин З.М. Об использовании электронных вычислительных машин для анализа распределения и количественной оценки популяции рыб // Тр. ВНИРО. — 1970. — Т. 71. — С. 309–318.

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

Бабаян В.К., Бобырев А.Е., Булгакова Т.И. и др. Рекомендации по методикам и подходам к оценке приоритетных единиц запасов (треска, минтай, палтус) : моногр. — М. : ВНИРО, 2020. — 281 с.

Бадаев О.З., Шелехов В.А., Черниенко И.С. и др. Определение возраста черного палтуса (*Reinhardtius hippoglossoides matsuurae*) по чешуе и отолитам: методика сбора, обработки, интерпретация // 7-я Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана». — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2022. — С. 23–30.

Белонович О.А., Бурканов В.Н. Влияние косаток (*Orcinus orca*) на ярусный промысел черного палтуса (*Reinhardtius hippoglossoides*) в Охотском море // Морские млекопитающие Голарктики : сб. науч. трудов по мат-лам 7-й Междунар. конф. — 2012. — Т. 1. — С. 86–90.

- Вдовин А.Н.** Динамика уловистости рыб донным тралом в зависимости от размерного состава и плотности скоплений // Изв. ТИНРО. — 2000. — Т. 127. — С. 137–148.
- Волвенко И.В.** Проблемы количественной оценки обилия рыб по данным траловых съемок // Изв. ТИНРО. — 1998. — Т. 124. — С. 473–500.
- Волвенко И.В.** Технические проблемы адекватной интерпретации результатов траловых съемок и пути их решения // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 172. — С. 282–293.
- Дьяков Ю.П.** Популяционная структура тихоокеанского черного палтуса *Reinhardtius hippoglossoides* // Вопр. ихтиол. — 1991. — Т. 31, вып. 3. — С. 404–414.
- Дьяков Ю.П.** Распределение и популяционная структура тихоокеанского черного палтуса // Биол. моря. — 1984. — № 5. — С. 57–60.
- Захаров Е.А., Емелин П.О.** Актуальность использования аппаратуры контроля орудий лова для снижения погрешности в оценке численности гидробионтов // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 186. — С. 198–206. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-186-198-206.
- Захаров Е.А., Кручинин О.Н., Мизюркин М.А., Сафронов В.А.** Геометрические параметры донного трала 27,1/24,4 и возможные погрешности в оценке численности гидробионтов // Изв. ТИНРО. — 2013. — Т. 174. — С. 284–292.
- Захаров Е.А., Кручинин О.Н., Шабельский Д.Л.** Разработка и апробирование алгоритма расчета рабочих параметров траловых систем // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 198. — С. 221–229. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-198-221-229.
- Зуенко Ю.И., Асеева Н.Л., Глебова С.Ю. и др.** Современные изменения в экосистеме Охотского моря (2008–2018 гг.) // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 197. — С. 35–61. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61.
- Зуенко Ю.И., Асеева Н.Л., Матвеев В.И.** Батиметрическое распределение черного палтуса *Reinhardtius hippoglossoides* в условиях деоксигенации промежуточного слоя Охотского моря // Вопр. рыб-ва. — 2021. — Т. 22, № 2. — С. 27–39. DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-2-27-39.
- Ильин О.И., Сергеева Н.П., Варкентин А.И.** Оценка запасов и прогнозирование ОДУ восточнокамчатского минтая (*Theragra chalcogramma*) на основе предосторожного подхода // Тр. ВНИРО. — 2014. — Т. 151. — С. 62–74.
- Кодолов Л.С., Савин А.Б.** Сетной промысел черного палтуса у восточного Сахалина в 1992–1994 гг. : отчет о НИР / ТИНРО. № 21698. — Владивосток, 1994. — 43 с.
- Корнев С.И., Белонович О.А., Никулин С.В.** Косатки (*Orcinus orca*) и промысел черного палтуса (*Reinhardtius hippoglossoides*) в Охотском море // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2014. — Вып. 34. — С. 35–50.
- Коротков В.К.** Реакция рыб на трал, технология их лова : моногр. — Калининград : ЭКБ АО «МАРИНПО», 1998. — 397 с.
- Кулик В.В., Варкентин А.И., Ильин О.И.** Стандартизация уловов на усилие минтая в северной части Охотского моря с учетом некоторых факторов среды // Изв. ТИНРО. — 2020а. — Т. 200, вып. 4. — С. 819–836. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-819-836.
- Кулик В.В., Пранц С.В., Будянский М.В. и др.** Связь запасов черного палтуса в Охотском море с факторами внешней среды // Изв. ТИНРО. — 2020б. — Т. 200, вып. 1. — С. 58–81. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-58-81.
- Кулик В.В., Мазникова О.А.** Оценка запаса черного палтуса в Охотском море с учетом придонной температуры // Океанологические исследования : мат-лы 9-й конф. мол. ученых. — Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2021. — С. 158–163.
- Макрофауна бентали Охотского моря: таблицы встречаемости, численности и биомассы. 1977–2010** / В.П. Шунтов, И.В. Волвенко, В.В. Кулик, Л.Н. Бочаров ; под ред. В.П. Шунтова и Л.Н. Бочарова. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2014. — 1052 с.
- Николенко Л.П.** Сверхстатистические потери черного палтуса (*Reinhardtius hippoglossoides*), равноошипого краба (*Lithodes aequispina*) и краба-стригуна (*Chionoecetes angulatus*) при глубоководном сетном и ярусном промыслах в Охотском море // Вопр. рыб-ва. — 2010. — Т. 11, № 3(43). — С. 592–600.
- Николенко Л.П., Катугин О.Н.** Генетическая дифференциация черного палтуса *Reinhardtius hippoglossoides* в Охотском море и сопредельных водах // Изв. ТИНРО. — 1998. — Т. 124. — С. 251–270.
- Пискунов И.А., Фадеев Н.С.** Возможные уловы, среднесуточные нагрузки различных типов судов и необходимое количество рыболовецкого флота для дальневосточного рыбопромыслового района на 1970–1975 гг. : отчет о НИР / ТИНРО. № 36. — Владивосток, 1976. — 36 с.

Пырков В.Н., Солодилов А.В., Дегай А.Ю. Создание и внедрение новых спутниковых технологий в системе мониторинга рыболовства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12, № 5. — С. 251–262.

Тюрин П.В. Биологические обоснования оптимального коэффициента вылова и допустимого предела прилова молоди ценных рыб // Тр. ВНИРО. — 1967. — Т. 62. — С. 33–50.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Многолетние изменения термических условий на поверхности дальневосточных морей и СЗТО и их связь с крупномасштабными климатическими процессами // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 1. — С. 187–207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207.

Alverson D.L., Pereyra W.T. Demersal fish Exploration in the Northern Pacific Ocean — An evolution of Exploratory Fishing Methods and Analytical Approaches to Stock Size and Yield Forecasts // J. Fish. Res. Bd Canada. — 1969. — Vol. 26, № 8. — P. 1985–2001. DOI: 10.1139/f69-188.

Bannerot S.P., Austin C.B. Using Frequency Distributions of Catch per Unit Effort to Measure Fish-Stock Abundance // Trans. Am. Fish. Soc. — 1983. — Vol. 112, Iss. 5. — P. 608–617. DOI: 10.1577/1548-8659(1983)112<608:UFDOCP>2.0.CO;2.

Bentley N., Kendrick T.H., Starr P.J., Breen P.A. Influence plots and metrics: tools for better understanding fisheries catch-per-unit-effort standardizations // ICES J. Mar. Sci. — 2012. — Vol. 69, Iss. 1. — P. 84–88. DOI: 10.1093/icesjms/fsr174.

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

Blanchard J.L., Coll M., Trenkel V.M. et al. Trend analysis of indicators: a comparison of recent changes in the status of marine ecosystems around the world // ICES J. Mar. Sci. — 2010. — Vol. 67, Iss. 4. — P. 732–744. DOI: 10.1093/icesjms/fsp282.

Brooks E.N., Powers J.E., Cortés E. Analytical reference points for age-structured models: application to data-poor fisheries // ICES J. Mar. Sci. — 2009. — Vol. 67, Iss. 1. — P. 165–175. DOI: 10.1093/icesjms/fsp225.

Brown C.J., Taylor W., Wabnitz C.C.C. et al. Dependency of Queensland and the Great Barrier Reef's tropical fisheries on reef-associated fish // Sci. Rep. — 2020. — Vol. 10. 17801. DOI: 10.1038/s41598-020-74652-2.

Bryan M.D., Barbeaux S.J., Ianelli J. et al. Assessment of the Greenland turbot stock in the Bering Sea and Aleutian Islands : NPFMC Bering Sea and Aleutian Islands SAFE. — North Pacific Fishery Management Council, Anchorage, AK, 2020. — 96 p.

Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E. et al. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess // Journ. of Official Statistics. — 1990. — Vol. 6, Iss. 1. — P. 3–73.

Cooper D.W., Maslenikov K.P., Gunderson D.R. Natural mortality rate, annual fecundity, and maturity at length for Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) from the northeastern Pacific Ocean // Fish. Bull. — 2007. — Vol. 105, Iss. 2. — P. 296–304.

Cury P.M., Fromentin J.-M., Figuet S. et al. Resolving Hjort's dilemma how is recruitment related to spawning stock biomass in marine fish? // Oceanography. — 2014. — Vol. 27, Iss. 4. — P. 42–47. DOI: 10.5670/oceanog.2014.85.

Dunn P.K., Smyth G.K. Series evaluation of Tweedie exponential dispersion model densities // Stat. Comput. — 2005. — Vol. 15, Iss. 4. — P. 267–280. DOI: 10.1007/s11222-005-4070-y.

Fox J. Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models. Third Edition. — Sage Publications, Inc, 2016. — 817 p.

Gregg J.L., Aderl D.M., Kimura D.K. Improving the precision of otolith-based age estimates for Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) with preparation methods adapted for fragile sagittae // Fish. Bull. — 2006. — Vol. 104, Iss. 4. — P. 643–648.

Hastie T., Tibshirani R. Generalized Additive Models : Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, 2014. DOI: 10.1002/9781118445112.stat03141.

Hilborn R. Measuring fisheries management performance // ICES J. Mar. Sci. — 2020. — Vol. 77. — P. 2432–2438.

Hilborn R., Walters C.J. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty. — N.Y. : Chapman and Hall, 1992. — 570 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-3598-0.

Hoenig J. Empirical use of longevity data to estimate mortality rates // Fish. Bull. — 1983. — Vol. 82, Iss. 4. — P. 898–903.

Jiao Y., Smith E.P., O'Reilly R., Orth D.J. Modelling non-stationary natural mortality in catch-at-age models // ICES J. Mar. Sci. — 2012. — Vol. 69, Iss. 1. — P. 105–118. DOI: 10.1093/icesjms/fsr184.

- Jørgensen B.** The Theory of Dispersion Models : Monogr. Stat. Appl. Probab. (Book 76). — L. : Chapman and Hall, 1997. — 256 p.
- Kell L.T., Minto C., Gerritsen H.D.** Evaluation of the skill of length-based indicators to identify stock status and trends // ICES J. Mar. Sci. — 2022. fsac043. DOI: 10.1093/icesjms/fsac043.
- Maunder M.N., Punt A.E.** Standardizing catch and effort data: a review of recent approaches // Fish. Res. — 2004. — Vol. 70, Iss. 2–3. — P. 141–159. DOI: 10.1016/j.fishres.2004.08.002.
- Oshima K., Hashimoto M., Fuji T. et al.** Trial application of JABBA to Pacific saury stock assessment : NPFC-2019-SSC PS05-WP19. — Tokyo, 2019. — 13 p. URL <https://www.npfc.int/trial-application-jabba-pacific-saury-stock-assessment>.
- Ovando D., Free C.M., Jensen O.P., Hilborn R.** A history and evaluation of catch-only stock assessment models // Fish and Fisheries. — 2022. — Vol. 23, Iss. 3. — P. 616–630. DOI: 10.1111/faf.12637.
- Peterson M.J., Mueter F., Hanselman D. et al.** Killer whale (*Orcinus orca*) depredation effects on catch rates of six groundfish species: implications for commercial longline fisheries in Alaska // ICES J. Mar. Sci. — 2013. — Vol. 70, Iss. 6. — P. 1220–1232. DOI: 10.1093/icesjms/fst045.
- Punt A.E.** Refocusing stock assessment in support of policy evaluation // Fisheries for Global Welfare and Environment : 5th World Fisheries Congress. — Terrapub, Tokyo, Japan, 2008. — P. 139–152.
- Punt A.E., Tuck G.N., Day J. et al.** The impact of alternative age-length sampling schemes on the performance of stock assessment methods // Fish. Res. — 2021. — Vol. 238. 105904. DOI: 10.1016/j.fishres.2021.105904.
- Quinn II T.J., Deriso R.B.** Quantitative Fish Dynamics. — N.Y. : Oxford University Press, 1999. — 542 p.
- Sakamoto Y., Ishiguro M., Kitagawa G.** Akaike Information Criterion Statistics : Mathematics and its Applications. — Springer Netherlands, 1986. — 290 p.
- Trijoulet V., Berg C.W., Miller D.C.M. et al.** Turning reference points inside out: comparing MSY reference points estimated inside and outside the assessment model // ICES J. Mar. Sci. — 2022. fsac047. DOI: 10.1093/icesjms/fsac047.
- Venables W.N., Dichmont C.M.** GLMs, GAMs and GLMMs: an overview of theory for applications in fisheries research // Fish. Res. — 2004. — Vol. 70, Iss. 2–3. — P. 319–337. DOI: 10.1016/j.fishres.2004.08.011.
- Winker H., Carvalho F., Kapur M.** JABBA: Just Another Bayesian Biomass Assessment // Fish. Res. — 2018. — Vol. 204. — P. 275–288. DOI: 10.1016/j.fishres.2018.03.010.
- Wood S.N.** Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models // J.R. Statist. Soc. B (Statistical Methodology). — 2011. — Vol. 73, Iss. 1. — P. 3–36. DOI: 10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x.
- Wood S.N.** Generalized Additive Models: An Introduction with R. — N.Y. : Chapman and Hall/CRC, 2017. 2nd ed. — 476 p. DOI: 10.1201/9781315370279.
- Wood S.N.** Stable and Efficient Multiple Smoothing Parameter Estimation for Generalized Additive Models // J. Am. Stat. Assoc. — 2004. — Vol. 99, Iss. 467. — P. 673–686. DOI: 10.1198/016214504000000980.
- Wood S.N.** Thin plate regression splines // J. R. Stat. Soc. Ser. B (Statistical Methodol.). — 2003. — Vol. 65, Iss. 1. — P. 95–114. DOI: 10.1111/1467-9868.00374.
- Zhang Z., Moore J.C.** Empirical Orthogonal Functions // Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change. — Boston : Elsevier, 2015. — P. 161–197.

References

- Aksyutina, Z.M.,** On the use of electronic computers for the analysis of the distribution and quantification of fish populations, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr*, 1970, vol. 71, pp. 309–318.
- 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.
- Babayan, V.K., Bobyrev, A.E., Bulgakova, T.I., Vasiliev, D.A., Ilyin, O.I., Kovalev, Yu.A., Mikhailov, A.I., Mikhchev, A.A., Petukhova, N.G., Safaraliev, I.A., Chetyrkin, A.A., and Sheremetyev, A.D.,** *Rekomendacii po metodikam i podhodam k ocenke prioritetnyh edinic zapasov (treska, mintaj, paltus)* (Recommendations on methods and approaches to the assessment of priority stock units (pacific cod, walleye pollock, halibut)), Moscow: VNIRO, 2020.
- Badaev, O.Z., Shelekhov, V.A., Chernienko, I.S., Ovsyannikova, S.L., and Andreeva, E.N.,** Determination of the age of the black halibut (*Reinhardtius hippoglossoides matsuurae*) by scales

and otoliths: methods of collection, processing, interpretation, in *The 7th International Scientific and Technical Conference «Urgent problems of the World Ocean biological resources development»*, Vladivostok: Dal'rybvtuz, 2022, pp. 23–30.

Belonovich, O. and Burkanov, V., Killer whale (*Orcinus orca*) depredation on the Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) long-line fishery in the Sea of Okhotsk, in *Marine Mammals of the Holarctic: collection of scientific papers after the Seventh International Conference*, Moscow: Marine Mammal Council, 2012, vol. 1, pp. 86–90.

Vdovin, A.N., Dynamics of catching of fishes by bottom trawl in dependence on their sizes and density of congestions, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2000, vol. 127, pp. 137–148.

Volvenko, I.V., Problems in quantitative estimation of fish abundance by trawl sampling, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1998, vol. 124, pp. 473–500.

Volvenko, I.V., Technical problems of adequate interpretation the results of trawl surveys and ways to solve them, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2013, vol. 172, pp. 282–293.

Dyakov, Yu.P., Population structure of the Greenland halibut *Reinhardtius hippoglossoides*, *Vopr. Ikhtiol.*, 1991, vol. 31, no. 3, pp. 404–414.

Dyakov, Yu.P., Distribution and population structure of Pacific black halibut, *Sov. J. Mar. Biol.*, 1984, no. 5, pp. 57–60.

Zakharov, E.A. and Emelin, P.O., Relevance of using the equipment for control of fishing gear to reduce inaccuracy in evaluation of marine organisms abundance, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 186, pp. 198–206. doi 10.26428/1606-9919-2016-186-198-206

Zakharov, E.A., Kruchinin, O.N., Mizurkin, M.A., and Safronov, V.A., Geometric parameters of the bottom trawl 27.1/24.4, and its possible errors in assessment of number of marine organisms, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2013, vol. 174, pp. 284–292.

Zakharov, E.A., Kruchinin, O.N., and Shabelsky, D.L., Development and testing of algorithm for calculation of operating parameters of trawling systems, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 198, pp. 221–229. doi 10.26428/1606-9919-2019-198-221-229

Zuenko, Yu.I., Aseeva, N.L., Glebova, S.Yu., Gostrenko, L.M., Dubinina, A.Yu., Dulepova, E.P., Zolotov, A.O., Loboda, S.V., Lysenko, A.V., Matveev, V.I., Muktepavel, L.S., Ovsyannikov, E.E., Figurkin, A.L., and Shatilina, T.A., Recent changes in the Okhotsk Sea ecosystem (2008–2018), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 197, pp. 35–61. doi 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61

Zuenko, Yu.I., Aseeva, N.L., and Matveev, V.I., Bathymetric distribution of Greenland halibut *Reinhardtius hippoglossoides* in conditions of deoxygenation in the intermediate layer of the Okhotsk Sea, *Vopr. Rybolov.*, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 27–39. doi 10.36038/0234-2774-2021-22-2-27-39

Ilyin, O.I., Sergeeva, N.P., and Varkentin, A.I., East-Kamchatka Walleye Pollock (*Theragra chalcogramma*) Stock and TAC Assessment Based on the Precautionary Approach, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2014, vol. 151, pp. 62–74.

Kodolov, L.S. and Savin, A.B., *Otchet o NIR «Setnoy promysel chernogo paltusa u vostochnogo Sakhalina v 1992–1994 gg.»* (Res. Rep. «Net fishing for black halibut off eastern Sakhalin in 1992–1994»). Available from TINRO, Vladivostok, 1994, no. 21698.

Kornev, S.I., Belonovich, O.A., and Nikulin, S.V., Killer whales (*Orcinus orca*) and Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) fishery in the Sea of Okhotsk, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2014, vol. 34, pp. 35–50.

Korotkov, V.K., The reaction of fish on the trawl, the technology of their fishing. Kaliningrad: AO MARINPO, 1998.

Kulik, V.V., Varkentin, A.I., and Ilyin, O.I., Standardization of CPUE for walleye pollock in the Okhotsk Sea with inclusion of some environmental factors, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 200, no. 4, pp. 819–836. doi 10.26428/1606-9919-2020-200-819-836

Kulik, V.V., Prants, S.V., Budyansky, M.V., Uleysky, M.Y., Fayman, P.A., Glebov, I.I., Glebova, S.Y., and Novikov, R.N., Relationship of the greenland halibut stocks in the Okhotsk sea with environmental factors, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 200, no. 1, pp. 58–81. doi 10.26428/1606-9919-2020-200-58-81

Kulik, V.V. and Maznikova, O.A., Assessment of the stock of Greenland halibut in the Sea of Okhotsk, considering bottom temperature, in *Oceanological research: proceedings of the IX conference of young scientists*, Vladivostok: POI FEB RAS, 2021, pp. 158–163.

Shuntov, V.P., Volvenko, I.V., Kulik, V.V., and Bocharov, L.N., *Makrofauna bentali Okhotskogo morya: tablitsy vstrechaemosti, chislennosti i biomassy. 1977–2010* (Benthic Macrofauna of

the Okhotsk Sea: Occurrence, Abundance, and Biomass. 1977–2010), Shuntov, V.P. and Bocharov, L.N., eds., Vladivostok: TINRO-Tsent, 2014.

Nikolenko, L.P., The losses of Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) and two crab species (*Lithodes aequispina* and *Chionoecetes angulatus*) during deep-sea net and longline fishery in the Okhotsk Sea, *Vopr. Rybolov.*, 2010, vol. 11, no. 3(43), pp. 592–600.

Nikolenko, L.P. and Katugin, O.N., Genetic differentiation of Greenland turbot *Reinhardtius hippoglossoides* in the Okhotsk Sea and adjacent waters, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1998, vol. 124, pp. 251–270.

Piskunov, I.A. and Fadeev, N.S., *Otchet o NIR «Vozmozhnye ulovy, srednesutochnye nagruzki razlichnyh tipov sudov i neobhodimoe kolichestvo ryboloveckogo flota dlya dal'nevostochnogo rybopromyslovogo rajona na 1970–1975 gg.»* (Res. Rep. «Possible catches, average daily loads of various types of vessels and the required number of fishing fleet for the Far Eastern fishing area in 1970–1975»). Available from TINRO, Vladivostok, 1976, no. 36.

Pyrkov, V.N., Solodilov, A.V., and Degaj, A.Yu., Development and implementation of new satellite techniques in the fishery monitoring system, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 5, pp. 251–262.

Tyurin, P.V., Biological justifications for the optimal catch rate and allowable by-catch limit for juveniles of valuable fish, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1967, vol. 62, pp. 33–50.

Khen, G.V., Ustinova, E.I., and Sorokin, Yu.D., Long-term changes in thermal conditions on the surface of the Far-Eastern Seas and North-West Pacific and their relationship with large-scale climate processes, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 1, pp. 187–207. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207

Alverson, D.L. and Pereyra, W.T., Demersal fish Exploration in the Northern Pacific Ocean — An evolution of Exploratory Fishing Methods and Analytical Approaches to Stock Size and Yield Forecasts, *J. Fish. Res. Board Can.*, 1969, vol. 26, no. 8, pp. 1985–2001. doi: 10.1139/f69-188

Bannerot, S.P. and Austin, C.B., Using Frequency Distributions of Catch per Unit Effort to Measure Fish-Stock Abundance, *Trans. Am. Fish. Soc.*, 1983, vol. 112, no. 5, pp. 608–617. doi 10.1577/1548-8659(1983)112<608:UFDOCP>2.0.CO;2

Bentley, N., Kendrick, T.H., Starr, P.J., and Breen, P.A., Influence plots and metrics: tools for better understanding fisheries catch-per-unit-effort standardizations, *ICES J. Mar. Sci.*, 2011, vol. 69, no. 1, pp. 84–88. doi 10.1093/icesjms/fsr174

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

Blanchard, J.L., Coll, M., Trenkel, V.M., Vergnon, R., Yemane, D., Jouffre, D., Link, J.S., and Shin, Y.J., Trend analysis of indicators: a comparison of recent changes in the status of marine ecosystems around the world, *ICES J. Mar. Sci.*, 2010, vol. 67, no. 4, pp. 732–744. doi 10.1093/icesjms/fsp282

Brooks, E.N., Powers, J.E., and Cortés, E., Analytical reference points for age-structured models: application to data-poor fisheries, *ICES J. Mar. Sci.*, 2009, vol. 67, no. 1, pp. 165–175. doi 10.1093/icesjms/fsp225

Brown, C.J., Taylor, W., Wabnitz, C.C.C., and Connolly, R.M., Dependency of Queensland and the Great Barrier Reef's tropical fisheries on reef-associated fish, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, 17801. doi 10.1038/s41598-020-74652-2

Bryan, M.D., Barbeaux, S.J., Ianelli, J., Zador, S., and Hoff, J., Assessment of the Greenland turbot stock in the Bering Sea and Aleutian Islands, *Stock assessment and fishery evaluation document for groundfish resources in the Bering Sea/Aleutian Islands region as projected for 2019. Section 5*, North Pacific Fishery Management Council, Anchorage, AK, 2020.

Cleveland, R.B., Cleveland, W.S., McRae, J.E., and Terpenning, I., STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess, *Jour. of Official Statistics*, 1990, vol. 6, no. 1, pp. 3–73.

Cooper, D.W., Maslenikov, K.P., and Gunderson, D.R., Natural mortality rate, annual fecundity, and maturity at length for Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) from the northeastern Pacific Ocean, *Fish. Bull.*, 2007, vol. 105, no. 2, pp. 296–304.

Cury, P.M., Fromentin, J.-M., Figuet, S., and Bonhommeau, S., Resolving Hjort's dilemma how is recruitment related to spawning stock biomass in marine fish?, *Oceanography*, 2014, vol. 27, no. 4, pp. 42–47. doi 10.5670/oceanog.2014.85

Dunn, P.K. and Smyth, G.K., Series evaluation of Tweedie exponential dispersion model densities, *Stat. Comput.*, 2005, vol. 15, no. 4, pp. 267–280. doi 10.1007/s11222-005-4070-y

- Fox, J.**, *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models*, Third Edition, Sage Publications, Inc, 2016.
- Gregg, J.L., Anderl, D.M., and Kimura, D.K.**, Improving the precision of otolith-based age estimates for Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) with preparation methods adapted for fragile sagittae, *Fish. Bull.*, 2006, vol. 104, no. 4, pp. 643–648.
- Hastie, T. and Tibshirani, R.**, *Generalized Additive Models*, *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 2014. doi 10.1002/9781118445112.stat03141
- Hilborn, R.**, Measuring fisheries management performance, *ICES J. Mar. Sci.*, 2020, vol. 77, pp. 2432–2438.
- Hilborn, R. and Walters, C.J.**, *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics, and Uncertainty*, New York: Chapman and Hall, 1992. doi 10.1007/978-1-4615-3598-0
- Hoenig, J.**, Empirical use of longevity data to estimate mortality rates, *Fish. Bull.*, 1983, vol. 82, no. 4, pp. 898–903.
- Jiao, Y., Smith, E.P., O'Reilly, R., and Orth, D.J.**, Modelling non-stationary natural mortality in catch-at-age models, *ICES J. Mar. Sci.*, 2012, vol. 69, no. 1, pp. 105–118. doi 10.1093/icesjms/fsr184
- Jørgensen, B.**, *The Theory of Dispersion Models: Monogr. Stat. Appl. Probab. (Book 76)*, London: Chapman and Hall, 1997.
- Kell, L.T., Minto, C., and Gerritsen, H.D.**, Evaluation of the skill of length-based indicators to identify stock status and trends, *ICES J. Mar. Sci.*, 2022, fsac043, doi 10.1093/icesjms/fsac043
- Maunder, M.N. and Punt, A.E.**, Standardizing catch and effort data: a review of recent approaches, *Fish. Res.*, 2004, vol. 70, no. 2–3, pp. 141–159. doi 10.1016/j.fishres.2004.08.002
- Oshima, K., Hashimoto, M., Fuji, T., and Nakayama, S.-I.**, Trial application of JABBA to Pacific saury stock assessment, *NPFC-2019-SSC PS05-WP19*, Tokyo, 2019. URL <https://www.npfc.int/trial-application-jabba-pacific-saury-stock-assessment>
- Ovando, D., Free, C. M., Jensen, O.P., and Hilborn, R.**, A history and evaluation of catch-only stock assessment models, *Fish and Fisheries*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 616–630. doi 10.1111/faf.12637
- Peterson, M.J., Mueter, F., Hanselman, D., Lunsford, C., Matkin, C., and Fearnbach, H.**, Killer whale (*Orcinus orca*) depredation effects on catch rates of six groundfish species: implications for commercial longline fisheries in Alaska, *ICES J. Mar. Sci.*, 2013, vol. 70, no. 6, pp. 1220–1232, doi 10.1093/icesjms/fst045
- Punt, A.E.**, Refocusing stock assessment in support of policy evaluation, *Fisheries for Global Welfare and Environment*, 5th World Fisheries Congress, Terrapub, Tokyo, Japan, 2008, pp. 139–152.
- Punt, A.E., Tuck, G.N., Day, J., Burch, P., Thomson, R.B., and Bessell-Browne, P.**, The impact of alternative age-length sampling schemes on the performance of stock assessment methods, *Fish. Res.*, 2021, vol. 238, 105904, doi 10.1016/j.fishres.2021.105904
- Quinn II, T.J. and Deriso, R.B.**, *Quantitative Fish Dynamics*, New York: Oxford Univ. Press, 1999.
- Sakamoto, Y., Ishiguro, M., and Kitagawa, G.**, Akaike Information Criterion Statistics, *Mathematics and its Applications*, Springer Netherlands, 1986.
- Trijoulet, V., Berg, C.W., Miller, D.C.M., Nielsen, A., Rindorf, A., and Albertsen, C.M.**, Turning reference points inside out: comparing MSY reference points estimated inside and outside the assessment model, *ICES J. Mar. Sci.*, 2022, fsac047. doi 10.1093/icesjms/fsac047
- Venables, W.N. and Dichmont, C.M.**, GLMs, GAMs and GLMMs: an overview of theory for applications in fisheries research, *Fish. Res.*, 2004, vol. 70, no. 2–3, pp. 319–337. doi 10.1016/j.fishres.2004.08.011
- Winker, H., Carvalho, F., and Kapur, M.**, JABBA: Just Another Bayesian Biomass Assessment, *Fish. Res.*, 2018, vol. 204, pp. 275–288. doi 10.1016/j.fishres.2018.03.010
- Wood, S.N.**, Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models, *J. R. Statist. Soc. B (Statistical Methodology)*, 2011, vol. 73, no. 1, pp. 3–36. doi 10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x
- Wood, S.N.**, *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, New York: Chapman and Hall/CRC, 2017, second edition. doi 10.1201/9781315370279
- Wood, S.N.**, Stable and Efficient Multiple Smoothing Parameter Estimation for Generalized Additive Models, *J. Am. Stat. Assoc.*, 2004, vol. 99, no. 467, pp. 673–686. doi 10.1198/016214504000000980
- Wood, S.N.**, Thin plate regression splines, *J. R. Statist. Soc. B (Statistical Methodology)*, 2003, vol. 65, no. 1, pp. 95–114. doi 10.1111/1467-9868.00374
- Zhang, Z. and Moore, J.C.**, Empirical Orthogonal Functions, in *Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change*, Boston: Elsevier, 2015, pp. 161–197.

Stan Development Team, *Stan Modeling Language Users Guide and Reference Manual*, 2022, StanHeaders version 2.21.0-7. <https://mc-stan.org>. Cited January 27, 2022.

R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022, version 4.1.3. <https://www.R-project.org/>. Cited January 27, 2022.

Stan Development Team. *RStan: the R interface to Stan*, 2022, R package version 2.21.3. <https://mc-stan.org>. Cited January 27, 2022.

Svidetel'stvo № 6393 ot 01.08.2000 g. o registratsii v Gosudarstvennom registre bazy dannykh za № 0220006764 «Promysel» (Certificate No. 6393 dated August 1, 2000 on registration in the State Register of the database No. 0220006764 "Promisel").

Svidetel'stvo № 2017620882 ot 11.08.2017 g. o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh «Yarusnyy promysel» (Certificate No. 2017620882 dated August 11, 2017 on state registration of the Longline Fishery database).

JPL MUR MEaSURES Project, *GHRST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis Ver. 4.1*, PO.DAAC, CA, USA, 2015. doi 10.5067/GHGMR-4FJ04

Baston, D., *exactextractr: Fast Extraction from Raster Datasets using Polygons*, R package version 0.7.2, 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=exactextractr>. Cited January 27, 2022.

Barnes, R. and Sahr, K., *dggridR: Discrete Global Grids*, R package version 3.0.0, 2021. <https://github.com/r-barnes/dggridR/>. Cited January 27, 2022.

Jassby, A.D. and Cloern, J.E., *wql: Exploring Water Quality Monitoring Data*, R package version 0.4.9, 2017. <https://cran.r-project.org/package=wql>. Cited January 27, 2022.

Hyndman, R., *fpp3: Data for "Forecasting: Principles and Practice" (3rd Edition)*, 2022. <https://github.com/robjhyndman/fpp3-package>, <https://OTexts.com/fpp3/>. Cited January 27, 2022.

ICES, Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) in subareas 1 and 2 (Northeast Arctic), *Report of the ICES Advisory Committee, ICES Advice*, 2021, ghl.27.1-2. doi 10.17895/ices.advice.8198

ICES, Arctic Fisheries Working Group (AFWG), *ICES Scientific Reports*, 2021, vol. 3, no. 58. doi 10.17895/ices.pub.8196

Поступила в редакцию 21.04.2022 г.

После доработки 19.05.2022 г.

Принята к публикации 20.05.2022 г.

The article was submitted 21.04.2022; approved after reviewing 19.05.2022;
accepted for publication 20.05.2022