

## Моделирование запаса черноморско-азовской проходной сельди в условиях низкой информационной обеспеченности (2004-2020 годы)

DOI

**Козоброд И.Д.** – заведующая лабораторией проходных и полупроходных рыб;

**Пятинский М.М.** – руководитель группы математического моделирования и прогноза;

**Рыбаков И.В.** – специалист группы геоинформационных технологий –

Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»)

@ kuznecovainna1811@yandex.ru

### Ключевые слова:

черноморско-азовская проходная сельдь, запас, популяция, продукционное моделирование, Азово-Черноморский бассейн

### Keywords:

pontic shad, stock, population, production modeling, Azov-Black Sea basin

### STOCK ASSESSMENT OF AZOV-BLACK SEA ANADROMOUS PONTIC SHAD IN TERMS OF DATA LACKING (2004-2020)

**Kozobrod I.D.** – Head of the laboratory of passing and semi-passing fish;

**Piatinskii M.M.** – math modeling & forecasting group chief;

**Rybakov I.V.** – Specialist of Geoinformation Technologies Group – Azov-Black Sea Branch of VNIRO Federal State Budgetary Institution (AzNIIRH)

The population biomass, fishing mortality dynamics and reference points of the rational exploitation of the Black-Azov sea shad during the period 2004-2020 were evaluated using the JABBA surplus production model in “catch-only” version. IUU estimation and preliminary parametrization by CMSY model was performed to improve assessment accuracy. According to the model output, during the 2004-2020 period shad stock biomass was in interval 1315-1341 t, fishing mortality in range 0,03-0,38. During the implementation and review of model results there was 3 period of shad stock status identified: 2004-2009 – the period of moderate shad stock recovery (from 1315 tons to 3347 tons), 2010-2013 – the period of stable stock status (at the level of 3300-3400 tons), 2014-2020 – the period of moderate reduction of the fishing stock biomass (from 3353 tons to 1791 tons). The moderate reduction of the fishing stock biomass in period 2014-2020 is due to a moderate increase in the level of fishing mortality. Currently, since 2018, there was a moderate trend of increasing fishing mortality above the level of target exploitation, leads to moderate reduction in the stock biomass (in 2020 falls below the target exploitation first time). According to the authors, one of the main reason of human activity, that leads to shad stock biomass reduction is a IUU fisheries. Authors note that there are actions required to annihilate the illegal, unregistered and unreported fisheries of the Black-Azov sea shad.

### ВВЕДЕНИЕ

Черноморско-азовская проходная сельдь *Alosa immaculata* (Bennett, 1835) – представитель проходных рыб Азово-Черномор-

ского бассейна, где выделяют 2 популяции сельди, в зависимости от мест ее нереста, – в р. Дон (Донская популяция) и в р. Дунай (Дунайская попу-

ляция) [4]. Данное исследование выполнено для Донской популяции. Основной промысел донской сельди осуществляется в двух промысловых районах: в Керченском проливе – на путях нерестовой и зимовальной миграций через Азовское море в р. Дон (февраль-март и октябрь-ноябрь) ставными неводами и другими прибрежными сетными орудиями лова; и с апреля по июнь в р. Дон – закидными неводами [2; 20].

Численность и биомасса сельди зависят от ряда абиотических и биотических факторов среды. Основными определяющими факторами являются: условия зимовки в Черном море; количество производителей, достигших мест нереста; величина весеннего разлива р. Дон; скорости течения, которые обеспечивают выживаемость икры сельди; температура и соленость воды; промысловая нагрузка. [11; 20].

Промысел сельди до конца 1990-х гг. осуществлялся целевыми орудиями лова – ставными сельдевыми неводами. После запрета на вылов сельди в 1998 г. и возобновление промысла в 2004 г., уловы сельди стали носить характер приловов в прибрежные орудия лова – ставные и закидные невода, вентеря, сетные орудия лова [15].

Исторически оценка запаса сельди выполнялась при помощи метода прямого учета [1], по результатам учетной траловой съемки в Азовском море в летний и осенний периоды [7]. В настоящее время (начиная с 2019 г.) оценка запаса выполняется при помощи аналитических методов, рекомендованных институтом ФГБНУ «ВНИРО» [3].

В период до зарегулирования стока р. Дон (1930-1950 гг.) биомасса сельди составляла от 9,54 до 19,2 тыс. т [7; 15].

После строительства и введения в эксплуатацию Цимлянского гидроузла в 1952 г., произошло перераспределение годового стока в р. Дон: сократился объем водного стока в весеннее время, снизились скорости течения, что привело к массовой гибели икры сельди, которая опускалась в придонные слои и погибала, не давая значительного пополнения. В результате, в указанный период, наблюдается резкое сокращение запаса сельди до 2,1-5,6 тыс. т [12].

В 1970-1980 гг., в связи со строительством каскада низконапорных гидроузлов, запас сельди продолжил сокращаться. Биомасса в среднем за период составила 0,46 тонн. [2].

В 1994 г. запас сельди достиг абсолютного минимума и составил 0,15 тонн. В этот же год был введен запрет на промышленный лов сельди вплоть до 1996 г. [6; 8]. В последующий за запретным периодом год запаса сельди не удалось восстановиться и запрет специализированного промысла был продлен на период 1998-2004 гг. [7].

После возобновления промысла в 2004 г., в период 2007-2014 гг. наблюдалось постепенное увеличение объема общего годового вылова и умеренное восстановление запаса до уровня 3,2 тыс. т [7]. Стоит отметить, что сельдь – один из немногих видов, восстановивших свои запасы без искусственного воспроизводства [6; 15].

В период 2014-2018 гг. промысловый запас сельди умеренно уменьшился за счет ряда факторов:

Выполнена оценка динамики биомассы промыслового запаса, промысловой смертности и ориентиров рациональной эксплуатации черноморско-азовской сельди, в период 2004-2020 гг., при помощи продукционной модели JABBA в варианте «catch-only». Для более точной оценки динамики популяции было выполнено косвенное оценивание объемов ННН-добычи и предварительный поиск параметров модели при помощи упрощенной продукционной модели CMSY. По результатам моделирования, в период 2004-2020 гг., промысловый запас сельди составлял от 1315 до 3411 т, промысловая смертность варьировала в пределах 0,03-0,38. В ходе рассмотрения результатов моделирования выделено три периода состояния запаса сельди: 2004-2009 гг. – период постепенного восстановления промыслового запаса (с 1315 т до 3347 т); 2010-2013 гг. – период стабильного состояния промыслового запаса (на уровне 3300-3400 т); 2014-2020 гг. – период постепенного сокращения промыслового запаса (с 3353 т до 1791 т). Постепенное сокращение промыслового запаса, в период 2014-2020 гг., обусловлено постепенным увеличением уровня промысловой смертности. В настоящее время, начиная с 2018 гг., отмечен умеренный тренд нарастания промысловой смертности выше целевого ориентира эксплуатации и постепенное сокращение биомассы запаса, которая в 2020 г. впервые опустилась ниже целевого уровня эксплуатации. Одной из основных причин антропогенного характера, негативно влияющей на биомассу запаса сельди, по мнению авторов, являются объемы ННН-добычи. Авторы отмечают необходимость борьбы с незаконным, несообщенным и нерегистрируемым промыслом черноморско-азовской сельди.

**Ключевые слова:** черноморско-азовская проходная сельдь, запас, популяция, продукционное моделирование, Азово-Черноморский бассейн

низкий весенний водный сток, увеличение солености Азовского моря и Таганрогского залива, сокращение нагульных площадей молоди. В результате, в эти годы (кроме 2018 г. [7]) наблюдались неурожайные пополнения сельди. По результатам оценки прямыми методами учета, промысловая биомасса сельди в 2021 г. составляла 2,5 тонн.

Основная цель работы – выполнение оценки промыслового запаса, промысловой смертности и целевых ориентиров эксплуатации популяции черноморско-азовской проходной сельди, по имеющимся данным в современный период в условиях недостаточности информационного обеспечения, при помощи методов математического моделирования.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения популяционного моделирования оценки биомассы запаса, промысловой смертности и биологических ориентиров использовались методы продукционного моделирования [26; 31], реализованные в современных программно-аппаратных комплексах в среде R [30]. Выбор в пользу ограниченных (упрощенных) продукци-

онных моделей был обусловлен полнотой и обилием информационного обеспечения о популяции черноморско-азовской сельди. Когортные методы моделирования оказались не применимы по причине отсутствия непрерывных рядов данных из промысловых орудий лова – возрастной структуры, средней навески по возрастам из уловов и других данных. Применение полноценных продукционных моделей оказалось затруднительным по причине сложности стандартизации параметров уловистости различных орудий лова и индексов улова на единицу промыслового усилия. Высокая степень неопределенности ННН-добычи сделала затруднительным применение любых аналитических и статистических методов, основанных на информации о величинах промысловых уловов.

Для решения проблемы высокой неопределенности в величинах суммарного годового промыслового изъятия применена методика косвенной оценки ННН-добычи [16; 17; 29; 33], ранее опубликованная авторами этой работы [18]. Выполнена оценка корректировочного коэффициента ННН-промысла –  $k$ . Данный коэффициент является поправочным коэффициентом к величинам официального вылова, позволяет косвенно учесть ННН-добычу, как долю к легальному вылову:

$$k_y = 1 + (IC_y / C_y)$$

где:

–  $k_y$  — корректировочный коэффициент на долю ННН-промысла в году;

–  $IC_y$  — незаконный улов в году;

–  $C_y$  — легальный улов в году.

Аппроксимация корректировочных коэффициентов выполнена за период 2000-2020 гг. с учетом ряда априорных допущений. В условиях полного запрета промысла и запрета специализированных орудий лова, для промысла сельди в 2000 г. [7; 15] было принято допущение об отсутствии специализированного браконьерского промысла –  $k_{2000} = 1$ . По результатам работы [19] было установлено, что уровень ННН-добычи в 2011 г. был не менее, чем в 2,7 раза выше, чем официальная добыча  $k_{2011} = 2,7$ . По результатам научного мониторинга структуры промысловых и научных уловов, в 2019 г. было отмечено, что незаконная добыча сельди, в качестве приловов, не менее чем в 3 раза превышает официальную статистику –  $k_{2019} = 3$ .

Имеющиеся априорные оценки  $k_{2000}$ ,  $k_{2011}$ ,  $k_{2019}$  были аппроксимированы нелинейной логарифмической функцией для периода 2000-2020 гг., путем общего решения генерального дифференциального уравнения зависимости  $k$  от вектора времени  $t$ :

$$dk/dt = f_k(t) = c + b \cdot \ln(t)$$

где:

–  $dk/dt$  – изменение корректировочного коэффициента  $k$  в непрерывном векторе времени  $dt$ ;

–  $f_k(t)$  – интегрированная функция, описывающая изменение коэффициента  $k$  в точке во времени  $t$ ;

–  $t$  – момент времени;

–  $c, b$  – параметры уравнения.

Аппроксимация нелинейной функции и поиск параметров уравнения выполнен при помощи нелинейного моделирования в пакетах `nls`, `nlstools` в среде R [21]. Полученные оценки корректиро-

вочных коэффициентов, за период 2000-2020 гг., были переведены на шкалу уловов и сглажены методом полиномиальной регрессии для устранения межгодовой неопределенности –  $span = 0,3$  [22].

Построение продукционной модели выполнено в два этапа. На первом этапе выполнялось построение упрощенной продукционной модели Шефера в реализации пакета `CMSY` [24; 25; 27], который ранее был доработан и апробирован для Азово-Черноморских видов [14]. При параметризации модели `CMSY` использовался ряд уточненной (на долю ННН-добычи) рыбохозяйственной статистики за период 2004-2020 годов. Параметр популяционной пластичности был определен как умеренный по таблице популяционной пластичности [28]. Период 2000-2003 гг. не использовался для моделирования по причине непромыслового статуса популяции (запрет промысла в эти годы) и крайне низких величин официального вылова, который был обусловлен по большей степени величиной научного изъятия.

По результатам предварительного моделирования, при помощи `CMSY`, была построена модель при помощи комплекса `JABBA` [32]. Фреймворк `JABBA` позволяет выполнить расширенные процедуры стохастической диагностики модели и рассмотреть различные прогнозные сценарии, что качественно превосходит возможности модели `CMSY`. При параметризации диапазонов оптимумов в фреймворке `JABBA` использовались диапазоны оптимумов, полученные в результате оценки параметров модели `CMSY` ( $r, K, B_0$ ).

Построение модели `JABBA` выполнялось в реализации «catchonly» – использовался только ряд скорректированных общих годовых уловов, без использования информации об улове на единицу промыслового усилия. Выполнялась апостериорная оценка ошибки процесса моделирования и расчет доверительных интервалов всех оцениваемых величин при  $p = 0,95$ . Прогнозирование по результатам моделирования выполнено с краткосрочным горизонтом 3 года, рассмотрены 6 сценариев, в зависимости от предполагаемого уровня промыслового изъятия: от 350 до 600 т с шагом 50 т для каждого сценария.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчета корректирующих коэффициентов на долю ННН-добычи, величины скорректированного общего годового улова представлены в таблице 1.

Рыбопромысловая статистика за период 2000-2003 гг. не использовалась при моделировании по причине крайне низких уловов и непромыслового статуса популяции. На основе ряда данных за 2004-2020 гг. (табл. 1), была построена предварительная модель `CMSY` [8]. Вычисленные параметры продукционной модели Шефера (табл. 2) использовались для априорной параметризации модели `JABBA`.

На основе предварительной оценки параметров уравнения Шефера (табл. 2) выполнено её моделирование в фреймворке `JABBA`. Дополнительно при априорной параметризации использовались:

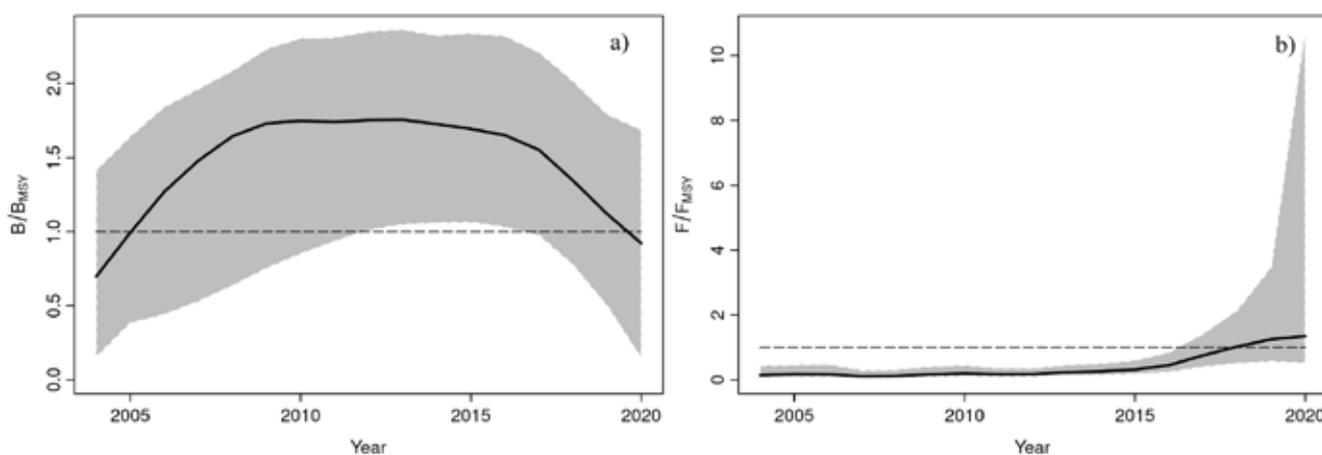
- оценка ошибки в величине суммарного годового улова,  $catch.error = TRUE$ ;  
 - вариативность ошибки годового улова,  $catch.cv = 0,2$ ;  
 - оценка ошибки процесса моделирования,  $sigma.est = TRUE$ .

Результаты оценки биомассы запаса (B), промысловой смертности (F) за период 2004-2020 гг. на фреймворке JABBA представлены в таблице 3. Относительные оценки биомассы запаса и промысловой смертности, к целевым ориентирам

**Таблица 1.** Многолетняя рыбопромысловая статистика вылова черноморско-азовской сельди в водах России и Украины / **Table 1.** Long-term fishing statistics of catch of Black Sea-Azov Pontic shad in the waters of Russia and Ukraine

Год	Официальный вылов, т	Аппроксимированные k	Офиц. вылов + ННН сглаженный LOESS, т
2000	0,2*	1	0,05
2001	0,752*	1,47	1,37
2002	3,102*	1,74	6,14
2003	7,781*	1,94	8,42
2004	10,8	2,09	40,47
2005	48,1	2,21	91,66
2006	48,8	2,31	109,45
2007	32,5	2,4	80,09
2008	33,11	2,48	101,9
2009	70,42	2,55	154,14
2010	65,25	2,62	187,92
2011	69,84	2,68	163,5
2012	50,71	2,73	170,3
2013	85,73	2,78	227,61
2014	101,73	2,83	249,6
2015	78,54	2,87	297,1
2016	165,41	2,91	411,16
2017	189,17	2,95	643,63
2018	289,85	2,99	762,88
2019	233,552	3,02	776,89
2020	230,44	3,05	682,83

\* - официальный запрет на промысел, изъятие на научные нужды



**Рисунок 1.** Многолетняя динамика биомассы запаса относительно целевого ориентира ( $B/B_{MSY}$ , рис. а) и промысловой смертности относительно целевого ориентира ( $F/F_{MSY}$ , рис. б) и доверительные интервалы выполненных оценок (серая область) черноморско-азовской сельди по результатам моделирования на JABBA

**Figure 1.** Long-term dynamics of stock biomass relative to the target ( $B/B_{MSY}$ , Fig. a) and fishing mortality relative to the target ( $F/F_{MSY}$ , fig. b) and confidence intervals of the performed estimates (gray area) of the Black Sea-Azov herring based on the results of JABBA model

**Таблица 2.** Результаты оценки параметров производственного уравнения и ориентиров при моделировании на CMSY / **Table 2.** The results of the evaluation of the parameters of the production equation and benchmarks in CMSY modeling

Параметр	Оптимум	Доверительный интервал при $p = 0,95$
$r$	0,566	0,407 – 0,785
$K$	3432,9	1889,8
$B_{2005}/B_{MSY}$	1,05	-

эксплуатации ( $B_{MSY}$ ,  $F_{MSY}$ ), представлены на рисунке 1. Были получены оценки целевых ориентиров эксплуатации:  $B_{MSY} = 1975,8$  т,  $F_{MSY} = 0,29$ ,  $MSY = 557,3$  т и уточненные параметры  $r/K$  пары производственного уравнения:  $r = 0,589$ ,  $K = 3951,6$  тонн.

В соответствии с полученными многолетними оценками и величинами целевых ориентиров эксплуатации, была построена многозональная схема правил регулирования промысла [23] (далее – ПРП), рисунок 2. Данная схема позволяет наглядно интерпретировать состояние популяции и влияние на нее промысловой смертности в различные годы.

По результатам подгонки модели и на основе полученных оценок биологических и промысловых ориентиров, правил регулирования промысла, был выполнен краткосрочный прогноз динамики биомассы запаса и промысловой смертности, на период 2021-2023 гг., по различным сценариям промысловой нагрузки (рис. 3). Краткосрочный прогноз состояния биомассы запаса, при наиболее приемлемом рациональном сценарии, близком к  $MSY$ , представлен в таблице 4.

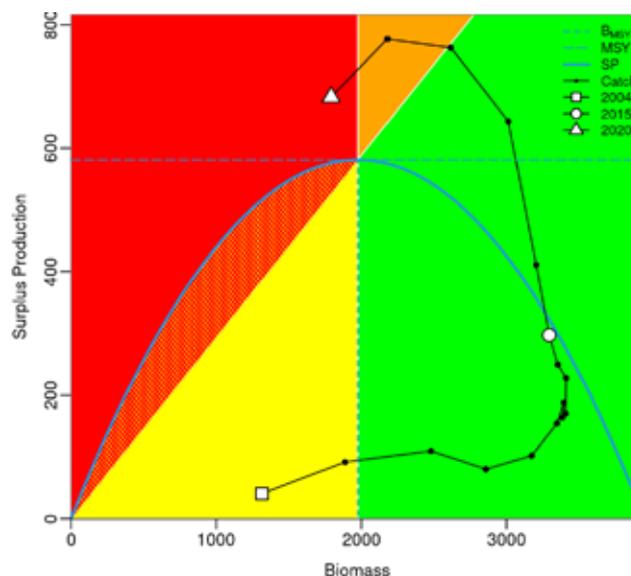
### ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты производственного моделирования, полученные на JABBA, указывают на наличие высокой доли неопределенности и умеренной надежности полученных оценок. Высокая неопределенность во входных данных, вызванная неточностью косвенной оценки объемов ННН-добычи, существенно ухудшила надежность оценок модели, что в конечном итоге привело к широким доверительным интервалам полученных оценок. Тем не менее, несмотря на высокую неопределенность, полученные результаты позволили удовлетворительно описать современную многолетнюю динамику изменения биомассы запаса, промысловой смертности (табл. 3) и оценить ориентиры эксплуатации популяции сельди (рис. 1, 2).

По результатам моделирования выявлено восстановление запаса сельди в период с 2004 по 2014 гг., что подтверждается результатами учетно-траловых съемок, проводимых в эти годы. В указанный период наблюдаются низкие показатели промысловой смертности, колеблющиеся в пределах от 0,03 до 0,07 (табл. 3), что дало возможность популяции сельди самостоятельно восстановить свои запасы без искусственного воспроизводства. В период 2014-2020 гг. отмечен постепенный тренд снижения биомассы запаса сельди, на фоне постоянно нарастающего тренда промысловой смертности, относительно предыдущего периода (с 0,07 в 2014 г. до 0,38 в 2020 г.). Начиная с 2018 г., уровень промысловой смертности стал превышать

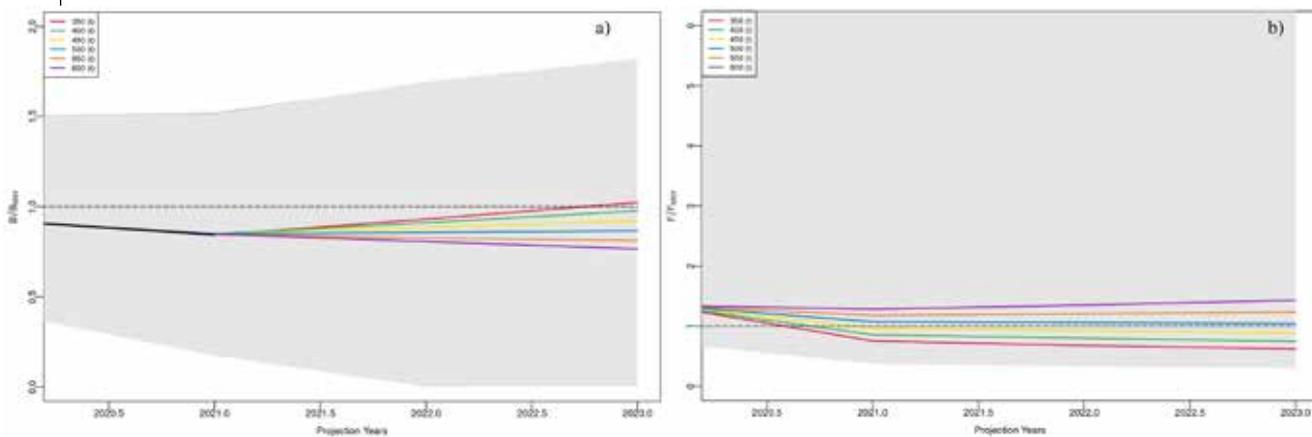
целевой ориентир  $F_{MSY} = 0,28$ , что свидетельствует о переэксплуатации запаса сельди в период 2018-2020 годов.

Детальное изучение состояния популяции, относительно целевых ориентиров (рис. 1,2), гово-



**Рисунок 2.** Многозональная схема правил регулирования промысла, производственная кривая и целевые ориентиры состояния популяции и эксплуатации черноморско-азовской сельди по результатам моделирования. Красная область – коллапс популяции по причинам переэксплуатации; желтая область – буферная зона сокращения биомассы популяции без признаков переэксплуатации; оранжевая область – промысловая переэксплуатация популяции без признаков коллапса; зеленая зона – благоприятное состояние популяции без признаков переэксплуатации А

**Figure 2.** A multi-zone scheme of fishing regulation rules, a production curve and targets for the state of the population and exploitation of the Black Sea-Azov shad based on the results of modeling. Red area – population collapse due to overexploitation; yellow area – buffer zone of population biomass reduction without signs of overexploitation; orange area – commercial overexploitation of the population without signs of collapse; green area – favorable state of the population without signs of overexploitation



**Рисунок 3.** Краткосрочный прогноз динамики биомассы запаса, относительно целевого ориентира ( $B/B_{MSY}$ , рис. а), и промысловой смертности, относительно целевого ориентира ( $F/F_{MSY}$ , рис. б), и доверительные интервалы выполненных оценок (серая область) черноморско-азовской сельди при различных сценариях промыслового изъятия в период 2021-2023 годы

**Figure 3.** Short-term forecast of the stock biomass dynamics, relative to the target reference point ( $B/B_{MSY}$ , Fig. a), and fishing mortality, relative to the target reference point ( $F/F_{MSY}$ , fig. b), and confidence intervals of the performed estimates (gray area) of the Black Sea-Azov herring under various scenarios of commercial fisheries in the period 2021-2023

**Таблица 3.** Оценки биомассы запаса, промысловой смертности и их доверительных интервалов моделью JABBA, черноморско-азовская сельдь, 2004-2020 годы / **Table 3.** Estimates of stock biomass, fishing mortality and their confidence intervals by the JABBA model, Black Sea-Azov shad, 2004-2020

Год	B	Доверительный интервал B, $p = 0,95$	F	Доверительный интервал F, $p = 0,95$
2004	1315,5	345,5 - 2755,4	0,06	0,01 - 0,12
2005	1887,4	686 - 3252,8	0,05	0,03 - 0,13
2006	2479,9	799,1 - 3670,5	0,04	0,03 - 0,14
2007	2857,8	952 - 3921,9	0,03	0,02 - 0,08
2008	3173,3	1153,9 - 4201,4	0,03	0,02 - 0,09
2009	3347,5	1358,7 - 4466,9	0,05	0,03 - 0,11
2010	3395,5	1507 - 4702,6	0,06	0,04 - 0,12
2011	3384,1	1612,2 - 4767,6	0,05	0,03 - 0,1
2012	3407,6	1702,1 - 4891,2	0,05	0,03 - 0,1
2013	3411	1774,6 - 4925,5	0,07	0,05 - 0,13
2014	3353,1	1783,8 - 4855,2	0,07	0,05 - 0,14
2015	3294	1761,3 - 4835,3	0,09	0,06 - 0,17
2016	3203,9	1718,5 - 4831,7	0,13	0,09 - 0,24
2017	3012,4	1602,4 - 4645,8	0,21	0,14 - 0,4
2018	2616	1276,8 - 4254,7	0,29	0,18 - 0,6
2019	2179,5	810,9 - 3903,6	0,36	0,2 - 0,96
2020	1791,3	238,5 - 3667,6	0,38	0,19 - 2,86

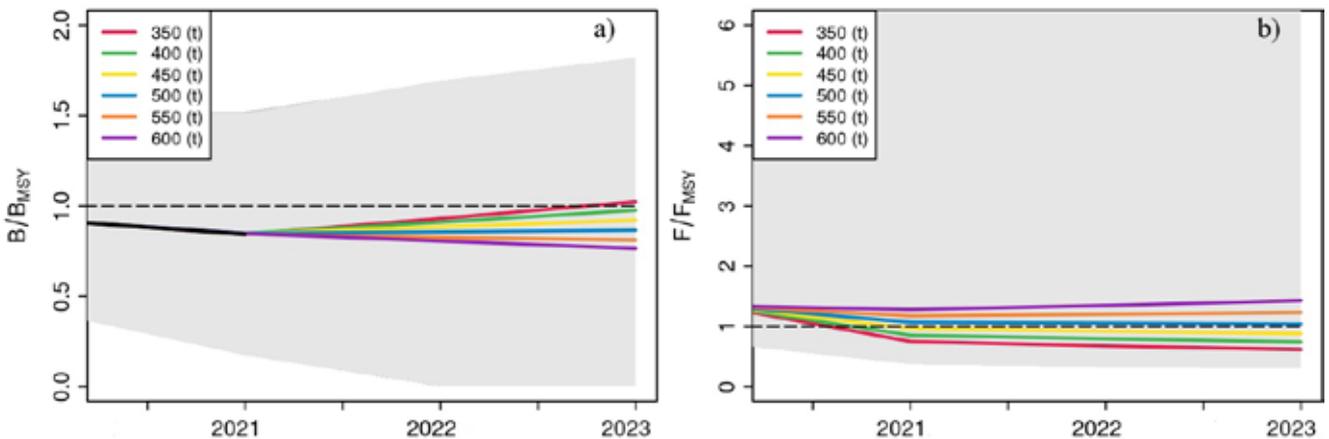
рит о том, что практически за весь рассматриваемый период биомасса запаса сельди находилась выше целевого ориентира без признаков переэксплуатации. В период 2005-2017 гг. биомасса запаса находилась выше целевого ориентира в биологически безопасной зоне ( $B/B_{MSY} > 1$ ), а промысловая смертность не превышала целевого ориентира эксплуатации ( $F/F_{MSY} < 1$ ). Начиная с 2018 г., отмечены первые признаки переэксплуатации ( $F_{2018}/F_{MSY} \approx 1$ ), которая постепенно нарастает ( $F_{2020}/F_{MSY}$

$= 1,3$ ). Рост промысловой смертности в этот период отмечается на фоне постепенно снижающихся величин общего годового вылова: с учетом ННН – с 762 до 682 т., без ННН – с 289 до 230 т (табл. 1).

Переэксплуатация в период 2018-2020 гг., на фоне сокращения величины общего годового изъятия (как с учетом ННН, так и без), обуславливалась постепенным трендом сокращения биомассы промыслового запаса (рис. 1, 2). Визуализация пе-

**Таблица 4.** Сценарий краткосрочного прогноза биомассы запаса и промысловой смертности азово-черноморской сельди при суммарном годовом изъятии на уровне 450 т в период 2021-2023 годы / **Table 4.** Short-term forecast scenario of stock biomass and fishing mortality with total annual withdrawal at the level of 450 tons in the period 2021-2023

Год	Биомасса запаса (В), т	Промысловая смертность (F), доли
2021	1676	0,285
2022	1748	0,272
2023	1821	0,259



**Рисунок 4.** Периоды трендов биомассы промыслового запаса (а) и промысловой убыли (б) черноморско-азовской проходной сельди по результатам моделирования. Точки – оценки биомассы запаса и промысловой убыли по результатам модели JABBA (табл. 3), линии – линейная регрессия оценок по вектору времени в выделенных интервалах,

$R^2$  – коэффициент детерминации линейной аппроксимации

**Figure 4.** Periods of trends in biomass of commercial stock (a) and fishing mortality (b) of the Black Sea-Azov anadromous shad according to the results of modeling. The points are estimates of stock biomass and fishing loss based on the results of the JABBA model (table 3), lines are the linear regression of estimates by the time vector in the selected intervals,  $R^2$  is the coefficient of determination of the linear approximation

риодов изменения биомассы запаса и промысловой смертности графическим способом позволяет более детально изучить причинно-следственные связи (рис. 4).

Результаты трендового представления динамики биомассы запаса (рис. 4а) указывают на наличие 3-х различных периодов изменения биомассы: период восстановления биомассы запаса 2004-2009 гг., период стабильного, высокого уровня запаса 2010-2013 гг., период стремительного сокращения биомассы запаса 2014-2020 годы. Трендовая динамика промысловой смертности (рис. 4б) указывает на наличие двух периодов: период неопределенности промысловой смертности 2004-2013 гг., период стремительного роста промысловой смертности 2014-2020 годы. Анализ трендовых периодов совместно позволяет уверенно утверждать, что сокращение биомассы запаса в период 2014-2020 гг. напрямую обусловлено стремительным ростом промысловой смертности. Следует отметить, что в период 2004-2014 гг. промысловая смертность не являлась основным лимитирующим фактором биомассы запаса сельди.

В настоящее время, 2019-2020 гг., популяция сельди находится на биологически небезопасном

уровне с признаками незначительной, нарастающей переэксплуатации запаса ( $F_{2020}/F_{MSY} = 1,31$ ). Вероятно, причиной переэксплуатации популяции после 2018 г. является постоянно нарастающий уровень ННН-добычи. Биомасса запаса, следующая монотонному линейному тренду на снижение с 2014 г. (рис. 4а), находится на уровне ниже целевого ориентира ( $B_{2020} = 1791,3$  т.,  $B_{MSY} = 1975,8$  т.,  $B_{2020}/B_{MSY} = 0,9$ ).

Помимо увеличения промысловой нагрузки на запас сельди существенное влияние оказывают и абиотические факторы, в частности, сокращение водного стока в весенний период и затянувшееся осолонение Азовского моря [5; 13].

Зарегулирование стока р. Дон привело к значительному сокращению весеннего половодья, снижению скоростей течения реки, которые необходимы сельди для благоприятного нереста и, соответственно, поспособствовало увеличению солености в акватории моря [9; 10]. Изменившиеся условия окружающей среды стали причиной низкой эффективности размножения сельди, сокращения нагульного ареала молоди и ухудшения качественного и количественного состояния популяции в целом [10]. Учитывая отрицательный

тренд биомассы запаса и состояния абиотической среды в 2014-2020 гг., в последующие годы, вероятнее всего, стоит ожидать дальнейшего сокращения объемов промыслового запаса сельди и ухудшение ее качественных характеристик.

По результатам краткосрочного прогноза динамики биомассы запаса и промысловой смертности сельди на период 2021-2023 гг. был выбран сценарий, наиболее приемлемый с точки зрения рациональной эксплуатации по концепции MSY, на уровне добычи в 450 тонн. Этот сценарий был принят как базовый и представлен в таблице 4. Стоит отметить, что объем добычи в 450 т не является рекомендацией к установлению величины разрешенного вылова (РВ). Это теоретически возможный вылов с учетом ННН-нагрузки, доля которой, без принятия радикальных мер, составит около 300 т и не более 150 т останется на легальный вылов. Для более рациональной эксплуатации запаса нужно предпринимать радикальные меры борьбы с ННН-промыслом. До появления существенных сигналов сокращения объемов ННН-добычи рекомендуется сокращать объемы РВ до среднего уровня официальной добычи за последние 3 года – 250 тонн. При отсутствии мероприятий по предотвращению ННН-добычи, рекомендуется сохранять вылов на уровне 150-200 тонн.

### ВЫВОДЫ

Результаты работы позволили получить оценки биомассы промыслового запаса, промысловой смертности и ориентиров эксплуатации за период исследования. Биомасса промыслового запаса находилась в пределах 1315-3411 т, промысловая смертность – 0,03-0,38. Целевые ориентиры состояния популяции:  $V_{MSY} = 1975,8$  т,  $F_{MSY} = 0,29$ ,  $MSY = 557,3$  тонн.

Выделены три периода состояния биомассы запаса: период восстановления 2004-2009 гг., период стабильного состояния 2010-2013 гг., период постепенного сокращения 2014-2020 годы. Выделены два периода изменения промысловой смертности: период неопределенности 2004-2013 гг., период постепенного увеличения 2014-2020 годы.

Отмечено, что в период 2004-2013 гг. промысловая смертность не являлась ключевым лимитирующим фактором биомассы промыслового запаса сельди.

В период 2018-2020 гг. постепенное увеличение уровня промысловой смертности привело к первым сигналам о незначительной переэксплуатации популяции. В 2020 г. переэксплуатация стала более выраженной, в результате чего биомасса промыслового запаса впервые опустилась ниже целевого ориентира эксплуатации.

5. Результаты работы обращают внимание на высокую долю ННН-промысла, который является существенной угрозой для популяции сельди. Авторы отмечают необходимость контроля и борьбы с незаконными добытчиками.

6. В настоящее время отсутствуют перспективы увеличения промысловой нагрузки на популяцию сельди. При осуществлении мероприятий по борьбе с незаконной добычей, допустим вылов на

уровне 450 тонн. При отсутствии указанных мероприятий, рекомендуется сократить общий годовой вылов до 150-200 тонн.

### ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Аксютин З. М. Элементы математической оценки результатов наблюдений в биологических и рыбохозяйственных исследованиях. – Пищевая промышленность, 1968. – 288 с.
1. Aksyutina Z. M. Elements of mathematical evaluation of the results of observations in biological and fisheries research. - Food industry, 1968. - 288 p.
2. Алдакимова С.Ю. Состояние донской проходной сельди *Alosa kessleri pontica eichwald* в современных условиях. // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: Сборник научных трудов 2000-2001 гг. / Под редакцией д.б.н., проф. С.П. Воловика. – М.: Вопросы рыболовства, - 2002. - с. 308-315.
2. Aldakimova S.Yu. The state of the Don passing herring *Alosa kessleri pontica eichwald* in modern conditions. // The main problems of fisheries and protection of fishery reservoirs of the Azov-Black Sea basin: Collection of scientific papers 2000-2001 / Edited by Doctor of Biological Sciences, prof. S.P. Volovik. - M.: Questions of fisheries, - 2002. - pp. 308-315.
3. Бабаян В.К. Методические рекомендации по оценке запасов приоритетных видов водных биологических ресурсов. / В.К. Бабаян, А.Е. Бобырев, Т.И. Булгакова, Д.А. Васильевы другие. – М.: Изд-во ВНИРО, 2018. – 312 с.
3. Babayan V.K. Methodological recommendations for assessing reserves of priority types of aquatic biological resources. / V.K. Babayan, A.E. Bobyrev, T.I. Bulgakova, D.A. Vasilyevich others. - M.: VNIRO Publishing House, 2018– - 312 p.
4. Васильева Е.Д., Лужняк В.А. Рыбы бассейна Азовского моря. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, - 2013. – 270 с.
4. Vasilyeva E.D., Luzhnyak V.A. Fishes of the Azov Sea basin. - Rostov-on-Don: YUNTS RAS, - 2013. - 270 p.
5. Жукова С.В. и др. Закономерности формирования режима солености Азовского моря в современный период // Вопросы сохранения биоразнообразия водных объектов. – 2015. – с. 128-137.
5. Zhukova S.V. et al. Regularities of the formation of the salinity regime of the Sea of Azov in the modern period // Issues of biodiversity conservation of water bodies. - 2015. - pp. 128-137.
6. Иванченко И. Н., Назарова Ю. В. Состояние популяции черноморско-азовской проходной сельди *Alosa immaculata* (Bennett) в 2010-2011 гг. // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. – 2012. – с. 157-167.
6. Ivanchenko I. N., Nazarova Yu. V. The state of the population of the Black Sea-Azov passing herring *Alosa immaculata* (Bennett) in 2010-2011. // The main problems of fisheries and protection of fishery reservoirs of the Azov-Black Sea basin. - 2012. - pp. 157-167.
7. Козоброд И.Д. Ретроспективный анализ состояния промыслового запаса черноморско-азовской проходной сельди // XVII большой географический фестиваль (БГФ-2021), посвященный 195-летию со дня начала российского кругосветного путешествия под руководством Ф.П. Литке (1826-1829 гг.). – Санкт — Петербург: Свое издательство, - 2021. - с. 175-179.
7. Kozobrod I.D. Retrospective analysis of the state of the fishing stock of the Black Sea-Azov passing herring // XVII Great Geographical Festival (BGF-2021), dedicated to the 195th anniversary of the beginning of the Russian circumnavigation under the leadership of F.P. Litke (1826-1829). - St. Petersburg: Its publishing house, - 2021. - pp. 175-179.
8. Козоброд И.Д., Пятинский М.М. Предварительные результаты моделирования динамики запаса сельди в Азово-Черноморском бассейне при недостатке информации (2007–2020 гг.) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: системный анализ и моделирование экономических и экологических систем // Экология. – 2021. – Т. 1. – №. 6. – с. 34-39.
8. Kozobrod I.D., Pyatinsky M.M. Preliminary results of modeling the dynamics of herring stock in the Azov-Black Sea basin with a lack of information (2007-2020) // Ecology. Economy. Computer science.

Series: system analysis and modeling of economic and ecological systems // Ecology. - 2021. - Vol. 1. - No. 6. - pp. 34-39.

9. Кузнецова И.Д. Влияние изменения солёности на распространение проходных, полупроходных и морских видов рыб в Азовском море // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Географы в годы войны и мира», посвященной 70-летию победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг. и 170-летию Русского географического общества в рамках XI Большого географического фестиваля. [Электронный ресурс]. – М.: Издательство «Перо», 2015. – с. 648-652.

9. Kuznetsova I.D. The influence of salinity changes on the distribution of passing, semi-passing and marine fish species in the Sea of Azov // Materials of the international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Geographers during the war and peace", dedicated to the 70th anniversary of victory in the Great Patriotic War of 1941-1945 and the 170th anniversary of the Russian Geographical Society as part of the XI Great Geographical Festival. [Electronic resource]. - Moscow: Publishing House "Pero", 2015. - pp. 648-652.

10. Кузнецова И.Д., Федоров Ю.А. Влияние солёности и водного стока на распространённость черноморско-азовской проходной сельди в Азовском море // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2018. - №4. – с. 33-38.

10. Kuznetsova I.D., Fedorov Yu.A. The influence of salinity and water runoff on the prevalence of the Black Sea-Azov passing herring in the Sea of Azov // Izvestiya vuzov. The North Caucasus region. Natural sciences. - 2018. - No. 4. - pp. 33-38.

11. Кузнецова И.Д., Федоров Ю.А. Роль некоторых факторов в формировании потомства черноморско-азовской проходной сельди // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. - 2019. - №1. – с. 55-59.

11. Kuznetsova I.D., Fedorov Yu.A. The role of some factors in the formation of offspring of the Black Sea-Azov passing herring // Izvestiya vuzov. The North Caucasus region. Natural sciences. - 2019. - No. 1. - pp. 55-59.

12. Кузнецова И.Д. Колебания численности черноморско-азовской проходной сельди в современный период / И.Д. Кузнецова, Т.А. Чепурная // Комплексные исследования Мирового океана. – 2017. – с. 360-361.

12. Kuznetsova I.D. Fluctuations in the number of the Black Sea-Azov passing herring in the modern period / I.D. Kuznetsova, T.A. Chepurayeva // Complex studies of the World Ocean. - 2017. - pp. 360-361.

13. Куропаткин А.П. Изменение солёности Азовского моря / А.П. Куропаткин, С.В. Жукова, В.М. Шишкин и др. // Вопросы рыболовства. – 2013. – Т. 14. – № 4. – С. 666-673.

13. Kuropatkin A.P. Salinity change of the Sea of Azov / A.P. Kuropatkin, S.V. Zhukova, V.M. Shishkin et al. // Questions of fisheries. - 2013. - Vol. 14. - No. 4. - pp. 666-673.

14. Козоброд И.Д. Моделирование динамики промысловой популяции, в условиях недостаточности информационного обеспечения, моделью CMSY на примере Черноморского шпрота в водах России / И.Д. Козоброд, М.М. Пятинский // Рыбное хозяйство. – 2021. – №3. – с. 76-82. DOI 10.37663/0131-6184-2021-3-68-75

14. Kozobrod I.D. Modeling of the dynamics of the fishing population, in conditions of insufficient information support, with the CMSY model on the example of the Black Sea sprat in the waters of Russia / I.D. Kozobrod, M.M. Pyatinsky // Fisheries. - 2021. - No. 3. - pp. 76-82. DOI 10.37663/0131-6184-2021-3-68-75

15. Реков Ю.И. Восстановление запаса черноморско-азовской проходной сельди / Ю.И. Реков, Т.А. Чепурная, С.В. Костенко // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. – 2011. – с. 148-153.

15. Rekov Yu.I. Restoration of the stock of the Black Sea-Azov passing herring / Yu.I. Rekov, T.A. Chepurayeva, S.V. Kostenko // The main problems of fisheries and protection of fishery reservoirs of the Azov-Black Sea basin. - 2011. - pp. 148-153.

16. Сафаралиев И.А. Оценка волжского запаса севрюги *Acipenser stellatus* Каспийского моря в условиях моратория на промысел: ретроспектива и возможные сценарии в будущем / И.А. Сафаралиев, Т.И. Булгакова // Вопросы рыболовства. – 2017. – Т. 18. – № 2.

16. Safaraliev I.A. Assessment of the Volga stock of the sevruga *Acipenser stellatus* of the Caspian Sea in the conditions of the

moratorium on fishing: a retrospective and possible scenarios in the future / I.A. Safaraliev, T.I. Bulgakova // Fishing issues. - 2017. - Vol. 18. - No. 2.

17. Сафаралиев И.А. Каспийская севрюга: распределение, оценка запаса и сценарии восстановления волжской популяции. / И.А. Сафаралиев, Г.И. Рубан, Т.И. Булгакова // Вопросы рыболовства. – 2019. – 156 с.

17. Safaraliev I.A. Caspian sevruga: distribution, stock assessment and recovery scenarios of the Volga population. / I.A. Safaraliev, G.I. Ruban, T.I. Bulgakova // Fishing issues. - 2019. - 156 p.

18. Чередников С.Ю. Многолетняя динамика состояния запаса леща по результатам моделирования CMSY с ограниченными данными (2002–2020 гг.) в Азовском море (воды России) / С.Ю. Чередников, М.М. Пятинский, И.Д. Козоброд // Водные биоресурсы и среда обитания. – 2021. – Т. 4. – № 2. – с. 66-79.

18. Cherednikov S.Yu. Long-term dynamics of the bream stock status based on the results of CMSY modeling with limited data (2002-2020) in the Sea of Azov (waters of Russia) / S.Yu. Cherednikov, M.M. Pyatinsky, I.D. Kozobrod // Aquatic bioresources and habitat. - 2021. - Vol. 4. - No. 2. - pp. 66-79.

19. Шляхов В.А. Керченский рынок как индикатор миграций Азово-Черноморских рыб и местного рыбного промысла / В.А. Шляхов, И.А. Мирющенко // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона. – 2012. – с. 148-154.

19. Shlyakhov V.A. Kerch market as an indicator of migrations of Azov-Black Sea fish and local fisheries / V.A. Shlyakhov, I.A. Miryushenko // Modern fisheries and environmental problems of the Azov-Black Sea region. - 2012. - pp. 148-154.

20. Яковлев В.Н. Состояние биологических ресурсов Черного и Азовского морей (справочное пособие). Министерство рыбного хозяйства Украины Керчь: ЮГНИРО, 1995. – 27 с.

20. Yakovlev V.N. The state of biological resources of the Black and Azov Seas (reference manual). Ministry of Fisheries of Ukraine Kerch: YUGNIRO, 1995. - 27 p.

21. Bates, D. M.; Watts, D. G. Nonlinear regression analysis and its applications. New York: John Wiley & sons, – 1988. – 365 p.

22. Cleveland W. S., Grosse E., Shyu W. M. Local regression models. Chapter 8 in Statistical models in S (JM Chambers and TJ Hastie eds.), 608 p // Wadsworth & Brooks/Cole, Pacific Grove, CA. – 1992.

23. De Bruyn P., Murua H., Aranda M. The Precautionary approach to fisheries management: How this is taken into account by Tuna regional fisheries management organisations (RFMOs) // Marine Policy. – 2013. – Т. 38. – Pp. 397-406.

24. Froese R. et al. Estimating fisheries reference points from catch and resilience // Fish and Fisheries. – 2017. – Т. 18. – № 3. – Pp. 506-526.

25. Froese R. et al. What catch data can tell us about the status of global fisheries // Marine biology. – 2012. – Т. 159. – № 6. – Pp. 1283-1292.

26. Hilborn R., Walters C.J. Quantitative fisheries stock assessment: Choice, Dynamics, Uncertainty // Chapman and Hall, New York. – 1992. – 570 p.

27. Martell S., Froese R. A simple method for estimating MSY from catch and resilience // Fish and Fisheries. – 2013. – Т. 14. – № 4. – Pp. 504-514.

28. Musick J.A. Criteria to define extinction risk in marine fishes: the American Fisheries Society initiative // Fisheries. – 1999. – Т. 24. – № 12. – Pp. 6-14.

29. Pitcher T.J., Watson, R., Forrest, R., Valtýsson, H.P., Guénette, S. Estimating illegal and unreported catches from marine ecosystems: a basis for change // Fish and Fisheries. – 2002. – Т. 3. – № 4. – Pp. 317-339.

30. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – 2020. - URL <https://www.R-project.org/>

31. Ricker W. E. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations // Bull. Fish. Res. Bd. Can. – 1975. – Т. 191. – 382 p.

32. Winker H., Carvalho F., Kapur M. JABBA: just another Bayesian biomass assessment // Fisheries Research. – 2018. – № 204. – Pp. 275-288.

33. Ye Y., Valbo-Jørgensen J. Effects of IUU fishing and stock enhancement on and restoration strategies for the stellate sturgeon fishery in the Caspian Sea // Fisheries Research. – 2012. – Т. 131. – Pp. 21-29.