

УДК 57.047;639.2.05

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАПАСА РУССКОГО ОСЕТРА *ACIPENSER GUELDENSTAEDTII* АЗОВСКОГО МОРЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОСПРОИЗВОДСТВА

© 2022 г. Т. И. Булгакова<sup>1</sup>, С. Н. Кульба<sup>2</sup>, М. М. Пятинский<sup>2</sup>, \*

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии – ВНИРО, Москва, Россия

<sup>2</sup>Азово-Черноморский филиал ВНИРО – АзНИИРХ, Ростов-на-Дону, Россия

\*E-mail: pyatinskiy\_m\_m@azniirkh.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 11.06.2021 г.

Принята к публикации 08.07.2021 г.

Предлагается новая модель, описывающая динамику популяции осетровых рыб (Acipenseridae), естественное воспроизводство которой отсутствует либо чрезвычайно мало, – Depleted artificial population model. Модель реализована в среде R и состоит из двух подмоделей. Первая из них позволяет уточнить необходимые параметры модели (коэффициент естественной убыли половозрелой части популяции и эффективность искусственного воспроизводства) с использованием оптимизационной процедуры, вторая рассматривает разные сценарии восстановления запаса для прогнозного периода. Сценарии характеризуются разными значениями двух параметров – численностью выпущенной осетровыми рыболовными заводами молоди и промысловой убылью, вызванной нелегальным промыслом и изъятием на научные исследования. Проведённые на примере русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря расчёты указывают, что его запас до целевого уровня 10 тыс. т может быть восстановлен при базовом и оптимистичных сценариях к 2037–2048 гг. в зависимости от объёма искусственного воспроизводства и степени незаконного, несообщаемого и нерегулируемого промысла. При депрессивных сценариях восстановление запаса не предвидится.

**Ключевые слова:** русский осётр *Acipenser gueldenstaedtii*, популяция, моделирование, восстановление запаса, Азовское море.

**DOI:** 10.31857/S0042875222020047

В настоящее время наблюдается катастрофическое уменьшение запаса русского осетра Азовского моря *Acipenser gueldenstaedtii* (Чепурная, Реков, 2017; Реков, Чепурная, 2018). Перед авторами настоящей работы стояла задача оценить возможные пути восстановления данного запаса при разных управляющих воздействиях. Для рассмотрения различных возможных вариантов восстановления популяции русского осетра в Азовском море требуется проанализировать многолетнюю динамику численности популяции, что в общем случае можно сделать при помощи структурированных, продукционных моделей и методов, применяемых при недостатке информации (Бабаян и др., 2018).

Структурированные методы позволяют учесть биологические особенности моделируемой популяции, но предъявляют повышенные требования к объёму и качеству входных данных (включая данные по возрастной структуре уловов) и не применимы в случае неполноты промысловой статистики.

Продукционные модели менее требовательны к входным данным. В рамках этого подхода популяцию рассматривают как совокупность одинаковых особей, не учитывая их возрастную структуру. Для параметризации продукционной модели требуются многолетние ряды промысловых данных, а именно годовых уловов и величины промыслового усилия. Эти ряды должны охватывать достаточно большой временной интервал, превышающий продолжительность жизни особей данной популяции, а данные по промысловому усилию следует стандартизировать.

Для случаев с недостаточной полнотой и качеством входных данных были разработаны методы с бедным информационным обеспечением – Data limited methods (DLM) (Carruthers et al., 2014). К ним относится, в частности, и модель DB-SRA (Depletion-based stock reduction analysis) (Dick, MacCall, 2011). В её основе лежит продукционная модель, согласно которой формирование пополнения половозрелого запаса функционально зависит от его биомассы. Данная модель позво-

ляет получить оценки ориентиров управления и ретроспективную динамику биомассы запаса, а затем перейти на прогноз при предположении, что продукционные возможности популяции не меняются со временем. Модель DB-SRA была успешно применена для оценки состояния популяции севрюги *A. stellatus* Каспийского моря (Ye, Valbo-Jørgensen, 2012; Сафаралиев и др., 2019). Однако её использование в отношении русского осетра Азовского моря невозможно, поскольку естественное воспроизводство данного вида в течение многих лет отсутствует вследствие недоступности нерестилищ после зарегулирования рек Дон и Кубань.

По данным Горбачевой с соавторами (2020), поколения русского осетра Азовского моря начиная с 1972 г. рождения на 100% состоят из рыб, полученных на осетровых рыболовных заводах (ОРЗ); только в поколениях 1978–1981 гг. около 30% особей являются результатом естественного воспроизводства. Однако последнее утверждение сомнительно, так как нельзя исключать ошибки при определении возраста рыб, пойманных в последующие годы. Таким образом, можно считать, что воспроизводство русского осетра Азовского моря в последние 30 лет не зависит от численности или биомассы половозрелой части его запаса. Данные об уловах русского осетра за последние 20 лет отсутствуют, поскольку начиная с 2000 г. его коммерческий промысел в Азовском море запрещён, а экспертные оценки незаконного, несообщаемого и нерегулируемого промысла (ННН-промысел) имеются только для периода 1994–1999 гг. (Чепурная и др., 2008). Следовательно, при отсутствии и естественного воспроизводства популяции осетра, и информации об уловах и промысловых усилиях применение продукционных моделей, в том числе DB-SRA, не представляется возможным.

В этой связи актуальной задачей является разработка модели динамики популяции, базирующейся на данных об искусственном пополнении запаса, ретроспективных данных о промысловых уловах, оценках интенсивности ННН-промысла и особенностях биологии русского осетра Азовского моря.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для моделирования динамики запаса русского осетра Азовского моря была разработана модель DAP (Depleted artificial population model). Данная модель реализована в среде R (R Core Team, 2016) и состоит из двух подмоделей. В первой из них с помощью метода наименьших квадратов выполняется настройка модели. Используется итеративная процедура сопоставления модельного ряда оценок биомассы половозрелой части популяции ( $B_y$ ) с оценками того же запаса, полученными с помощью учётных съёмов 1981–1999 гг. ( $B_{prior(y)}$ ).

Предварительно проводится сглаживание оценок запаса по данным съёмов методом скользящего среднего по трём точкам для устранения межгодовых флуктуаций и неточностей оценивания прямым методом. В данной подмодели учитываются многолетние ряды уловов, включая как официальные ( $C_y$ ), так и ряды уловов ННН-промысла ( $C_{iuu}$ ); ежегодный выпуск молоди с ОРЗ ( $N_{juv(y)}$ ); средняя масса половозрелых особей ( $W_M$ ), рассчитанная по данным о возрастной динамике массы тела  $W(x)$  с учётом пола. Значения ННН-уловов для периода 1989–1999 гг. получены путём кусочно-линейной аппроксимации экспертных оценок за период 1994–1999 гг. (рис. 1); для периода 1981–1988 гг. условно приняли, что ННН-уловы составляли 10% официального вылова. Каких-либо оценок этого параметра в данный период в Азово-Донском бассейне, к сожалению, не имеется.

В процессе настройки модели выполняется оптимизация следующих параметров:  $\phi_M$  – коэффициент годовой естественной убыли половозрелого стада;  $rr$  – коэффициент выживания выпускаемой молоди до возраста достижения половой зрелости (эквивалент коэффициента промыслового возврата для промысловых популяций);  $B_0$  – биомасса половозрелой части запаса в первый год выбранного периода настройки модели.

Расчёт биомассы пополнения половозрелой части запаса в год  $y$  выполняется по формуле:

$$B_{rec(y)} = N_{juv_{y-i}} W_M rr, \quad (1)$$

где  $i$  – возраст достижения половой зрелости,  $N_{juv_{y-i}}$  – численность выпущенной молоди русского осетра в год  $(y-i)$ .

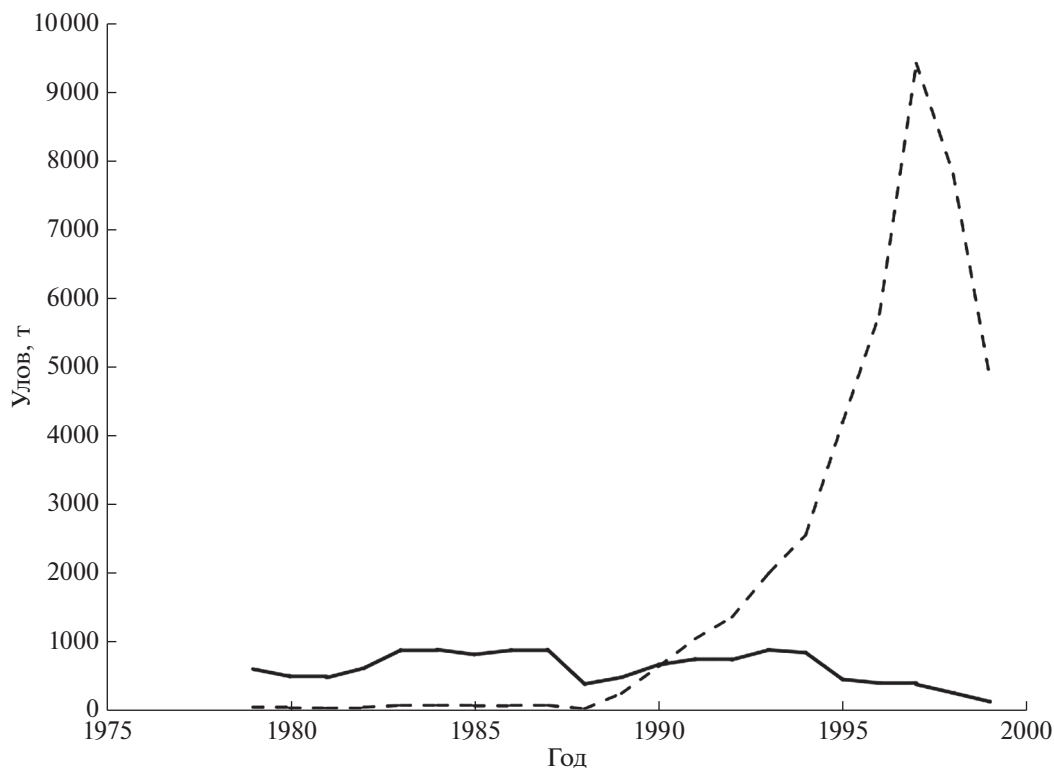
В модели в качестве стартового значения принято  $rr = 0.01$  (1%), что согласуется с данными литературы: 1.1–1.3% (Бойко, Калинин, 1961; Макаров, 1964; Реков, Корнеев, 1987), 0.6% (Зайдинер и др., 2000).

Биомасса половозрелой части популяции на начало следующего года вычисляется по формуле:

$$B_{y+1} = B_y (1 - \phi_M) + B_y \left( \frac{W_y}{W_M} \right) + B_{rec(y)} - C_{total(y)}, \quad (2)$$

где  $B_y$  – биомасса половозрелой части запаса на начало года  $y$ ;  $C_{total(y)} = C_y + C_{iuu-y}$ , где  $C_y$  и  $C_{iuu-y}$  – временные ряды соответственно официальных и ННН-уловов в год  $y$ ;  $\phi_M$  – коэффициент годовой естественной убыли,  $W_M$  – средняя масса особей половозрелого стада,  $W_y$  – средний годовой прирост массы тела половозрелых особей.

Зависимости массы тела половозрелой особи от возраста ( $W1(x)$  – самцы в возрасте от 6 до 21 года,  $W2(x)$  – самки 10–25 лет) рассчитаны по среднемноголетним данным (Козлитина и др., 2005) с помощью линейных функций (в обоих случаях  $R^2 = 0.97$ ):  $W1(x) = 0.8482x + 1.47$  и  $W2(x) = 1.764x - 5.013$ .



**Рис. 1.** Временные ряды официальных (—) и ННН-уловов (---), используемые при моделировании запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря.

В расчётах далее принято среднее значение годового прироста самцов и самок (соответственно 0.848 и 1.764 кг):  $W_y = 1.306$  кг.

Средний возраст наступления половой зрелости определён по кривой полового созревания русского осетра логит-методом (Михайлюк, Пятинский, 2020) и принят равным 14 лет (17 лет для самок, 12 для самцов), что согласуется с данными Чепурной и Рекова (2017). Средняя масса особи в возрасте созревания ( $W_M$ ) оценена как 17 кг.

Отметим, что в модели DAP ведутся расчёты для двух периодов: первый период, выбранный для настройки модели (1981–1999 гг.), второй — прогнозный (2021–2050 гг.). Как правило, в условиях моратория на промысел между этими периодами существует промежуток лет, для которого запас моделью не оценивается.

Поскольку оценка запаса методом учётных съёмов проводится не в начале года, а в некотором месяце  $m$ , выполнен пересчёт модельного ряда  $B_y$  к моменту проведения съёмки; биомасса запаса в месяце  $m$  года  $y$  рассчитывается по уравнению:

$$B_{my} = B_y + (B_{y+1} - B_y) \frac{m}{12}. \quad (3)$$

Вторая подмодель рассматривает разные сценарии управления запасом для прогнозного периода. Расчёты биомассы половозрелой части запаса для

прогнозного периода выполняются по тому же уравнению (2) с тем же набором оптимальных значений коэффициентов ( $\varphi_M$ ,  $rr$ ), но для него теперь требуется задать биомассу запаса для предыдущего 2020 г., для которого съёмка показала близкую к нулю величину, потому принято  $B_{0(2020)} = 0$ .

В прогностической подмодели исследованы 24 сценария восстановления запаса, рассматривающие разные сочетания двух управляющих параметров:  $N_{juv, y-14}$  — численность выпуска молоди с ОРЗ с временным лагом, равным возрасту созревания 14 лет;  $biuu-coef$  — доля ННН-уловов от биомассы запаса в начале каждого года. До 2020 г. включительно объём выпуска молоди ( $N_{juv}$ ) известен (данные официальной статистики ОРЗ). Начиная с 2021 г. для каждого сценария задаётся постоянное значение  $N_{juv}$ , которое начиная с 2035 г. будет определять величину биомассы рекрутов ( $B_{rec}$ ) согласно формуле (1). В разных сценариях рассматриваются четыре уровня  $N_{juv}$  в прогнозный период: 3 млн экз. — наблюдаемый среднемноголетний уровень выпуска; 5 млн экз. — оптимистичный вариант сценария выпуска; 1 млн экз. — депрессивный вариант сценария; 7 млн экз. — максимально наблюдаемый показатель в ретроспективный период.

Значения коэффициента  $biuu-coef$  задаются в диапазоне от 1 до 20% биомассы запаса на начало

года — 1, 5, 7, 10, 15, 20%, что не превышает значений этого параметра в ретроспективный период (20%).

Для проверки надёжности построенной модели выполняли процедуру диагностики — тест чувствительности модели. Тест чувствительности позволяет оценить возможные отклонения локальных оптимумов от глобального оптимума оценок параметров модели (биомассы запаса, биомассы пополнения, промысловой убыли), что может приводить к ошибкам при выборе оптимального набора значений ( $\varphi_M$ ,  $rr$ ,  $B_0$ ). Тест неопределённости позволяет оценить возможные отклонения оценок биомассы запаса из-за неопределённости расчётных оценок промысловой убыли в ретроспективный период.

При выполнении теста чувствительности из всех наборов значений трёх параметров ( $\varphi_M$ ,  $rr$ ,  $B_0$ ) случайным образом выбирали 75% наборов. Далее для каждого выбранного набора значений ( $\varphi_M$ ,  $rr$ ,  $B_0$ ) выполняется повторный пересчёт всех характеристик запаса (биомассы запаса и пополнения, промысловой убыли), после чего полученные оценки для каждого расчётного года ( $y$ ) упорядочиваются по возрастанию и для каждого года определяются медианные оценки и доверительные 95%-ные интервалы. Полученные интервалы являются оценками возможной степени разброса истинной величины запаса из-за возможной неточности параметризации модели. Процедура теста чувствительности выполняется как итеративная процедура метода Монте-Карло. Полученные медианные оценки и доверительные интервалы сравниваются с модельными оценками, полученными при генеральном оптимуме ( $\varphi_M$ ,  $rr$ ,  $B_0$ ) для определения степени надёжности оценок запаса.

Тест неопределённости динамической системы запас—промысел к фактору изменчивости промысловой убыли (этот тест особенно важен из-за неопределённости оценок ННН-изъятия) выполнен в соответствии с процедурой тестирования моделей в организациях ICES/FAO (FAO, 1996, 2002). Суть процедуры заключается в оценке возможной степени вариативности величины запаса в зависимости от того, какая изменчивость промысловой убыли наблюдалась в ретроспективный период. При помощи данного теста выполняется прогноз возможных изменений биомассы запаса в будущем в зависимости от того, что наблюдалось в прошлом для динамической системы запас—промысел. В качестве оценки вариативности используется значение стандартного отклонения из ряда оценок промысловой убыли в ретроспективный период, после чего с помощью коэффициента вариации эта величина пересчитывается на шкалу оценок биомассы запаса. На основе полученных оценок вариации и известных величин средних значений биомассы запаса в ретроспективный период генерируются псевдослучайные ряды оце-

нок биомассы запаса. Полученные ряды псевдослучайных значений сортируются по возрастанию, после чего рассчитываются 95%-ные доверительные интервалы.

Хотя промысловое изъятие русского осетра в прогнозный период не предвидится, тем не менее в работе моделируется допустимое изъятие для целей научных исследований (НИР) и искусственного воспроизводства (далее — ОДУ НИР). Оценка ОДУ НИР выполнена из соображений поиска такой величины изъятия, которая не может оказать существенного влияния на половозрелую часть запаса в прогнозный период. Для этого, исходя из результатов теста неопределённости при базовом сценарии прогноза ( $biuu-coef = 0.1$ ,  $N_{juv} = 3$  млн экз), вычисляется определённая доля от ширины доверительного интервала оценки биомассы запаса. Этот диапазон описывает вероятную степень изменчивости величины запаса за каждый год. Полагаем, что небольшая доля изъятия от этого диапазона не должна значительно повлиять на биомассу запаса в прогнозном периоде.

Для определения незначимой доли ОДУ НИР тестировали несколько уровней доли от диапазона неопределённости (1, 5, 10, 50, 100%) и вывод о незначимости влияния ОДУ НИР делали на основе исследования его влияния на период достижения целевого ориентира управления ( $B_{tr}$ ). Незначимым считался такой уровень воздействия, при котором период достижения целевого ориентира увеличивался не более чем на 1 год.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполнения процедуры поиска оптимального решения по входным данным за период с 1981 по 1999 г. получены оценки трёх основных параметров модели (табл. 1). На основе найденных оптимальных значений параметров модели выполнен расчёт биомассы рекрутов и запаса (рис. 2) по уравнениям (1)–(3) для ретроспективного периода. Рост коэффициента промысловой убыли (рис. 2в) в конце периода настройки модели связан как с высокими оценками нелегального изъятия (рис. 1), так и с резким снижением биомассы запаса. Для диагностики результатов моделирования выполнены тесты чувствительности (рис. 3) и неопределённости (рис. 4).

Анализ динамики запаса русского осетра, полученной в ретроспективный период настройки модели (рис. 2а), показал, что в течение благоприятного для запаса периода (1988–1998 гг.) условия среды позволяли поддерживать биомассу половозрелой части популяции на уровне не менее 10000 т, поэтому в прогнозных сценариях решено рассматривать задачу восстановления запаса до этого уровня ( $B_{tr} = 10000$  т), который и считаем целевым ориентиром управления запасом и промыслом рус-

**Таблица 1.** Оценки трёх параметров модели DAP для запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря

Параметр	Стартовое значение	Заданные пределы изменения	Оптимальное значение
$\Phi_M$	0.05	0.04–0.10	0.0412
$rr$	0.01	0.005–0.020	0.0182
$B_0$ , т	6000	4000–8000	4400

ского осетра. Таким образом, при моделировании возможных прогнозных сценариев запас считается восстановленным, если его биомасса достигла величины 10000 т.

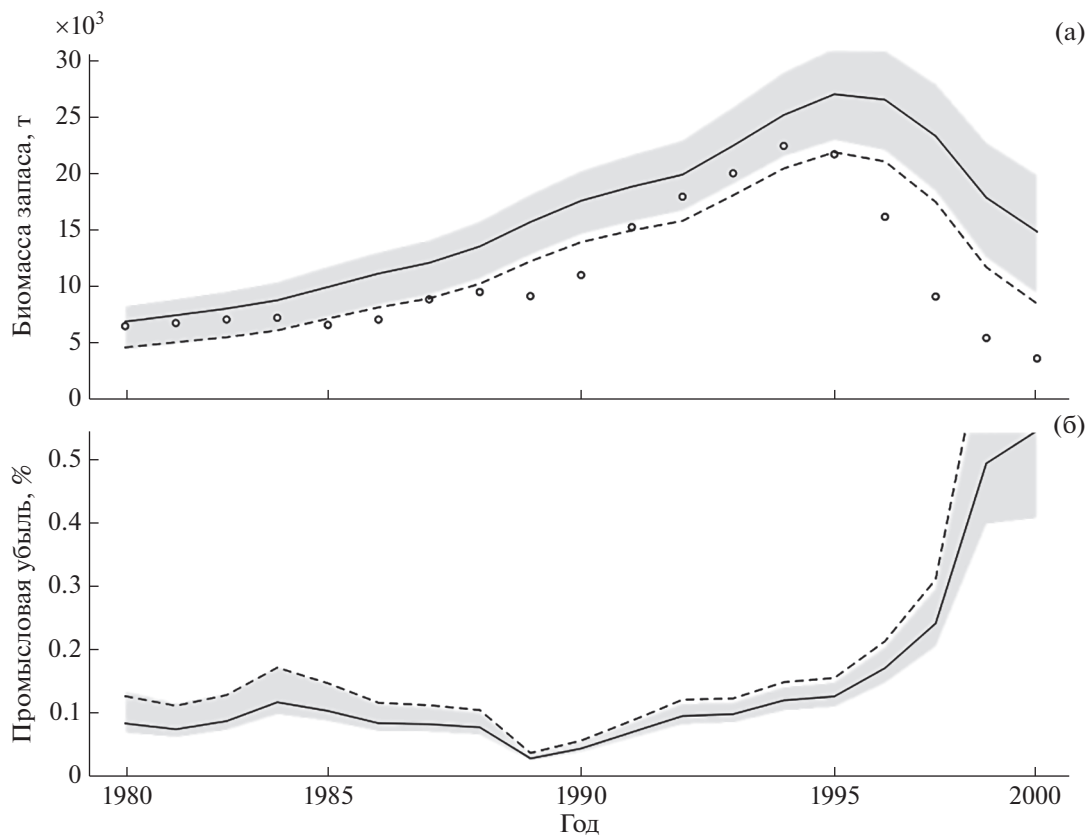
Для прогнозного периода рассмотрены 24 сценария при разном сочетании управляющих параметров: численность выпущенной с ОРЗ молоди 14 лет назад ( $N_{juv}$ ) и коэффициент  $biuu-coef$ , постоянный для всего прогнозного периода. В качестве базового (и наиболее реального) выбран сценарий, при котором рыболовные заводы ежегодно будут выпускать 3 млн особей (на уровне среднегодового выпуска в ретро периоде), а  $biuu-coef = 0.1$

(10% биомассы запаса на начало года). На рис. 5 представлены оценки половозрелой части запаса и биомассы пополнения для базового сценария. Возобновление коммерческого промысла русского осетра не рассматривается, однако на нужды научного изъятия и для формирования ремонтно-маточного стада осетровых заводов закладывается незначительное изъятие ОДУ НИР на уровне 1% от ширины доверительных интервалов, полученных в тесте неопределённости (рис. 6).

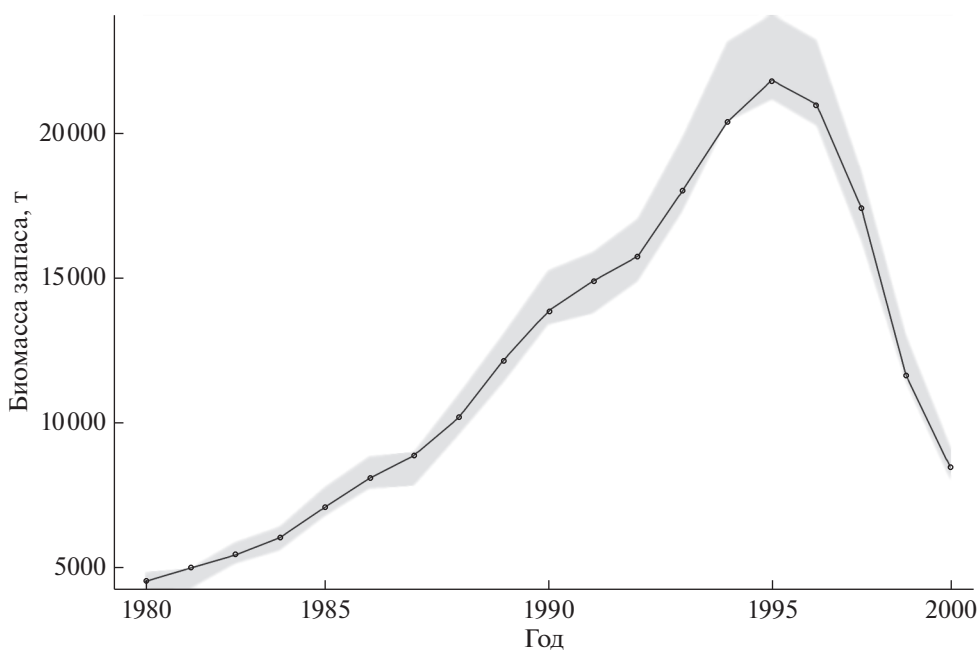
При базовом сценарии биомасса запаса достигнет целевого ориентира 10 тыс. т в 2048 г. и продолжит расти, если не изменится режим промысла



**Рис. 2.** Результаты моделирования параметров запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря в период настройки модели 1981–1999 гг.: а – биомасса запаса, б – биомасса рекрутов, в – промысловая убыль; (–) – модель DAP, (—) – данные съёмки, (···) – целевой ориентир 10 тыс. т.



**Рис. 3.** Тест чувствительности оценок биомассы запаса (а) и промысловой убыли (б) русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря, метод Монте-Карло в период настройки; (- -) – оценки по модели при глобальном оптимуме, (—) – медианные оценки после процедуры Монте-Карло, (■) – доверительные интервалы ( $p = 0.95$ ) медианных оценок, (○) – прямые оценки половозрелой части запаса по данным учётных съёмов.



**Рис. 4.** Тест неопределённости оценок биомассы запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря к изменчивости его промысловой убыли в период настройки; обозначения см. на рис. 3.

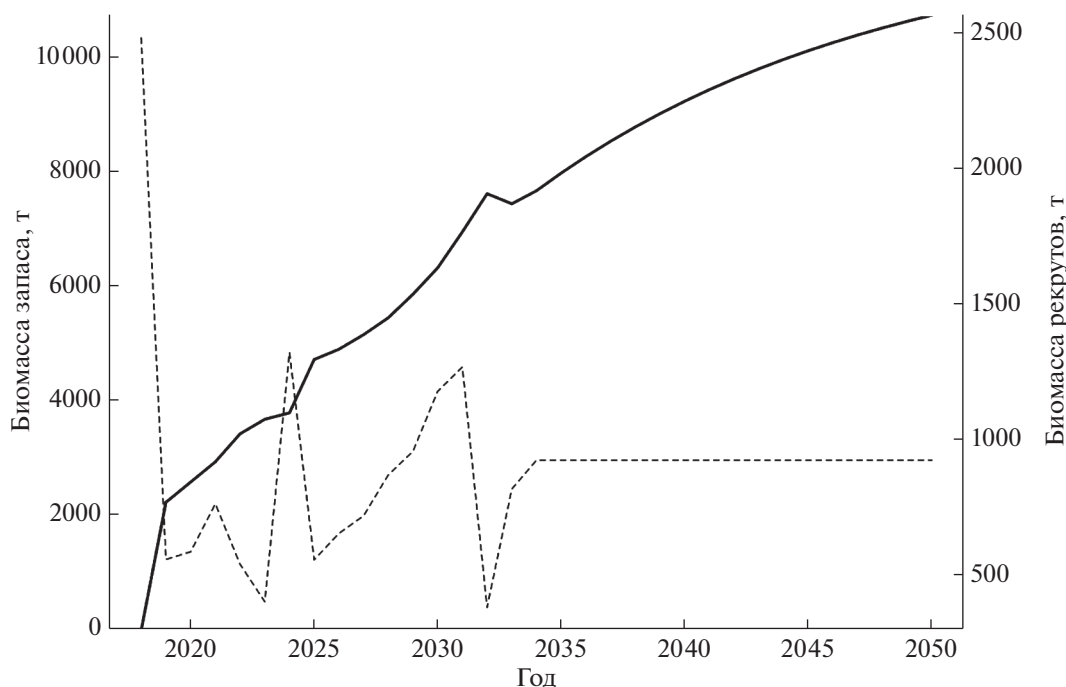


Рис. 5. Результаты прогнозирования динамики биомассы запаса (—) и пополнения (- -) русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря по базовому сценарию в 2018–2050 гг.

(рис. 5). Биомасса пополнения начиная с 2035 г. стабилизируется на уровне 931 т при фиксированном годовом выпуске с ОРЗ 3 млн экз. сеголеток.

На рис. 6 представлена динамика запаса с доверительными интервалами, рассчитанными при тех же условиях, что и в ретроспективной подмодели, на основе вариативности коэффициентов промысловой убыли согласно тесту неопределённости (рис. 6б) и тесту чувствительности к стартовым параметрам на основе процедуры Монте-Карло (рис. 6а) при уровне значимости  $p = 0.95$ .

Уравнение для общего улова в прогнозный период после 2034 г. имеет вид:  $C_{total(y)} = C_y + C_{iuu-y} = C_y + biuu-coef \times B_y$ , где  $C_y$  – допустимое изъятие на цели НИР и воспроизводства на уровне, не оказывающем значимое влияние на биомассу половозрелой части запаса (рис. 7);  $C_{iuu-y}$  – объём ННН-добычи, представленный как доля биомассы половозрелой части запаса на начало года ( $C_{iuu-y} = biuu-coef \times B_y$ ).

Результаты проверки различных уровней ОДУ НИР в течение прогнозного периода показали, что незначимое смещение года достижения целевого ориентира выполняется при уровне 1% изъятия от ширины доверительного интервала оценок запаса в тесте неопределённости. Для предотвращения нарушения процесса восстановления запаса из-за неопределённости уровня ННН-изъятия было решено оценивать величину лимитирующего (максимально допустимого) значения ОДУ НИР

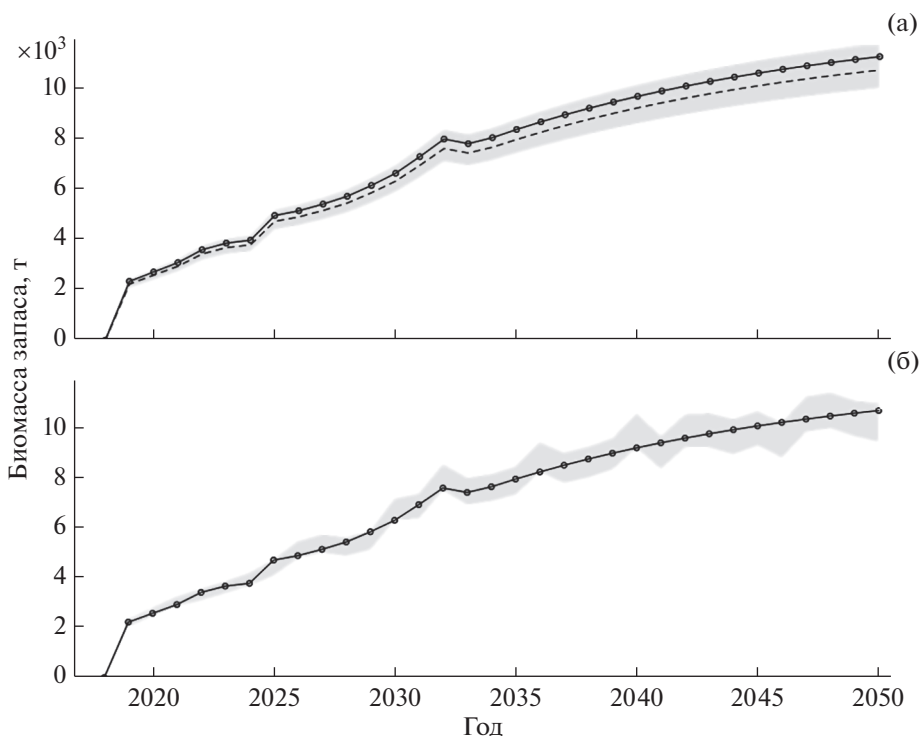
для разных сценариев с учётом возможности реализации самого худшего, депрессивного, сценария. Максимальная величина ОДУ НИР для всех сценариев зафиксирована на её максимальном вычисленном для депрессивного сценария уровне: 6.13 т ( $biuu-coef = 0.2$  и  $N_{juv} = 3$  млн экз.). Эта величина соответствует максимальному значению нелинейной функции, описывающей зависимость год–вылов в прогнозный период (рис. 7б). Полученные для базового сценария значения возможного ОДУ НИР заложены во все моделируемые сценарии в качестве величины официального изъятия ( $C_y$ ).

Три других сценария восстановления запаса при иных величинах  $N_{juv}$ , но с тем же значением  $biuu-coef = 0.1$ , что для базового сценария, представлены на рис. 8 вместе с базовым. Для этих четырёх сценариев биомасса запаса меняется одинаково вплоть до 2034 г., пока  $N_{juv}$  определяется реальными объёмами выпуска молоди.

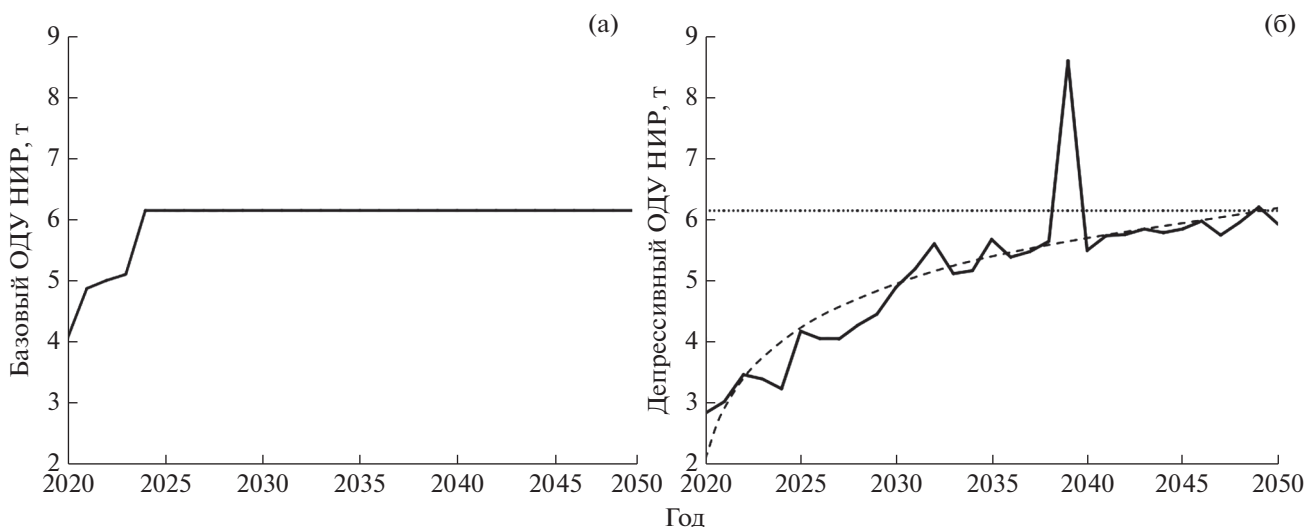
Результаты прогностической подмодели для всех 24 сценариев динамики запаса: четыре варианта численности ежегодного выпуска молоди (1, 3, 5 и 7 млн экз.) при шести вариантах значений  $biuu-coef$  (0.01, 0.05, 0.07, 0.10, 0.15 и 0.20) представлены в табл. 2

## ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования в ретроспективный период (рис. 2а) свидетельствуют о плав-



**Рис. 6.** Базовый сценарий прогноза биомассы запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря в 2018–2050 гг.: а – тест чувствительности, б – тест неопределённости; (– –) – модельные оценки биомассы запаса, (—) – медианная оценка теста; ост. обозначения см. на рис. 3.

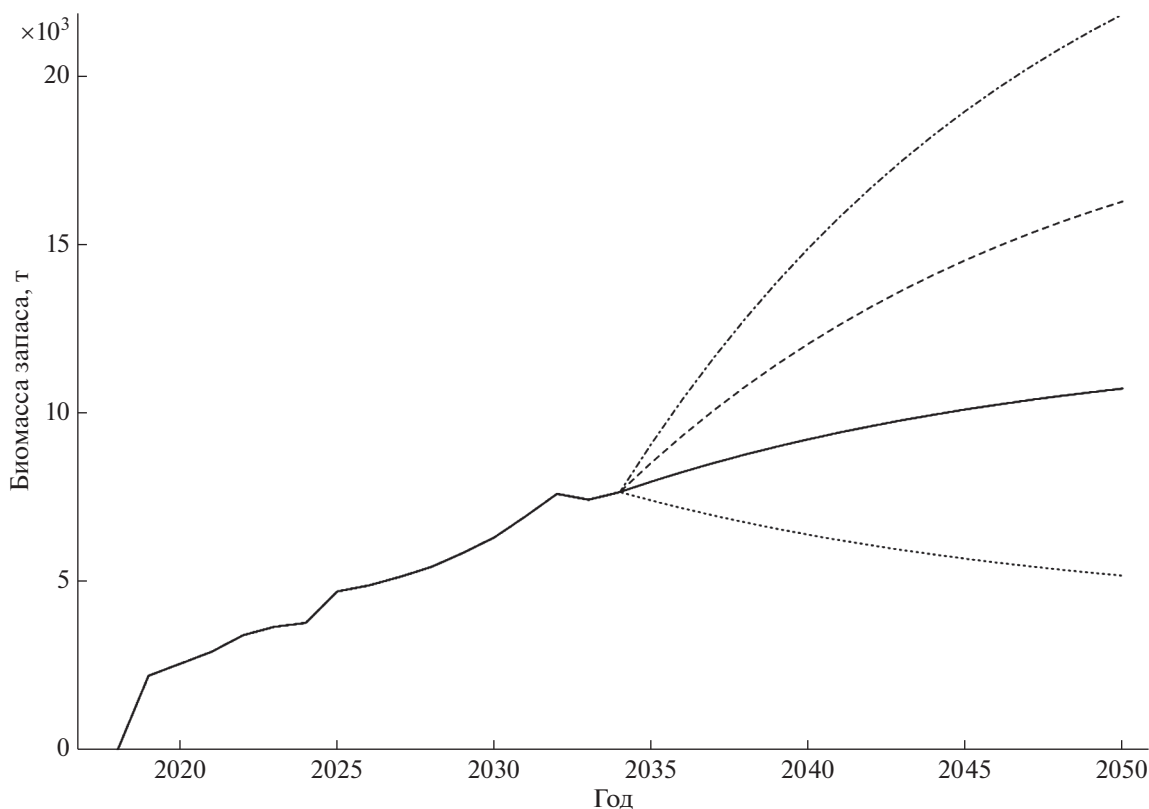


**Рис. 7.** Общий допустимый улов русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* для научных исследований и воспроизводства (ОДУ НИР) в Азовском море по результатам моделирования доли неопределённости 2020–2050 гг.: а – базовый сценарий ( $N_{juv} = 3$  млн экз.,  $biuu-coef = 0.1$ ), б – депрессивный сценарий ( $N_{juv} = 3$  млн экз.,  $biuu-coef = 0.2$ ); (—) – теоретически допустимый уровень ОДУ НИР, (····) – верхняя асимптота максимально возможной величины ОДУ НИР (6.13 т) по логарифмической кривой ( $y = 1.2664\ln(x) + 1.7869$ ,  $R^2 = 0.7559$ ), (– –) – логарифмическая аппроксимация значений биомассы запаса.

ном росте биомассы половозрелой части запаса в 1985–1995 гг., что обусловлено высокочисленными выпусками ОРЗ в предшествующий период (1971–1981 гг.). Начиная с 1995 г. отмечается стре-

мительное сокращение биомассы запаса на фоне резкого роста промысловой убыли, которая в большей степени была обусловлена объёмом ННН-изъятия в этот период.





**Рис. 8.** Четыре сценария восстановления биомассы запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря (с учётом рассчитанного изъятия для НИР и воспроизводства для базового сценария при  $biuu-coef = 0.1$ ) при разном объёме выпуска молоди после 2034 г.: (···) – 1, (—) – 3, (---) – 5, (- · -) – 7 млн экз/год.

Результаты теста чувствительности (рис. 3) указывают на удовлетворительную надёжность оценок модели, однако начиная с 1990 г. увеличивается их неопределённость: модельные значения двух оцениваемых величин (биомассы запаса и промысловой убыли) расположены вне доверительных интервалов и смещены в одну сторону от медианы. Благодаря этому тесту можно сделать существенный вывод: смещение значений трёх параметров модели относительно абсолютного оптимума в процессе настройки приводит к завышению биомассы запаса и занижению коэффициента промысловой убыли.

Результат теста неопределённости (рис. 4) также указывает на увеличение разброса вероятностных оценок после 1990 г. По-видимому, снижение надёжности настройки ретроспективной подмодели после 1990 г. обусловлено недостаточной информационной обеспеченностью величин ННН-промысла и многократным усилением с годами его воздействия на популяцию русского осетра. Также, вероятно, снижение надёжности получаемых оценок биомассы запаса, рекрутов и промысловой убыли после 1990-х гг. обусловлено неопределённостью и (или) временной изменчивостью параметров  $r$ ,  $\phi_M$  в разные модельные периоды. Пара-

метры  $r$  и  $\phi_M$  в модели полагаются неизменными. Это условие может не выполняться, однако при ограниченности данных считаем такое допущение приемлемым.

Практически все прогнозные сценарии, за исключением самых депрессивных, указывают на возможность восстановления запаса русского осетра в долгосрочной перспективе. Так, наиболее вероятный сценарий, при котором ННН-изъятие не превысит 10% биомассы запаса на начало года, а объём выпуска молоди ОРЗ останется на среднемноголетнем уровне – 3 млн экз., предполагает восстановление биомассы половозрелой части запаса до уровня 10 тыс. т к 2048 г., а при более высоком выпуске молоди (5 млн экз.) – уже к 2037 г.

При наиболее оптимистичных сценариях (при более строгом регулировании ННН-промысла и наращивании мощностей ОРЗ) возможно восстановление запаса до целевого уровня уже к 2028 г. Оптимистичными выглядят и сценарии, при которых объём выпуска молоди ОРЗ составит 7 млн экз/год – даже при величине ННН-изъятия 15% биомассы запаса возможно достижение целевого уровня  $B_{lr}$ .

Рассмотрены и более депрессивные сценарии. Так, в случае ослабления регулирования ННН-до-

**Таблица 2.** Результаты анализа 24 сценариев восстановления запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря

Объём выпуска, млн экз/год	Показатель	<i>biuu-coef</i>					
		0.01	0.05	0.07	<b>0.10</b>	0.15	0.20
3	Биомасса запаса в 2050 г., т	43150	21495	15915	<b>10749</b>	6386	4281
	Год достижения $B_{gr} = 10$ тыс. т	2029	2032	2035	<b>2048</b>	*	*
	Тренд изменения запаса	+	+	+	+	+	+
5	Биомасса запаса в 2050 г., т	55061	29854	22977	<b>16296</b>	10216	7032
	Год достижения $B_{gr} = 10$ тыс. т	2029	2032	2035	<b>2037</b>	2048	*
	Тренд изменения запаса	+	+	+	+	+	+
1	Биомасса запаса в 2050 г., т	31238	13136	8853	<b>5202</b>	2557	1532
	Год достижения $B_{gr} = 10$ тыс. т	2028	2032	*	*	*	*
	Тренд изменения запаса	+	+	–	–	–	–
7	Биомасса запаса в 2050 г., т	66973	38213	30039	<b>21843</b>	14045	9781
	Год достижения $B_{gr} = 10$ тыс. т	2028	2032	2035	<b>2036</b>	2039	*
	Тренд изменения запаса	+	+	+	+	+	+

**Примечание.** \* Целевой уровень не достигнут; тренд изменения биомассы после 2034 г.: “+” – рост, “–” – снижение; полужирным шрифтом выделены результаты сценариев, приведённых на рис. 8.

бычи (вариант  $biuu-coef = 0.20$ ) независимо от объёма выпуска молоди ОРЗ достичь целевого уровня восстановления запаса не удастся вплоть до 2050 г. При низком уровне выпуска молоди с ОРЗ (1 млн экз/год) прогноз также неблагоприятный – целевой ориентир не будет достигнут, а биомасса запаса будет постепенно снижаться.

Результаты данной работы согласуются с выводами других авторов (Чепурная и др., 2008; Чепурная, Реков, 2017; Реков, Чепурная, 2018), которые отмечают критическое состояние запаса русского осетра в Азовском море в период запрета промысла и главенствующее негативное влияние ННН-промысла, а для восстановления запаса требуется выпуск не менее 2.8 млн экз/год. Данный объём выпуска использован в базовом сценарии, рассмотренном в нашей работе. Шляхов с соавторами (2005) в качестве негативного фактора, оказывающего главенствующее влияние на биомассу запаса русского осетра, также указывают ННН-промысел.

Моделирование возможного ОДУ на цели НИР и воспроизводства указывает на возможность изъятия по мере увеличения запаса при базовом сценарии от 4.86 т в 2022 г. до 6.13 т в 2050 г. (рис. 7а). При депрессивном сценарии изъятие для НИР и воспроизводства может составить соответственно 3.46 и 5.90 т (рис. 7б). Как показали результаты моделирования, такое изъятие не окажет значимого влияния на биомассу половозрелой части запаса в рассматриваемый прогнозный период. Эта рекомендация согласуется с рекомендациями протокола “XXXII сессии Российско-украинской комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море”, в котором промысел русского осетра

запрещён, а на цели НИР и воспроизводства для Российской Федерации и Украины предлагается ОДУ соответственно 3.81 и 0.20 т. Следует заметить, что представленные рекомендации по ОДУ НИР не будут оказывать значимого влияния на динамику запаса только в рамках моделируемых сценариев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая модель ДАР может быть применима в случае, когда воспроизводство запаса обеспечивается только выпусками молоди, получаемой в условиях ОРЗ. Другим важным условием для использования модели является наличие оценок запаса и промысла в благоприятный период развития запаса до закрытия промысла. Модель ДАР может быть применена не только для запасов осетровых, но и для других видов рыб с искусственным воспроизводством.

Следует иметь в виду, что на практике сложно оценить реальную промысловую убыль из-за неопределённости уровня ННН-промысла, а тем более его изменчивости. Фактор ННН-промысла, существенно превышающий официальные величины изъятия, вносит в результаты моделирования высокую долю неопределённости. В случае, если данные по уловам представлены надёжным временным рядом, при моделировании можно избежать большой неопределённости, с которой пришлось столкнуться авторам настоящей работы.

Полученные результаты свидетельствуют о депрессивном состоянии запаса русского осетра в бассейне Азовского моря в настоящее время. Рассмотренные долгосрочные сценарии включают

как оптимистическое развитие событий, сопровождающееся ростом биомассы запаса, так и депрессивное, которое может повлечь за собой длительный коллапс популяции. Имеющиеся работы других авторов (Шляхов и др., 2005; Чепурная и др., 2008; Чепурная, Реков, 2017; Реков, Чепурная, 2018) подтверждают высокую вероятность депрессивного сценария.

Как показали результаты работы, для реализации оптимистичного сценария необходимо предпринимать более значимые административные меры по снижению уровня ННН-промысла и интенсификации деятельности по выпуску молоди ОРЗ.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность Ю.И. Рекову (АзНИИРХ) за консультации и предоставленный для выполнения данной работы материал.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаян В.К., Бобырев А.Е., Булгакова Т.И. и др.* 2018. Методические рекомендации по оценке запасов приоритетных видов водных биологических ресурсов. М.: Изд-во ВНИРО, 312 с.
- Бойко Е.Г., Калинин Е.А.* 1961. О выживании осетровой молоди разных весовых групп // Рыб. хоз-во. № 4. С. 18–22.
- Горбачева Л.Т., Горбенко Е.В., Панченко М.Г. и др.* 2020. К вопросу развития искусственного воспроизводства азовских осетровых в связи со 150-летием осетроводства России // Вод. биоресурсы и среда обитания. Т. 3. № 4. С. 111–119.  
[https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2020\\_3\\_4\\_111](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_4_111)
- Зайдинер Ю.И., Грибанова С.Э., Реков Ю.И.* 2000. Новые данные об эффективности воспроизводства осетра в Азово-Донском районе // Тез. докл. Междунар. конф. “Осетровые на рубеже XXI века”. Астрахань: Изд-во КаспНИРХ. С. 243–244.
- Козлитина С.В., Жилыкова Л.Ю., Луц Г.И., Белоусов В.Н.* 2005. Прогнозирование общего допустимого улова основных промысловых рыб Азовского моря // Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне / Под ред. Воловика С.П., Корпаковой И.Г. Краснодар: Изд-во АзНИИРХ. С. 215–231.
- Макаров Э.В.* 1964. Оценка выживания осетровой молоди, выращиваемой донскими рыболовными заводами // Тр. ВНИРО. Т. 56. С. 141–170.
- Михайлюк А.Н., Пятинский М.М.* 2020. Оценивание параметров полового созревания гидробионтов при отсутствии визуальных признаков зрелости у части половозрелых особей // Вод. биоресурсы и среда обитания. Т. 3. № 2. С. 24–29.  
[https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2020\\_3\\_2\\_24](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_2_24)
- Реков Ю.И., Корнеев А.А.* 1987. Эффективность воспроизводства и пополнение стад азовских осетровых // Воспроизводство запасов осетровых в Каспийском и Азово-Черноморском бассейнах. М.: Изд-во ВНИРО. С. 9–10.
- Реков Ю.И., Чепурная Т.А.* 2018. Основные направления восстановления промысловых запасов азовских осетровых рыб // Матер. Междунар. науч.-практ. конф. “Актуальные вопросы рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экологического мониторинга водных экосистем”. Ростов н/Д.: Изд-во АзНИИРХ. С. 211–214.
- Сафаралиев И.А., Рубан Г.И., Булгакова Т.И.* 2019. Каспийская севрюга: распределение, оценка запаса и сценарии восстановления волжской популяции. М.: Изд-во ВНИРО, 156 с.
- Чепурная Т.А., Реков Ю.И.* 2017. Изменение запасов азовских осетровых рыб в период запрета промысла // Сб. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. “Экологические проблемы. Взгляд в будущее” / Под ред. Федорова Ю.А. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ. С. 511–514.
- Чепурная Т.А., Тихонова Г.А., Реков Ю.И.* 2008. Характеристика состояния популяции азовских осетровых рыб в 2006–2007 гг. // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Ростов н/Д.: Изд-во АзНИИРХ. С. 118–124.
- Шляхов В.А., Губанов Е.П., Демьяненко К.В.* 2005. О состоянии запасов и неучтенном вылове азовских осетровых // Матер. Юбилейн. науч.-практ. конф. “Проблемы и решения в современном рыбном хозяйстве на Азовском бассейне”. Мариуполь: Рената. С. 59–61.
- Carruthers Th.R., Punt A.E., Walters C.J. et al.* 2014. Evaluating methods for setting catch limits in data-limited fisheries // Fish. Res. V. 153. № 1. P. 48–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.12.014>
- Dick E.J., MacCall A.D.* 2011. Depletion-based stock reduction analysis: a catch based method for determining sustainable yields for data-poor fish stocks // Fish. Res. V. 110. № 2. P. 331–341.  
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2011.05.007>
- FAO. 1996. Precautionary approach to fisheries, part 2: scientific papers // FAO Fish. Tech. Pap. № 350. Pt. 2. Rome: FAO, 210 p.
- FAO. 2002. A fishery manager’s guidebook: management measures and their application // Ibid. № 424. Rome: FAO, 231 p.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Ye Y., Valbo-Jørgensen J.* 2012. Effects of IUU fishing and stock enhancement on and restoration strategies for the stellate sturgeon fishery in the Caspian Sea // Fish. Res. V. 131–133. P. 21–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.06.022>