

**ПРИМЕНЕНИЕ КОГОРТНОЙ МОДЕЛИ
ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ С УЧЁТОМ
ПРИЁМНОЙ ЁМКОСТИ ВОДОЁМА НА ПРИМЕРЕ
РУССКОГО ОСЕТРА АЗОВСКОГО МОРЯ**

© 2025 г. С.Н. Кульба¹ (spin: 9179-1125), М.М. Пятинский¹ (spin: 9500-3502),
А.В. Мирзоян^{1,2}, В.А. Бизиков² (spin: 3272-0808),
Д.Ф. Афанасьев² (spin: 8155-6030), В.А. Лужняк¹ (spin: 5596-4703),
Д.Г. Битютский² (spin: 7694-4898)

1 – Азово-Черноморский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО,
Россия, Ростов-на-Дону, 344022

2 – ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО, Россия, Москва, 105187
Email: pyatinskiytm@azniir.kh.vniro.ru

Поступила в редакцию 12.09.2024 г.

Представлен подход к когортному моделированию популяций рыб в условиях искусственного воспроизводства с учётом возможностей кормовой базы водоёма. Комбинированный подход к моделированию сочетает преимущества традиционного когортного моделирования динамики численности популяции и гидробиологический подход к оценке приёмной ёмкости водоёма. Апробация представленного подхода выполнена на основе данных о популяции русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* в Азовском море в период 1985–2003 гг. Представленная модель позволила надёжно описать динамику промыслового запаса популяции русского осетра в ретроспективе и имела значительное преимущество (R^2 выше на 0,1, средняя абсолютная ошибка ниже на 6,2 %) относительно ранее представленной модели DAP.

Ключевые слова: когортная модель, приёмная ёмкость, корм, русский осётр, Азовское море.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие рост мирового потребления рыбной продукции обеспечивается преимущественно за счёт аквакультуры (Петушкова, 2022). В 2024 г. объёмы продукции аквакультуры превысили объёмы промышленного рыболовства. При этом доля аквакультуры продолжает увеличиваться (ФАО, 2024). В настоящее время наиболее стремительно аквакультура развивается в Китае, Норвегии, Чили (Волкова, 2023).

В России за период 2017–2021 гг. прирост продукции аквакультуры составил более 200% относительно периода 2002–2006 гг. Рост товарной аквакультуры составил 290%, преимущественно за счёт роста продукции марикультуры (Колончин и др., 2023).

Одной из проблем развития аквакультуры внутренних водоёмов является сложность планирования объёмов выпуска молоди при зарыблении водоёмов с учётом их приёмной ёмкости. При оценке приёмной ёмкости водоёмов, как правило используют два основных подхода: исторический и гидробиологический (Шибает, Шибает, 2016).

Исторический подход базируется на использовании ретроспективных данных по динамике запасов и уловов. Из многолетних наблюдений выбирается наиболее «стабильный» участок изменения системы «запас-вылов» и по нему рассчитываются оптимальные параметры зарыбления водоёма. Недостатком такого подхода является то, что состояние среды обитания в настоящее время

может существенно отличаться от состояния, оценённого по ретроспективным данным, в результате чего могут быть искажены оценки текущего запаса и приёмная ёмкость водоёма. Кроме того, при этом подходе необходимо знать коэффициент промыслового возврата, как в настоящее время, так и в ретроспективе.

Достоинством гидробиологического подхода является то, что в нём учитываются современные параметры среды обитания, особенности питания и роста рыб. Использование этого комплексного подхода позволяет учесть большое количество параметров: численность и биомассу рыб, обитающих в водоёме, их возрастную и половую структуру, продуктивность кормовой базы, рацион питания рыб, кормовые коэффициенты и другие параметры. Однако, в данном подходе, не рассматривается многолетняя динамика популяции, а выполняется разовая оценка возможных объёмов зарыбления на один год, что может сопровождаться нарушением кормового баланса в последующие после выпуска годы и, как следствие, приводить к росту смертности и снижению темпов роста рыб. Использование в рамках гидробиологического подхода устоявшихся когортных и продукционных методов по оценке и прогнозированию динамики численности промысловых популяций (Бабаян, 2000; Бабаян и др., 2018) затруднительно, поскольку в них не рассматривается наличие искусственного воспроизводства.

Разработка метода оценки приёмной ёмкости водоёма, сочетающего возможности гидробиологического подхода и когортного моделирования популяции рыб, учитывающего не только естественное, но и искусственное воспроизводство, представляется весьма актуальной задачей. В настоящей работе описан вариант такого метода, а для его верификации выполняется сопоставление результатов моделирования динамики промыслового запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* в Азовском море в период 1985–2003 гг., полученных разработанным методом, с оценками, полученными с помощью продукционного

моделирования истощённой популяции (Булгакова и др., 2022). В указанный период проводились интенсивные исследования и был накоплен большой объём информации по структуре популяции русского осетра, величине запаса, темпам роста, состоянию кормовой базы и параметрам промысла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе используются ранее установленные закономерности динамики численности популяции N во времени t (dN/dt) на основе работ (Шибяев, 2014; Бабаян и др., 2018). В дополнение к стандартному когортному подходу, учитывая особенности искусственных популяций, авторы предлагают ряд дополнений:

- 1) расчёт численности пополнения популяции с момента выпуска сеголеток (или рыб другого возраста);
- 2) расчёт кормового баланса с учётом продукции кормовых организмов и потребления корма рыбами;
- 3) коррекцию естественной убыли и темпов роста рыб при нарушении кормового баланса.

Пусть на начало года t в водоёме обитает N_t рыб определённого вида. Эта популяция состоит из k групп (когорт) $N_{t,a}$ возраста a . Тогда:

$$N_t = \sum_{a=0}^k N_{t,a} \quad (1).$$

К концу года (на начало следующего года, $t+1$) численность рыб каждого возраста изменяется в соответствии с естественной смертностью, промысловой смертностью, естественным и искусственным воспроизводством. Принимается, что переход из одной возрастной группы в другую ($t \rightarrow t+1$) осуществляется по окончании года и все популяционные процессы (смертность, пополнение) происходят в период перехода.

Расчёт численности пополнения от естественного воспроизводства $N_{t,0+}$ выполняется на основе априорной оценки урожайности рыб (численность сеголеток на 1 кг

нерестовой биомассы) Y в возрасте a (Y_a) и биомассы когорт нерестового запаса на начало года в возрасте a ($SSB_{t,a}$) для рыб старше возраста полового созревания a_{mat} :

$$N_{t,0+} = \sum_{a_{mat}}^k Y_a \times SSB_{t,a} \quad (2).$$

В условиях наличия искусственного воспроизводства, в водоём могут быть выпущены особи различного возраста a , $N_a^{hatchery}$. Эти рыбы пополняют аналогичные возрастные когорты, обитающие в водоёме в этот год $N_a^{natural}$:

$$N_{t,a} = N_{t,a}^{natural} + N_{t,a}^{hatchery} \quad (3).$$

Переход в возрастную группу $a+1$ в момент $t+1$ сопровождается процессом экспоненциальной убыли численности рыб по причинам общей смертности. Численность рыб для каждой возрастной группы $N_{t+1,a+1}$ вычисляется по формуле:

$$N_{t+1,a+1} = N_{t,a} \times (1 - \varphi_{t,a}) \quad (4),$$

где $\varphi_{t,a}$ – общая убыль в год t для возраста a .

Общая убыль φ вычисляется из одновременно происходящих процессов естественной и промысловой убыли по формуле:

$$\varphi = \varphi_M + \varphi_F - \varphi_M \times \varphi_F \quad (5),$$

где φ_M – естественная убыль, φ_F – промысловая убыль.

Для определения объёмов потребляемой пищи всеми возрастными группами рыб за период $t \rightarrow t+1$ выполняется расчёт относительного прироста массы рыб (продукция биомассы) за этот период. Продукция биомассы рыб PB возраста a , выживших на конец года t определяется по формуле:

$$PB_{t \rightarrow t+1, a \rightarrow a+1}^{surv} = G_a \times N_{t,a} \times (1 - \varphi_{t,a}) \quad (6).$$

$$G_a = W_{a+1} - W_a \quad (7).$$

где:

G_a – индивидуальный годовой прирост массы тела рыбы в возрасте a ,

W_a – масса тела рыбы в возрасте a , определённая по результатам натуральных исследований.

Для рыб, выпускаемых в водоём в результате искусственного воспроизводства, прирост G_a зависит от навески выпускаемых рыб $W_{hatchery}$ и определяется как разница между навеской выпускаемой рыбы $W_{hatchery}$ и массой рыбы на конец года a W_{a+1} :

$$G_a = W_{a+1} - W_{hatchery} \quad \text{если}$$

$$W_{hatchery} < W_{a+1} \quad (8).$$

$$G_a = W_{hatchery} \quad \text{если}$$

$$W_{hatchery} \geq W_{a+1} \quad (9).$$

Дополнительно к вычислению продукции биомассы выживших особей за период $t \rightarrow t+1$ выполняется расчёт продукции биомассы погибших рыб $PB_{t \rightarrow t+1, a \rightarrow a+1}^{mort}$ для решения задачи оценки объёмов потребляемого корма. С целью упрощения в модели не учитывается неоднородность процессов смертности и прироста массы рыб в период $t \rightarrow t+1$ и расчёт продукции биомассы погибших в течение года рыб выполняется при допущении равномерного индивидуального прироста и равномерной убыли:

$$PB_{t \rightarrow t+1, a \rightarrow a+1}^{mort} = 0,5 \times G_a \times N_{t,a} \times \varphi_{t,a} \quad (10).$$

Тогда, общая продукция биомассы рыб $PB_{t+1, a+1}$ возраста a за период $t \rightarrow t+1$ определяется по формуле:

$$PB_{t \rightarrow t+1, a \rightarrow a+1} = G_a \times N_{t,a} \times (1 - 0,5 \times \varphi_{t,a}) \quad (11).$$

Общая продукция биомассы рыб PB_t всех возрастных групп за период $t \rightarrow t+1$ вычисляется по формуле:

$$PB_t = \sum_{a=0}^k PB_{t \rightarrow t+1, a \rightarrow a+1} \quad (12),$$

где k – максимальный возраст рыб.

Общая продукция биомассы рыб PB_t напрямую связана с доступностью кормовых объектов в водоёме. Определение объёмов потребляемых и доступных кормовых организмов (далее – КО) позволит выполнить расчёт кормового баланса для расчёта оптимальных объёмов искусственного воспроизводства и пределов ёмкости водной среды для рассматриваемой популяции рыб.

Питание рыб осуществляется в нагульный период, который зависит от вида кормовых организмов и условий среды обитания. Вычисление продукции КО P_d корма вида d выполняется аналитическим способом, в зависимости от априорных оценок удельной биомассы КО в водоёме (Методы рыбохозяйственных и природоохранных ..., 2005).

Продукция бентосных кормовых организмов, доступная для питания рыбам, P_{bentos} определяется по формуле:

$$P_{bentos} = B_{bentos} \times S \times P/B_{bentos} \times N_{vb} \times K_{ab} \times (1 - K_{cb}) \quad (13),$$

где B_{bentos} – удельная биомасса бентоса на единицу площади,

P/B_{bentos} – суточный продукционный коэффициент бентоса,

S – площадь кормового биотопа,

N_{vb} – количество суток потребления бентоса рыбами,

K_{ac} – коэффициент доступности бентоса,

K_{cb} – доля потребления бентоса конкурентами.

Для определения продукции зоопланктона $P_{plankton}$ используется формула:

$$P_{plankton} = B_{plankton} \times S \times H \times P/B_{plankton} \times N_{vp} \times K_{ap} \times (1 - K_{cp}) \quad (14),$$

где $B_{plankton}$ – удельная биомасса планктона на единицу объёма,

$P/B_{plankton}$ – суточный продукционный коэффициент планктона,

S – площадь кормового биотопа,

H – толщина кормового слоя,

N_{vb} – количество суток потребления планктона рыбами,

K_{ac} – коэффициент доступности планктона,

K_{cb} – доля потребления планктона конкурентами.

Для рыб разного возраста задаются виды потребляемого корма и допускается несколько видов корма для рыб одного возраста. При наличии нескольких видов доступного корма для одной возрастной группы кормовые предпочтения не учитываются, но при этом корм потребляется рыбами пропорционально величине доступной продукции разных кормовых организмов. При этом, доля определённого вида корма p_d вычисляется по формуле:

$$p_d = \frac{B_d}{\sum_{d=1}^n B_d} \quad (15),$$

где n – число видов потребляемого корма,

B_d – продукция биомассы для корма вида d .

Если определённый вид корма потребляется рыбами разных возрастов, то доля корма вида d доступного для потребления рыбами возраста a вычисляется согласно формуле:

$$p_{a,d} = p_d \times \frac{PB_{t,d}}{PB_t} \quad (16)$$

Биомасса доступного корма вида d для потребления рыбами в возрасте a в год t вычисляется по формуле:

$$B_{t,a,d}^{available} = p_{a,d} \times P_d \quad (17),$$

а необходимая для питания в год t биомасса корма вида d для получения продукции биомассы рыбы $PB_{t,d}$ как:

$$B_{t,a,d}^{required} = Dcoef_{a,d} \times PB_{t,d} \quad (18),$$

где $Dcoef_{a,d}$ – кормовой коэффициент для рыб возраста a и корма вида d .

При решении когортных уравнений расчёта численности рыб $N_{t,a} \rightarrow N_{t+1,a+1}$ обязательным условием является соблюдение кормового баланса, согласно которому биомасса необходимого рыбам корма не может превышать биомассу доступного корма:

$$B_{t,a,d}^{available} - B_{t,a,d}^{required} \geq 0 \quad (19).$$

В случае нарушения кормового баланса в ходе решения уравнений расчёта численности когорт, для сеголеток применяется корректирующее условие снижения их численности (повышения естественной убыли) в условиях дефицита корма:

$$\varphi_M = 1 - 0,9 \times (1 - \varphi_M) \quad (20),$$

а при нарушении кормового баланса для рыб с возрастом 1 год и старше снижается годовой прирост массы тела:

$$G_{t,a} = 0,9 \times G_{t,a} \quad (21).$$

В случае решения задачи прогнозирования динамики численности популяции, ключевым условием для определения численности выпускаемой молоди является соблюдение кормового баланса. При достижении положительного кормового баланса производится расчёт возможной численности сеголеток при искусственном воспроизводстве на конец года t за счёт выпуска рыб в возрасте a :

$$N_{t+1,a+1}^{recruit} = \sum_{f=1}^n \frac{B_{t,a,d}^{available} - B_{t,a,d}^{required}}{DCof_{a,d} \times G_a} \quad (22),$$

где n – число видов корма потребляемого выпускаемыми рыбами.

На основе вычисленной теоретически возможной численности рыб в возрасте $a+1$ в момент $t+1$ при решении уравнений кормового баланса, выполняется расчёт максимальной возможной численности выпускаемых рыб в возрасте a в год t :

$$N_{t,a}^{hatchery} = \frac{N_{t+1,a+1}^{recruit}}{1 - 0,5 \times \varphi_a} \quad (23).$$

Апробация разработанного метода моделирования популяции рыб выполнена на данных полученных за период 1985–2003 гг. для достаточно исследованной популяции русского осетра Азовского моря: опубликованы данные о возрастной структуре популяции и уловам, линейно-массовые характеристики, оценки темпов роста, естественной и промысловой смертности, а также оценки объёмов ННН-промысла, численность и навеска ежегодного выпускаемой молоди с ОРЗ (Реков, 2000; Козлитина и др., 2005; Шляхов и др., 2005; Реков, Чепурная, 2018, Мирзоян и др., 2024). В настоящее время азовская популяция русского осетра полностью утратила возможность к естественному воспроизводству вследствие зарегулирования нерестовых рек (Luzhniak, 2022), а её промышленное рыболовство запрещено начиная с 2000 г. (Васев и др., 2023). Искусственное воспроизводство осуществлялось в результате выпуска молоди осетровыми рыбободными заводами (ОРЗ). В результате к 1991–1993 гг. доля рыб искусственных генераций составляла около 95% от его промысловых уловов. В этот период популяция русского осетра была сформирована, в основном, поколениями 1973–1993 гг., полученными на осетровых рыбободных заводах, со среднегодовым количеством выпускаемой молоди 14,5 млн особей. При этом доля естественных генераций была весьма незначительна, составляя 5% по численности (Мирзоян и др., 2024).

Решение задачи моделирования в соответствии с предложенным методом выполнялось с учётом возрастной структуры популяции в 1985 г. и численности ежегодно выпускаемой молоди рыб. Естественная убыль рыб разного возраста определялась путём линейной аппроксимации оценок этого показателя, выполненных Ю.И. Рековым (2000). Следует отметить, что эти оценки естественной убыли включают в себя компонент обусловленный ННН-промыслом. Именно данным компонен-

том объясняется рост убыли по мере увеличения возраста рыб.

Проверка разработанного метода выполнена путём сравнения модельных оценок биомассы промыслового запаса (популяции в возрасте старше 12 лет) с оценками запаса продукционной модели DAP (Булгакова и др., 2022), и оценками запаса прямым учётом (Мирзоян и др., 2024). Для сравнения использовались показатель детерминации R^2 , средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) (Karunasingha, 2022):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |B_t^{survey} - B_t^{model}| \quad (24),$$

$$MAPE = \frac{MAE}{B_t^{survey}} \times 100\%$$

и анализ невязок оценок промысловой биомассы, полученных с помощью этих двух моделей относительно оценок прямого учёта (Jemna et al., 2020).

Данные по биомассе и продукции зообентоса Азовского моря для апробации модели получены на основе ежегодных съёмов, выполняемых в весенний, летний и осенний периоды на 32–64 станциях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обобщённые данные структуры популяции русского осетра Азовского моря в 1985 г., численность выпуска молоди русского осетра в возрасте сеголеток, статистика промыслового изъятия и оценки естественной убыли (с включением убыли по причинам ННН-промысла) по литературным данным представлены на рисунке 1. Репрезентативная оценка возрастной структуры популяции русского осетра выполнена в ходе учётной траловой съёмки в конце осени 1985 г. (Реков, 2000), при моделировании данная оценка была пересчитана с учётом параметров естественной смертности на начало 1986 г.

Аппроксимация показателей выживаемости по причинам, не зависящим от легального промысла ($1 - \varphi_M$), выполнена мето-

дом линейной регрессии по оценкам средней естественной смертности с включением ННН-промысла. При этом следует отметить, что смертность в период первого года жизни выпускаемой молоди оценена на уровне 95%, что хорошо согласуется с ранее выполненными исследованиями (Чепурная, 2010; Матишов, Лужняк, 2012), в которых высокая смертность осетровых на первом году жизни объясняется не избирательностью сетевого ННН-промысла частиковых рыб в Таганрогском заливе и р. Дон. Представленные результаты аппроксимации выживаемости хорошо согласуются и с выполненными ранее оценками показателя коэффициента промыслового возврата (КПВ) (Булгакова и др., 2022) – 0,6 % для особей в возрасте 12 лет.

Рассматриваемая модель показала, что в Азовском море продукция зообентоса – основного корма русского осетра многократно превышает количество корма, потребляемого рыбами. Это наиболее отчётливо проявляется в периоды повышения солёности вод Азовского моря, когда происходит сокращение ареалов нагула полупроходных бентосоядных видов рыб (тарань, лещ) и снижение запасов массовых видов бычков – основных потребителей кормового зообентоса. Это снижает пищевую конкуренцию между основными бентофагами и высвобождает для осетровых рыб дополнительный резерв из кормовых ресурсов Азовского моря (Савчук, 1975). Это справедливо как для сеголетков, потребляющих мягкий зообентос, так и для рыб старших возрастных групп, в спектр питания которых также входят и моллюски (рис. 2).

На основе входных данных, в соответствии с разработанной методикой, выполнен расчёт биомассы промыслового запаса русского осетра в условиях известной численности выпуска молоди с ОРЗ, результаты представлены на рисунке 3 в сравнении с оценками, полученными с помощью продукционной модели DAP.

Диагностика невязок оценок биомассы промыслового запаса когортной и продук-

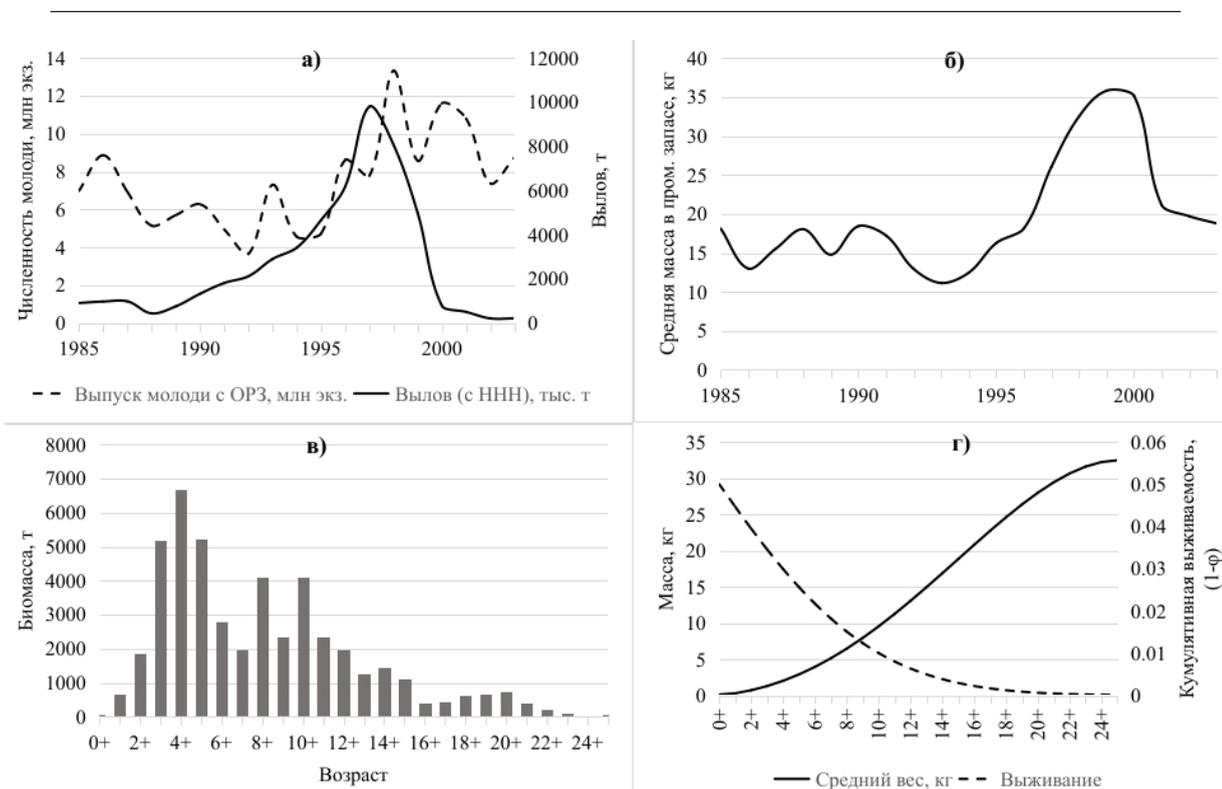


Рис. 1. Входные данные для моделирования: а) численность выпускаемой молоди (сеголеток) русского осетра с ОРЗ; б) средняя масса русского осетра в структуре промыслового запаса; в) биомасса по возрастной структуре запаса в конце 1985 г.; г) средняя масса и кумулятивная функция выживаемости ($1-\varphi_M$) русского осетра по возрастной структуре.

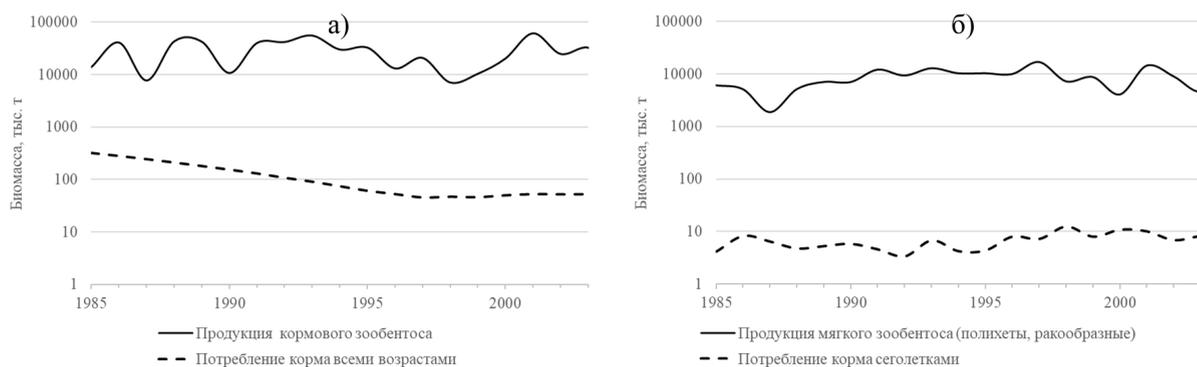


Рис. 2. Продукция зообентоса в Азовском море и потребление корма русским осетром: а) – кормовой баланс для всей популяции; б) – кормовой баланс для сеголетков.

ционной моделей относительно исторических оценок прямым учётом представлена на рисунке 4. В период 1986–1989 гг. обе модели имеют близкие значения невязок, в период 1991–1993 гг. невязки меньше для производственной модели, а в период 1996–2000 гг. невязки когортной модели значительно меньше, чем невязки производственной модели.

Моделирование динамики биомассы промыслового запаса популяции русского осетра Азовского моря в ретроспективный период 1985–2003 гг. с помощью предложенной когортной модели удовлетворительно согласуются с оценками прямым учётом: доля дисперсии биомассы, объясняемая рассматриваемой моделью, (R^2 – коэффициент детерми-

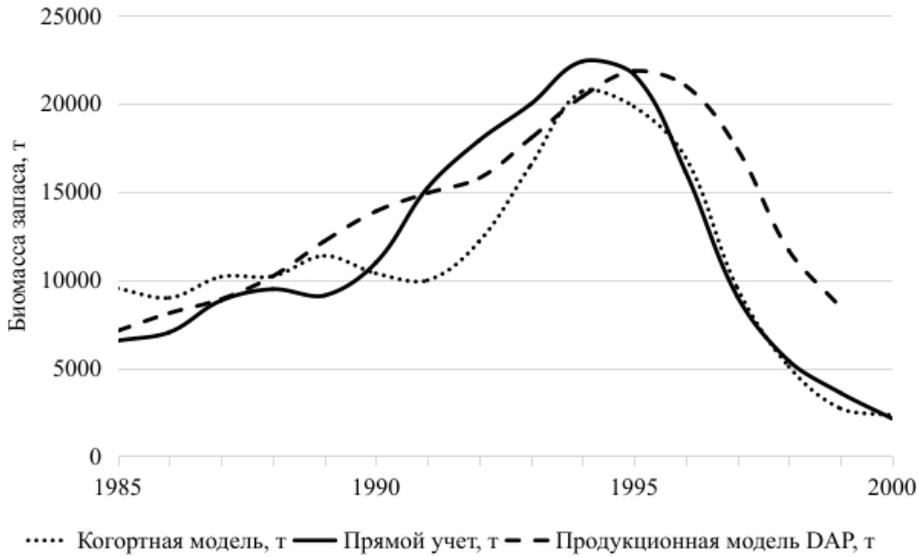


Рис. 3. Оценки биомассы промыслового запаса русского осетра в Азовском море: разработанной когортной моделью, производственной моделью DAP и методом прямого учёта.

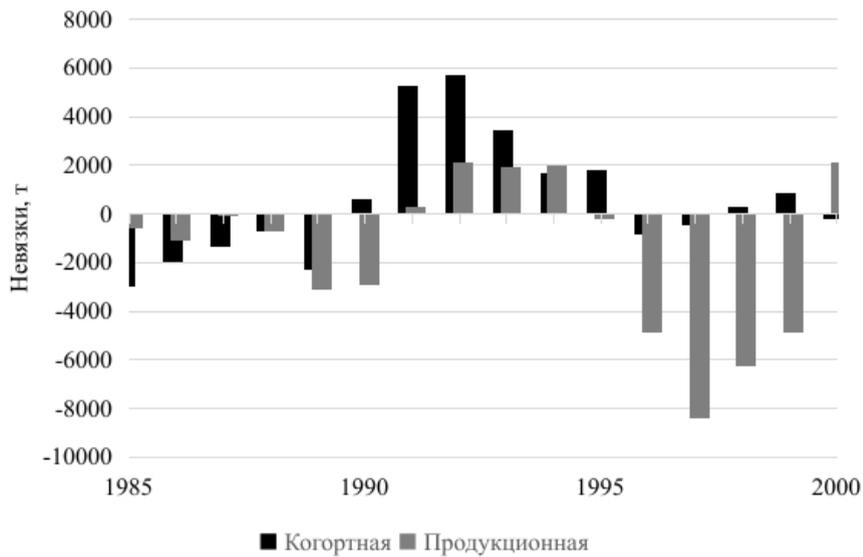


Рис. 4. Диагностика невязок когортной и производственной моделей оценки биомассы промыслового запаса популяции русского осетра Азовского моря относительно оценок, выполненных прямым учётом.

нации) составила 0,83, средняя абсолютная ошибка – 1 908 т, а средняя абсолютная процентная ошибка – 16,5%. В целом когортная модель лучше согласуется с данными прямого учёта в сравнении с производственной моделью DAP:

– когортная модель относительно прямого учёта: $R^2 = 0,83$, $MAE = 1\,908$ т, $MAPE = 16,5$;

– производственная модель DAP относительно оценок прямого учёта: $R^2 = 0,73$, $MAE = 2776$ т, $MAPE = 22,7$.

ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании динамики популяций рыб приходится сталкиваться с различными сочетаниями наличия или отсутствия ряда факторов: естественное и искусствен-

ное воспроизводство, недостаточная приёмная ёмкость водоёма, пресс со стороны рыб-конкурентов, легальный и ННН-промысел. Популяция русского осетра Азовского моря в период 1985–2003 гг. характеризовалась отсутствием естественного воспроизводства, наличием искусственного зарыбления, а также избыточной кормовой базой в нагульном водоёме – Азовском море (рис. 2). Фактически эта популяция превратилась в объект пастбищной аквакультуры при наличии интенсивного легального и ННН-промысла, в условиях которого (ННН-промысла) невозможно напрямую использовать традиционные когортные и продукционные модели. Для моделирования такой популяции рыб представляется возможным использовать предложенную когортную модель или продукционную модель DAP (Булгакова и др., 2022), в которых учитывается вклад искусственного воспроизводства и ННН-промысла.

При сравнении диагностики представленной когортной модели на выбранном ретроспективном периоде с ранее разработанной продукционной моделью DAP, когортная модель показывает более надёжное описание динамики запаса: R^2 когортной модели выше на 0,1 (10%), а абсолютная процентная средняя ошибка ниже на 6,2%. При этом следует отметить значительное преимущество когортной модели при описании динамики биомассы промыслового запаса в период роста показателей ННН-промысла – 1996–2000 гг. (рис. 3, 4). Такое преимущество можно объяснить тем, что в когортной модели коэффициент естественной убыли зависит от ННН-промысла (растёт с увеличением возраста рыб), а в продукционной модели этот показатель является константой, не зависящей от возраста.

Дополнительным преимуществом представленного когортного подхода относительно продукционной модели при решении задачи ретроспективного моделирования и построения прогноза является отсутствие необходимости процедуры оптимизации и параметризации генерального уравнения и возможность

рассмотрения возрастной структуры популяции в отдельные моменты вектора времени для определения оптимальных параметров организации промысла. При этом робастность подхода, в условиях отсутствия процедуры оптимизации, не утрачивается.

Разработанная когортная модель подтвердила отсутствие ограничений продукции биомассы русского осетра в Азовском море, обусловленных ростом смертности и снижением темпов роста при недостатке корма, поскольку продукция кормовых организмов значительно превышала количество корма, необходимого для питания популяции русского осетра в период исследования (рис. 2). Такой результат хорошо согласуется с представлением об отсутствии лимитирующих показателей кормовой базы для русского осетра в Азовском море (Коркош, Проненко, 1996). С учётом параметров среды обитания в период 1985–2003 гг. теоретически был возможен единоразовый выпуск от 2 до 12 млрд экземпляров молоди осетра. Однако, обилие корма в Азовском море для русского осетра не позволило проверить робастность модели в условиях кормовых ограничений, фактически проверялось только воздействие факторов искусственного зарыбления и промысла. Следует заметить, что прогнозирование сценариев зарыбления, особенно при лимитирующей кормовой базе, это отдельная задача, которая будет рассмотрена в дальнейших работах по апробации разработанного метода при решении задач аквакультуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный подход к когортному моделированию динамики численности популяции в условиях наличия искусственного воспроизводства показал свою состоятельность при апробации на ретроспективных данных. При тестировании относительно продукционной модели DAP отмечена более высокая детерминация модели (на 0,1) и более низкие значения средней абсолютной ошибки

(на 6,2%) относительно исторических оценок запаса.

Исследование подтвердило способность разработанной когортной модели учитывать влияние искусственного воспроизводства и ННН-промысла на динамику популяции русского осетра Азовского моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабаян В.К. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ): Анализ и рекомендации по применению. М.: ВНИРО, 2000. 190 с.

Бабаян В.К., Бобырев А.Е., Булгакова Т.И., Васильев Д.А. и др. Методические рекомендации по оценке запасов приоритетных видов водных биологических ресурсов. М.: ВНИРО, 2018. 312 с.

Булгакова Т.И., Кульба С.Н., Пятинский М.М. Моделирование сценариев восстановления запаса русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* Азовского моря при отсутствии естественного воспроизводства // *Вопр. ихтиологии*. 2022. Т. 62. № 2. С. 198–208.

Васев А.Б., Лужняк В.А., Баринова В.В. и др. Результаты исследований азовских популяций осетровых рыб при осуществлении мониторинга промысла ставными орудиями лова у кубанского побережья // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2023. Т. 6. № 4. С. 68–78.

Волкова А.Р. Перспективы рыболовства и аквакультуры в современном мире: оценка и анализ // *Материалы VI Национальной научно-технической конференции: Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации*. 2023. С. 12–16.

Козлитина С.В., Жилиякова Л.Ю., Луц Г.И., Белоусов В.Н. Прогнозирование общего допустимого улова основных промысловых рыб Азовского моря // *Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне* / Под ред. С.П. Воловика, И.Г. Корпаковой. Краснодар: Изд-во АзНИИРХ, 2005. С. 215–231.

Колончин К.В., Труба М.А., Кузичева Н.Ю. Тенденции развития аквакультуры в России:

перспективы качественного улучшения продовольственной безопасности и устойчивого роста экономического потенциала отрасли // *Продовольственная политика и безопасность*, 2023. Т. 10. № 3. С. 533–546.

Коркош В.В., Проненко С.М. Некоторые особенности темпа роста осетровых рыб Азовского и Черного морей // *Тр. ЮгНИРО*. 1996. Т. 42. С. 140–145.

Матишов Г.Г., Лужняк В.А. Особенности выживаемости заводской молоди осетровых рыб в условиях Азовского бассейна // *Вестник южного научного центра РАН*. 2012. Т. 8. № 4. С. 76–80.

Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне / под ред. С.П. Воловика, И.Г. Корпаковой. Краснодар: Просвещение-Юг, 2005. 351 с.

Мирзоян А.В., Лужняк В.А., Белоусов В.Н. Проходные осетровые рыбы Азовского моря в условиях природных и антропогенных трансформаций водной экосистемы // *Тр. ВНИРО*, 2024. Т. 196. С. 107–123.

Петушкова В.В. Аквакультура – «второй хлеб» Китая // *Экономические и социальные проблемы России*, 2022. № 2 (50). С. 159–174.

Реков Ю.И. Динамика численности и структура популяции азовского осетра в условиях изменяющегося режима моря: Авторефер. дис. канд. биол. наук. Москва, 2000. 24 с.

Реков Ю.И., Чепурная Т.А. Основные направления восстановления промысловых запасов азовских осетровых рыб // *Матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экологического мониторинга водных экосистем»*. Ростов на/Дону.: Изд-во АзНИИРХ, 2018. С. 211–214.

Савчук М.Я. Питание осетровых рыб при современном режиме Азовского моря // *Тр. ВНИРО*. 1975. Т. 109. С. 164–181.

ФАО. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры – 2024. «Голубая трансформация» в действии. Рим, 2024. 232 с.

Чепурная Т.А. Эколого-биологическое обоснование и особенности подращивания молоди

осетровых в садках в Азовском море: Автореф. дис. канд. биол. наук Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2010. 24 с.

Шибает С.В. Промысловая ихтиология 2-е изд., перераб. Калининград: Аксиос, 2014. 535 с.

Шибает С.В., Шибает Л.В. К методике оценки приёмной ёмкости и промыслового возврата при искусственном воспроизводстве сига (*Coregonus lavaretus* L.) Куршского залива // Вестник рыбохозяйственной науки. 2016. Т. 3. № 2. С. 4–17.

Шляхов В.А., Губанов Е.П., Демьяненко К.В. 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, 2005. С. 59–61.

Jemna J.H., Lesisi K.E., Akpan E.A., et al. Improving the Performance of Linear Regression Model: A Residual Analysis approach // GSJ. 2020. V. 8. Issue 10. P. 212–222.

Karunasingha D.S.-K. Root mean square error or mean absolute error? Use their ratio as well // Information Sciences. 2022. V. 585. P. 609–629.

Luzhniak V.A. Population Dynamics of Sturgeon Fish (Acipenseridae, Acipenseriformes) in the Sea of Azov // J. Ichthyol. 2022. V. 62. No. 7. P. 1404–1418.

**APPLICATION OF A COHORT MODEL
OF THE POPULATION DYNAMICS BASED
ON RESERVOIR CARRYING CAPACITY ON THE EXAMPLE
OF THE RUSSIAN STURGEON OF THE SEA OF AZOV**

© 2025 г. S.N. Kulba¹, M.M. Pyatinsky,¹ A.V. Mirzoyan^{1,2},
V.A. Bizikov², D.F. Afanasiev², V.A. Luzhnyak¹, D.G. Bitvutsky²

*1 – Азово-Черноморский филиал ГИЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО,
Россия, Ростов-на-Дону, 344022*

2 – ГИЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО, Россия, Москва, 105187

The new approach to cohort modeling of fish populations in conditions of artificial reproduction, taking into account the possibilities of the reservoir's food supply, was presented. The combined modeling approach includes the advantages of traditional cohort modeling of population dynamics and a hydrobiological approach to assessing the carrying capacity of a reservoir. The approbation of the presented approach was carried out by the Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* population data in the Sea of Azov during the period 1985–2003. Results approbation of the presented model made it possible to reliably describe the dynamics of the commercial stock of the Russian sturgeon population in retrospective and has a significant advantage (R^2 was 0,1 higher, the mean absolute error was lower on 6,2%) relative to the previously presented DAP model.

Keywords: cohort model, carrying capacity, food, sturgeon, Azov Sea.