

ДИСКУССИИ

УДК 639.3 (571.64)

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ
ПРОМЫСЛОВОГО ВОЗВРАТА ПРИ ИСКУССТВЕННОМ
ВОСПРОИЗВОДСТВЕ ВОДНЫХ БИОРЕСУРСОВ**

© 2018 г. С.В. Шибаев

*Калининградский государственный технический университет, 236022
E-mail: shibaev@klgtu.ru*

Поступила в редакцию 20.02.2017 г.

Рассматривается математическая модель оценки эффективности искусственного воспроизводства водных биоресурсов, которая характеризуется показателем промыслового возврата. Предложено интерпретировать промысловый возврат как выживаемость молоди с момента выпуска в водоем до возраста пополнения при вступлении в промысловый запас. Интерпретация данного показателя как промыслового улова, получаемого за счет искусственного воспроизводства, не может служить характеристикой эффективности искусственного воспроизводства, так как зависит в значительной степени от интенсивности промысла. В основу расчета промыслового возврата положена модифицированная модель Бивертон–Холта. Динамика численности популяции описывается с помощью трех коэффициентов естественной смертности – смертности икры, личинок и сеголеток, старших рыб в возрасте более одного года. Последняя определяется методом Баранова по предельному возрасту рыбы. Входными параметрами являются предельный возраст жизни рыбы, индивидуальная абсолютная плодовитость, возраст наступления половозрелости. Естественная смертность на первом году жизни играет компенсационную роль и подбирается таким образом, чтобы сбалансировать начальный фонд икры и результирующую популяционную плодовитость. Изменение компенсационной смертности описывается экспоненциальной функцией в зависимости от массы молоди. Показано, что модель дает однозначную оценку выживаемости искусственно воспроизводимой молоди, сходную по величине с приводимой в литературе, но позволяет рассчитать искомые коэффициенты в зависимости от массы выпускаемой молоди при ясных входных условиях. Метод может использоваться для любого вида объекта искусственного воспроизводства с учетом его биологических параметров, а также с целью расчета объема затрат на компенсацию ущерба водным биоресурсам, наносимого в результате хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: искусственное воспроизводство, водные биоресурсы, промысловый возврат, эффективность воспроизводства, естественная смертность, математическая модель популяции рыбы.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с усилением внимания к развитию различных форм аквакультуры в России неизбежно встает вопрос об оценке эффективности искусственного воспроизводства рыб, которое осуществляется как на государственном уровне, так и бизнес-сообществом. Одним из показателей этого вида деятельности является промысловый возврат.

Термин «промысловый возврат» (промвозврат) широко используется как в рыболовной практике, например, при проектировании рыболовных хозяйств, так и при оценке затрат на компенсацию ущерба, наносимого водным биоресурсам в результате различных видов хозяйственной деятельности (Методика ..., 2011). Вместе с тем анализ литературы по данному вопросу показывает следующее.

1. Сущность показателя «промысловый возврат» интерпретируется не всегда одинаково. Наиболее полный его анализ провел Кожин (1951) в 1950-х гг., когда происходило становление государственной системы искусственного воспроизводства рыб. В последующем, однако, произошло смешение понятий, что внесло существенную путаницу в практику их применения.

2. Оценка величины промыслового возврата может осуществляться на основе нескольких подходов:

- путем мечения тем или иным способом выпускаемой молодежи с последующим ее отловом по достижении промысловых размеров (например, для моноциклических дальневосточных лососей с ярко выраженным хомингом);

- регистрацией изменения величины улова в связи с проведением искусственного воспроизводства (в особенности для вселенцев, например растительоядных рыб);

- на основе изучения выживаемости молодежи рыб на разных стадиях ее развития (Дементьева, 1976).

К сожалению, все эти методы могут быть применены только к ограниченному числу видов рыб, характеризуются значительной погрешностью и, кроме того, сам показатель выживаемости молодежи подвержен существенной изменчивости в межгодовом аспекте. В результате оценки промыслового возврата одного и того же вида, проведенные разными авторами, могут различаться в десятки раз. Во многих случаях даются заведомо слишком высокие или слишком низкие значения коэффициентов, при которых стабильная популяция теоретически существовать не может. В этой связи возникает вопрос о степени обоснованности использования данных коэффициентов для принятия каких-либо проектных решений или вида компенсационных мероприятий, так как все они предполагают значительные финансовые затраты.

Учитывая вышеизложенное, нам представляется целесообразной разработка некоторой универсальной методики оценки промыслового возврата в виде математиче-

ской модели, которая на основе использования стандартных ихтиологических параметров, оцениваемых в процессе мониторинга водных биоресурсов, и ясных, заранее оговоренных допущений позволяла бы получать однозначную оценку интересующего нас показателя эффективности искусственного воспроизводства.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе использована классическая модель динамики популяции Бивертон–Холта (1969) с рядом авторских модификаций, позволяющих адаптировать модель для цели оценки промыслового возврата (Шибает, 2014, 2015). Коэффициент естественной смертности определялся методом Баранова (1918) по предельному возрасту жизни рыбы.

Практическая реализация модели проводилась на основании собственных и литературных данных по биологическим параметрам некоторых видов рыб водоемов Калининградской области, перспективных для искусственного воспроизводства (Шибает и др., 2008; Шибает, 2016; Шибает С., Шибает Л., 2016).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим интерпретацию показателя «промысловый возврат», которая используется в справочной и учебной литературе (Кожин, 1951) для характеристики эффективности искусственного воспроизводства рыб, а также в нормативных документах, связанных с оценкой ущерба, наносимого водным биоресурсам.

В сельскохозяйственном энциклопедическом словаре и справочниках по рыболовству под **промысловым возвратом** понимается количество промыслового улова, которое может быть получено в течение определенного числа лет из имеющегося в данный момент количества исходных ранних стадий (икры, личинок или молодежи). Величину промыслового возврата выражают в процентах и

коэффициентах (Козлов, Абрамович, 1982, 1991; Сельскохозяйственный..., 1989).

В базовом учебнике по биологическим основам рыбоводства (Серпунин, 2009) это же содержание обозначается термином «процент промыслового возврата», в то время как понятие «коэффициент промыслового возврата» имеет совершенно другое содержание, а именно: он показывает, какое количество исходного материала необходимо иметь (икры, личинок, молоди), чтобы через определенное время в промысел вступила одна взрослая рыба.

Однако как в первом, так и во втором определениях, хотя в термине употребляется слово «промысел», собственно о промысле ничего не говорится. Вместе с тем известно, что величина улова, получаемого за счет искусственного воспроизводства, зависит не только от количества выпускаемой молоди и ее выживаемости, но и от интенсивности промысла – количества судов, рыбаков или орудий лова. Если интенсивность мала, то величина промыслового возврата будет стремиться к нулю, хотя может оказаться, что выживаемость молоди и пополнение промыслового запаса и, следовательно, сам эффект искусственного воспроизводства высокие.

Во Временной методике (1990) имеются два определения, связанных с анализируемым показателем. Первое: **промысловый возврат** от рыбоводно-мелиоративных мероприятий – уловы рыбы, ежегодно получаемые от выпуска молоди или другого рыбопосадочного материала либо обеспечиваемые теми или иными рыбоводно-мелиоративными мероприятиями. И второе: **коэффициент промыслового возврата** – отношение количества рыбы в промысловом возрасте к исходному количеству рыбопосадочного материала. Таким образом, под промысловым возвратом понимается не процент или коэффициент, а сама величина улова, а под коэффициентом подразумевается не отношение величины улова к выпуску молоди, а выживаемость выпускаемой молоди до возраста пополнения для моноциклических рыб или до среднего возраста в промысловом запасае для полициклических.

В Методике исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам (Приказ Федерального агентства по рыболовству № 1166 от 25 ноября 2011 г.) показатель улова вообще не упоминается, и понятие «коэффициент промыслового возврата» (**промысловый возврат**) отождествляется с понятием «пополнение промыслового запаса», который учитывается отдельно для икры, личинок и молоди рыб.

Совершенно очевидно, что во всех этих определениях речь идет о различных показателях – либо о величине улова, получаемого за счет искусственного воспроизводства (заметим, при неизвестном коэффициенте промысловой смертности), либо о численности или биомассе промыслового запаса, которые формируются за счет выпуска молоди, либо о количестве рекрутов, появившихся в результате выпуска молоди в водоем и доживших до возраста пополнения.

Попытаемся дать формальное выражение этих понятий. Примем базовое определение, которое будет использоваться в настоящей работе.

Промысловый возврат K_R – доля или процент рыб R , которые доживают до возраста t_r и пополняют промысловое стадо, по отношению к объему зарыбления N_a , т. е. к количеству особей, полученных в результате искусственного воспроизводства и выпущенных в водоем в некотором возрасте t_a .

$$K_R = \frac{R}{N_a}. \quad (1)$$

Очевидно, что промысловый возврат будет численно равен коэффициенту выживания молоди до возраста пополнения t_r . Обычно возраст пополнения принимается равным возрасту наступления половозрелости данного вида рыбы t_s . Это достаточно удобно, хотя не вполне правильно, так как, во-первых, пополнение промыслового стада у многих видов происходит еще до наступления половозрелости; во-вторых, непосредственно промысловое изъятие в зависимости от биологии вида может начинаться как раньше, так и позже возраста наступления половозрелости.

сти и зависит от селективности орудий лова – применяемого шага ячеи.

Возраст выпуска t_a определяется, с одной стороны, биологией вида (например, временем наступления смолтификации у лососей), а с другой – стремлением получить максимальный промысловый возврат путем выпуска молоди на стадии развития, обеспечивающей достаточную выживаемость. Очевидно, что чем старше рыба в момент выпуска, тем больше вероятность того, что она доживет до возраста пополнения t_r , но при этом и затраты на ее выращивание, естественно, будут выше. Возраст зарыбления (выпуска) t_a , как правило, изменяется в пределах от нуля (когда выпускается личинка сразу после вылупления и выдерживания) до единицы, т. е. предельного возраста сеголетки. Для некоторых видов рыб, например лососевых, растительноядных, возраст зарыбления может быть больше одного года. Здесь мы не принимаем во внимание тот факт, что в некоторых случаях слишком крупный посадочный материал за счет эффекта одомашнивания может иметь меньшую выживаемость в естественных условиях (Orlov et al., 2006; Герасимов, Васюра, 2013). Это может быть учтено отдельно.

Помимо оценки эффективности искусственного воспроизводства коэффициент промыслового возврата имеет важное значение при расчете объема компенсации ущерба, наносимого водным биоресурсам и среде их обитания в результате хозяйственной деятельности (Методика ..., 2011).

Как было указано выше, в ряде случаев в литературе используется другая терминология (Серпунин, 2009). Так, термином «процент промыслового возврата» обозначается величина промыслового возврата, рассчитанная по уравнению (1), только выраженная в процентах, а термином «коэффициент промыслового возврата» называют совершенно другой показатель – количество исходного материала (икры, личинок, молоди) N_a , которое нужно иметь, чтобы через определенное число лет в промысел вступила одна взрослая рыба. На наш взгляд, такая

терминология вносит путаницу, так как оба эти понятия близки по своей природе. В то же время так называемый коэффициент промыслового возврата представляет собой просто величину, обратную промысловому возврату, согласно уравнению (1):

$$N_a = \frac{1}{K_R}. \quad (2)$$

Ниже данная интерпретация термина не применяется, а термины «промысловый возврат» и «коэффициент промыслового возврата», выраженные в долях от единицы или в процентах, будут использоваться как синонимы.

Рассмотрим теперь случай, когда под промысловым возвратом (обозначим его как K_y) понимается не количество рыб (R), доживших до возраста пополнения t_r , а улов, который может быть получен в результате искусственного воспроизводства (Y_N):

$$K_y = \frac{Y_N}{N_a}. \quad (3)$$

При таком подходе задача существенно усложняется. Во-первых, нужно определить процент промыслового возврата (K_R) и рассчитать количество рыб, которое доживает до возраста пополнения промыслового стада (R). Затем необходимо оценить действительный коэффициент промысловой смертности, что достаточно сложно, и только после этого можно рассчитать промысловый возврат как величину улова:

$$K_y = \frac{R\varphi_F}{N_a}. \quad (4)$$

Причем, эта простая формула пригодна лишь для моноциклических рыб, например дальневосточных лососей, которые нерестятся один раз и перед нерестом могут быть отловлены. Если же рассматривать виды с длительным жизненным циклом, то для них придется оценивать величину улова на протяжении жизни поколения, полученного за счет искусственного воспроизводства. Решение этой задачи возможно только путем виртуально-популяционного анализа, хотя

бы в упрощенной модификации Державина (1922).

Наиболее узким местом данного понимания промыслового возврата является необходимость учета коэффициента промысловой смертности, о котором в приводимых выше определениях вообще не упоминается. Даже если учитывать только фактические уловы, все равно окажется, что промысловый возврат будет характеристикой не эффективности искусственного воспроизводства, а функцией интенсивности лова, которая зависит как от уровня развития добывающей базы, так и от промысловой обстановки конкретного года.

Таким образом, наиболее показательным является выражение промыслового возврата K_R как доли или процента выживших особей до момента вступления в промысловый запас. Эта величина и характеризует эффективность искусственного воспроизводства.

Для разработки формальной схемы оценки промыслового возврата в настоящей работе использована простейшая промысловая модель Бивертон-Холта (1969), которая основывается на уравнении динамики численности Баранова (1918). Основные положения данной модели и методика ее построения излагаются в существующей литературе (Бивертон, Холт, 1969; Рикер, 1979), и поэтому здесь детально не анализируются.

Рассмотрим жизненный цикл популяции. С момента нереста численность икры, а затем и количество появившихся рыб постепенно снижаются. Этот процесс может быть описан уравнением Баранова (1918) в виде:

$$N_t = N_0 e^{-Mt}, \quad (5)$$

где N_0 – начальная численность рыб в момент времени $t = 0$ (вылупление); N_t – численность рыб в возрасте t ; M – мгновенный коэффициент естественной смертности (1/год), который может быть различным для разных периодов жизни рыбы.

Данное уравнение описывает возрастную динамику численности поколения в

виде нисходящей экспоненциальной кривой выживания. Обычно для удобства уравнение (5) логарифмируется:

$$\ln N_t = \ln N_0 - Mt, \quad (6)$$

и тогда уменьшение численности рыб с возрастом в полулугарифмической системе координат описывается нисходящей прямой, удобной для анализа (рис. 1).

Предположим, что E_p – популяционная плодовитость, т. е. суммарное количество икры, которую откладывают все рыбы за один нерестовой сезон. В период инкубации, которая может продолжаться от нескольких дней у весеннерестующих видов до нескольких месяцев у осеннерестующих, происходит гибель икры за счет комплекса естественных причин, допустим, что ее величина составляет M_E . Тогда к моменту вылупления ($t = 0$) количество икры снизится и в результате начальная численность популяции составит N_0 :

$$N_0 = E_p e^{-M_E}. \quad (7)$$

Заметим, что в природе гибель икры может достигать величины, близкой к 100% (Тюрин, 1972), поэтому инкубация ее в искусственных условиях обеспечивает гораздо более эффективное воспроизводство, так как смертности икры снижается до нормативного показателя 10–30% (Козлов, Абрамович, 1991).

После рождения численность личинок, а затем и мальков не остается постоянной, а также снижается под воздействием естественной смертности. Допустим, что ее величина на первом году жизни равна M_0 , тогда согласно уравнению Баранова к концу первого года жизни численность рыб в возрасте t_1 достигает N_1 :

$$N_1 = N_0 e^{-M_0}. \quad (8)$$

Как было показано в моделях запас-пополнение (Бивертон, Холт, 1969; Рикер, 1979), величина M_0 является переменной и выполняет роль «компенсационной» смерт-

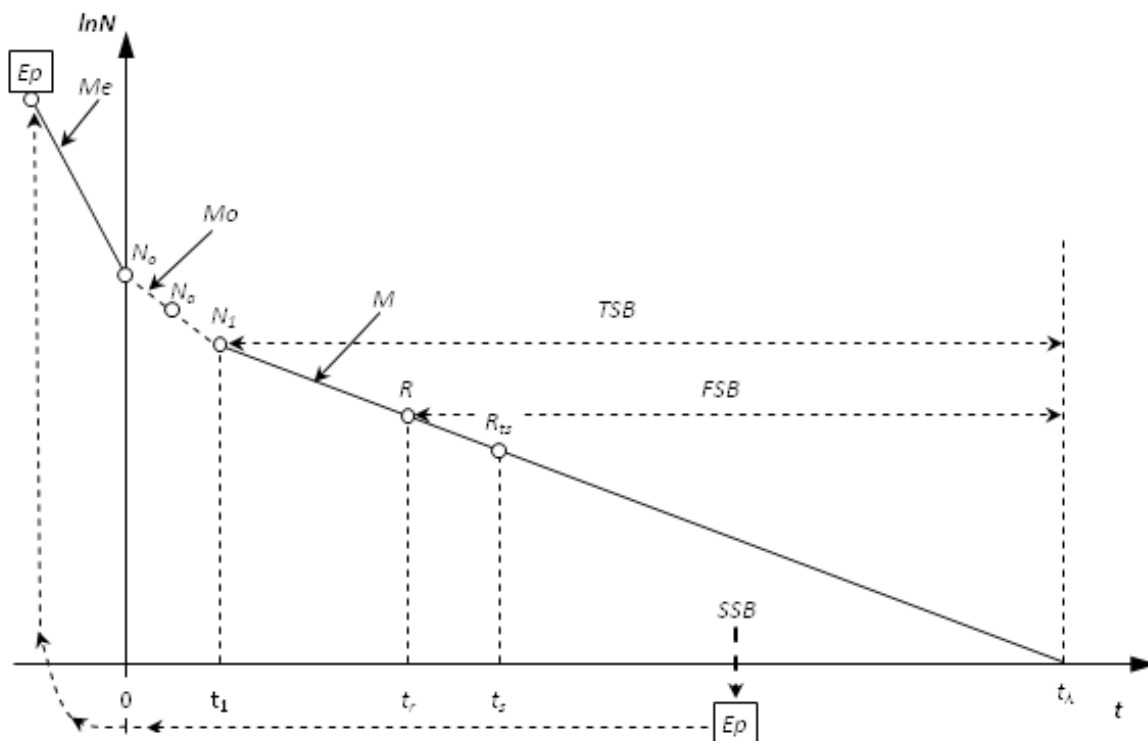


Рис. 1. Жизненный цикл популяции рыбы (обозначения см. в тексте).

ности. В случае слишком высокой численности родившейся молоди смертность повышается за счет гибели рыб из-за нехватки пищи или каннибализма, а при низкой – уменьшается в результате относительного повышения количества пищи, приходящейся на каждую рыбу, и снижения конкуренции.

Предположим далее, что после достижения возраста одного года (или несколько позже, в зависимости от биологии вида) молодь становится более жизнестойкой, и на протяжении всей жизни, вплоть до предельного возраста t_λ скорость ее естественной гибели в среднем составляет M .

В действительности это не совсем правильно, так как кривая смертности рыб обычно имеет U -образную форму (Тюрин, 1972; Никольский, 1974), минимум которой приходится на возраст, близкий к наступлению половозрелости t_s . Однако всегда можно подобрать некоторое среднепопуляционное значение естественной смертности, обеспечивающее такую же величину общего запаса, как и при U -образной кривой смерт-

ности. Тогда численность рыб в любой момент времени, начиная с одного года, можно рассчитать как:

$$N_t = N_1 e^{-M(t-1)}. \quad (9)$$

Введем обозначения.

TSB – общий запас – численность (или биомасса) рыб всех возрастов от 1 до предельного возраста жизни рыбы t_λ . В данном случае мы не включаем в общий запас сеголеток, так как предполагается, что часть своей жизни они проведут в искусственных условиях.

t_r – возраст пополнения – это возраст, в котором молодь переходит к образу жизни взрослых рыб, перемещается в район, где живут взрослые рыбы, и теоретически может быть отловлена. Фактически промысел может начинаться и позже в зависимости от селективности используемых орудий лова.

R – пополнение (рекруты) – особи, которые вступают в промысловый запас в возрасте t_r .

FSB – промысловый запас – часть популяции, которая теоретически может эксплуатироваться. Границами его являются возраст пополнения t_r и предельный возраст жизни t_λ .

t_s – возраст созревания, в котором оказываются половозрелыми 50% особей.

R_{t_s} – пополнение нерестового запаса – особи, которые достигнув половой зрелости в возрасте t_s , вступают в нерестовый запас.

SSB – нерестовой запас – часть популяции в пределах от возраста 50%-ного созревания t_s до предельного возраста t_λ .

Заметим, что для моноциклических рыб, например дальневосточных лососей, возраст пополнения t_r тождествен возрасту наступления половозрелости t_s ; для большинства морских рыб этот возраст близок или несколько меньше возраста созревания. Для пресноводных рыб возраст пополнения оказывается меньше возраста созревания, потому что из-за ограниченного пространства неполовозрелая молодь очень часто обитает вместе со взрослыми рыбами и может улавливаться.

В соответствии с уравнением Баранова все эти характеристики запаса могут быть легко определены относительно численности первой возрастной группы:

$$R = N_1 e^{-M(t_r-1)}, \quad (10)$$

$$R_{t_s} = N_1 e^{-M(t_s-1)}, \quad (11)$$

$$TSB = N_1 \frac{1 - e^{-M(t_\lambda-1)}}{M}, \quad (12)$$

$$FSB = N_1 e^{-M(t_r-1)} \frac{1 - e^{-M(t_\lambda-t_r)}}{M}, \quad (13)$$

$$SSB = N_1 e^{-M(t_s-1)} \frac{1 - e^{-M(t_\lambda-t_s)}}{M}. \quad (14)$$

Если промысел ведется с некоторой интенсивностью F , непосредственно начиная с возраста пополнения t_r , то исходя из приведенных выше уравнений величина улова Y_N может быть подсчитана как:

$$Y_N = N_1 F e^{-M(t_r-1)} \frac{1 - e^{-(M+F)(t_\lambda-t_r)}}{M+F}. \quad (15)$$

Данные уравнения представляют собой модифицированную модель Бивертон-Холта. Вывод их приводится в классических работах по теории динамики запасов рыб (Бивертон, Холт, 1969; Рикер, 1979), а также в методических руководствах (Шиббаев, 2014, 2015), и поэтому здесь не рассматривается.

Используя приведенные выше выражения, мы получаем возможность формализованного описания всех вариантов представления промыслового возврата.

Предположим, что выпуск молодежи происходит в возрасте t_a в период между вылуплением $t = 0$ и некоторым предельно целесообразным возрастом выращивания t_1 . Численность выпускаемых рыб составляет N_a . В этом случае возможны несколько вариантов расчета промыслового возврата.

1. Для моноциклических рыб величина возможного промыслового изъятия будет равна численности пополнения, и коэффициент промыслового возврата, выраженный в долях от единицы, составит:

$$K_R = \frac{R}{N_a}, \quad (16)$$

или:

$$K_R = \frac{N_a e^{-M_0 t_a} e^{-M(t_r-1)}}{N_a} = e^{-M_0 t_a - M(t_r-1)}. \quad (17)$$

Применительно к рыбам с данным типом репродуктивной стратегии коэффициент промыслового возврата окажется равным коэффициенту промыслового изъятия K_F , так как все особи после нереста в конце концов погибают, поэтому могут быть выловлены.

2. Для полициклических рыб, если за коэффициент промыслового возврата принимается величина пополнения промыслового запаса R , искомым коэффициентом будет рассматриваться по этой же формуле:

$$K_R = e^{-M_0 t_a - M(t_r - 1)}. \quad (18)$$

Однако в этом случае вылов не может быть равен коэффициенту промыслового возврата.

3. Для полициклических видов, если под промысловым возвратом подразумевается промысловое изъятие всех рыб, полученных за счет искусственного воспроизводства, уравнение (17) существенно усложнится и с учетом (10), (15), (17) будет иметь вид:

$$K_R = F e^{-M_0 t_a - M(t_r - 1)} \times \frac{1 - e^{-(M+F)(t_\lambda - t_r)}}{M + F}. \quad (19)$$

По сути дела, данное выражение позволяет рассчитать коэффициент промыслового изъятия K_y в соответствии с уравнением (4). Проблемой является оценка входящего в него коэффициента промысловой смертности F , который может различаться по годам и никак не связан с искусственным воспроизводством. С формальной точки зрения его можно принять равным (но не тождественным) оптимальному коэффициенту промысловой смертности F_{opt} , который определяется одним из известных способов (Шибаяев, 2014). Наиболее простым, хотя и не достаточно обоснованным, является подход Тюрина (1963, 1974), когда за оптимальную промысловую смертность принимается величина, равная коэффициенту естественной смертности ($F_{opt} = M$).

Учитывая изложенные выше способы расчета, нам представляется наиболее удобным характеризовать промысловый возврат через количество рекрутов R , рассчитывая его по уравнению (18), так как все другие характеристики могут быть легко выражены относительно этой величины.

С целью упрощения дальнейших расчетов примем, что возраст пополнения, который, кстати, требует специального определения, равен возрасту наступления половозрелости. Последний идентифицирован для большинства популяций. Тогда уравнение

оценки коэффициента промыслового возврата примет окончательный вид:

$$K_R = e^{-M_0 t_a - M(t_s - 1)}. \quad (20)$$

Рассмотрим условия существования стабильной популяции. Допустим, что для данного вида рыбы характерна некоторая средняя индивидуальная абсолютная плодовитость E_a . Тогда можно рассчитать количество икры, которое продуцирует популяция при данной численности и значении естественной смертности, как:

$$E_p = SSB \times S_F \times E_a, \quad (21)$$

где S_F – доля самок в нерестовом стаде.

Очевидно, что популяция может существовать в стабильном состоянии, если результирующая популяционная плодовитость, согласно уравнению (21), равна начальной, использованной для расчета исходной численности в уравнении (7). Тогда, подставляя (7), (8), (11) в (21), получим:

$$E_p = E_p e^{-M_E} e^{-M_0} S_F E_a e^{-M(t_s - 1)} \times \frac{1 - e^{-M(t_\lambda - t_s)}}{M} \quad (22)$$

и, сокращая E_p в правой и левой частях, получаем уравнение, описывающее условия существования стабильной популяции:

$$1 = e^{-M_E} e^{-M_0} S_F E_a e^{-M(t_s - 1)} \times \frac{1 - e^{-M(t_\lambda - t_s)}}{M}, \quad (23)$$

$$1 = S_F E_a e^{-(M_E + M_0 + M(t_s - 1))} \times \frac{1 - e^{-M(t_\lambda - t_s)}}{M}. \quad (24)$$

В данном уравнении входящие переменные – доля самок в нерестовом стаде S_F ,

абсолютная индивидуальная плодовитость E_a , возраст созревания t_s , предельный возраст жизни рыбы t_λ , естественная смертность старших рыб M – параметры, которые оцениваются в процессе стандартных ихтиологических исследований. Среди них наибольшую сложность вызывает определение величины естественной смертности, однако для целей настоящего исследования вполне допустимо применить упрощенные подходы, например метод Баранова (1918).

Баранов (1918) показал, что чем больше величина действительного коэффициента общей φ_Z или естественной φ_M (если промысел не ведется) смертности (%), тем меньше будет значение предельного возраста жизни рыбы t_λ . Следовательно, можно решить обратную задачу – оценить величину смертности по предельному возрасту рыбы. Баранов предложил уравнение для расчета значения действительного коэффициента общей смертности φ_Z (%) в зависимости от предельного возраста рыбы в пробе и объема выборки:

$$n = \frac{\ln \frac{a_n}{S_n \varphi_Z}}{\ln(1 - \varphi_Z)} + 1, \quad (25)$$

где n – количество возрастных групп (по сути предельный возраст); a_n – количество рыб предельного возраста; S_n – объем выборки, экз.

Данное уравнение является рекуррентным и решается методом последовательных итераций, процедура которой описана в соответствующих руководствах (Шибяев, 2015). Для удобства последующих вычислений перейдем от действительного φ_M к мгновенному коэффициенту смертности M , выразив его через базовое уравнение Баранова. Примем, что общий запас TSB включает в себя особей в возрасте от 1 до ∞ лет и его величина может быть рассчитана как:

$$TSB = N_1 \frac{1}{M}. \quad (26)$$

Представим, что из популяции берется некоторая проба объемом S_n , возрастная структура которой очевидно будет прямо про-

порционально той, которая есть в водоеме. Тогда величина пробы определяется аналогичным уравнением:

$$S_n = N_1 \frac{1}{M}. \quad (27)$$

Предположим, что в этой пробе попала хотя бы одна рыба предельного возраста t_λ , и ее численность можно рассчитать как:

$$N_{t_\lambda} = N_1 e^{-M(t_\lambda-1)} = 1 \quad (28)$$

или:

$$N_1 = \frac{1}{e^{-M(t_\lambda-1)}}, \quad (29)$$

$$N_1 = e^{M(t_\lambda-1)}. \quad (30)$$

Подставляя (29) в (27) и проводя несложные преобразования, получаем зависимость предельного возраста рыбы в пробе от ее объема S_n и смертности M :

$$t_\lambda = 1 + \frac{1}{M} \ln(S_n M), \quad (31)$$

$$M = \frac{1}{t_\lambda - 1} \ln(S_n M), \quad (32)$$

Ниже в табл. 1, 2 приведены табулированные значения предельного возраста для различных величин коэффициентов смертности и объема пробы. В случае необходимости переход от мгновенных коэффициентов к действительным осуществляется по известной формуле:

$$\varphi_M = 1 - e^{-M}. \quad (33)$$

Теоретически вместо уравнения (32) можно было бы использовать более простое выражение, получаемое из уравнения (27):

$$M = \frac{e^{M(t_\lambda-1)}}{S_n}, \quad (34)$$

однако численное решение его затруднено.

Таблица 1. Значения мгновенного коэффициента естественной смертности (M , 1/год) для различных сочетаний предельного возраста t_λ и объема выборки S_n

| t_λ , лет | Объем выборки S_n , экз. | | | t_λ , лет | Объем выборки S_n , экз. | | | t_λ , лет | Объем выборки S_n , экз. | | |
|----------------------|----------------------------|-------|-------|----------------------|----------------------------|-------|-------|----------------------|----------------------------|-------|-------|
| | 250 | 500 | 1000 | | 250 | 500 | 1000 | | 250 | 500 | 1000 |
| | Смертность M | | | | Смертность M | | | | Смертность M | | |
| 3 | 3,368 | 3,771 | 4,168 | 19 | 0,224 | 0,273 | 0,321 | 35 | 0,092 | 0,121 | 0,147 |
| 4 | 2,085 | 2,357 | 2,624 | 20 | 0,208 | 0,255 | 0,300 | 36 | 0,088 | 0,116 | 0,141 |
| 5 | 1,478 | 1,684 | 1,885 | 21 | 0,194 | 0,239 | 0,282 | 37 | 0,085 | 0,112 | 0,137 |
| 6 | 1,128 | 1,295 | 1,457 | 22 | 0,182 | 0,225 | 0,266 | 38 | 0,081 | 0,108 | 0,132 |
| 7 | 0,903 | 1,043 | 1,179 | 23 | 0,171 | 0,212 | 0,251 | 39 | 0,078 | 0,104 | 0,128 |
| 8 | 0,747 | 0,867 | 0,985 | 24 | 0,161 | 0,200 | 0,238 | 40 | 0,075 | 0,100 | 0,123 |
| 9 | 0,633 | 0,739 | 0,842 | 25 | 0,151 | 0,190 | 0,226 | 41 | 0,072 | 0,097 | 0,120 |
| 10 | 0,546 | 0,641 | 0,733 | 26 | 0,143 | 0,180 | 0,215 | 42 | 0,070 | 0,094 | 0,116 |
| 11 | 0,478 | 0,564 | 0,647 | 27 | 0,135 | 0,171 | 0,205 | 43 | 0,067 | 0,091 | 0,112 |
| 12 | 0,424 | 0,502 | 0,578 | 28 | 0,129 | 0,163 | 0,195 | 44 | 0,065 | 0,088 | 0,109 |
| 13 | 0,379 | 0,452 | 0,521 | 29 | 0,122 | 0,155 | 0,187 | 45 | 0,062 | 0,085 | 0,106 |
| 14 | 0,342 | 0,409 | 0,474 | 30 | 0,116 | 0,149 | 0,179 | 46 | 0,060 | 0,083 | 0,103 |
| 15 | 0,311 | 0,374 | 0,434 | 31 | 0,111 | 0,142 | 0,171 | 47 | 0,058 | 0,080 | 0,100 |
| 16 | 0,284 | 0,343 | 0,399 | 32 | 0,106 | 0,136 | 0,165 | 48 | 0,056 | 0,078 | 0,097 |
| 17 | 0,261 | 0,317 | 0,370 | 33 | 0,101 | 0,131 | 0,158 | 49 | 0,054 | 0,076 | 0,095 |
| 18 | 0,241 | 0,293 | 0,343 | 34 | 0,096 | 0,125 | 0,152 | 50 | 0,053 | 0,074 | 0,092 |

Таблица 2. Значения действительного коэффициента естественной смертности (φ_M , %) для различных сочетаний предельного возраста t_λ и объема выборки S_n

| t_λ , лет | Объем выборки S_n , экз. | | | t_λ , лет | Объем выборки S_n , экз. | | | t_λ , лет | Объем выборки S_n , экз. | | |
|----------------------|----------------------------|------|------|----------------------|----------------------------|------|------|----------------------|----------------------------|------|------|
| | 250 | 500 | 1000 | | 250 | 500 | 1000 | | 250 | 500 | 1000 |
| | Смертность φ_M | | | | Смертность φ_M | | | | Смертность φ_M | | |
| 3 | 96,6 | 97,7 | 98,5 | 19 | 20,0 | 23,9 | 27,4 | 35 | 8,8 | 11,4 | 13,6 |
| 4 | 87,6 | 90,5 | 92,8 | 20 | 18,8 | 22,5 | 25,9 | 36 | 8,5 | 11,0 | 13,2 |
| 5 | 77,2 | 81,4 | 84,8 | 21 | 17,6 | 21,3 | 24,6 | 37 | 8,1 | 10,6 | 12,8 |
| 6 | 67,6 | 72,6 | 76,7 | 22 | 16,6 | 20,1 | 23,3 | 38 | 7,8 | 10,2 | 12,4 |
| 7 | 59,5 | 64,8 | 69,2 | 23 | 15,7 | 19,1 | 22,2 | 39 | 7,5 | 9,9 | 12,0 |
| 8 | 52,6 | 58,0 | 62,6 | 24 | 14,8 | 18,2 | 21,2 | 40 | 7,2 | 9,6 | 11,6 |
| 9 | 46,9 | 52,2 | 56,9 | 25 | 14,0 | 17,3 | 20,2 | 41 | 7,0 | 9,2 | 11,3 |
| 10 | 42,1 | 47,3 | 52,0 | 26 | 13,3 | 16,5 | 19,3 | 42 | 6,7 | 9,0 | 10,9 |
| 11 | 38,0 | 43,1 | 47,7 | 27 | 12,7 | 15,7 | 18,5 | 43 | 6,5 | 8,7 | 10,6 |
| 12 | 34,6 | 39,5 | 43,9 | 28 | 12,1 | 15,0 | 17,7 | 44 | 6,3 | 8,4 | 10,3 |
| 13 | 31,6 | 36,3 | 40,6 | 29 | 11,5 | 14,4 | 17,0 | 45 | 6,1 | 8,2 | 10,1 |
| 14 | 29,0 | 33,6 | 37,7 | 30 | 11,0 | 13,8 | 16,4 | 46 | 5,9 | 7,9 | 9,8 |
| 15 | 26,7 | 31,2 | 35,2 | 31 | 10,5 | 13,2 | 15,8 | 47 | 5,7 | 7,7 | 9,5 |
| 16 | 24,7 | 29,0 | 32,9 | 32 | 10,0 | 12,7 | 15,2 | 48 | 5,5 | 7,5 | 9,3 |
| 17 | 23,0 | 27,1 | 30,9 | 33 | 9,6 | 12,2 | 14,6 | 49 | 5,3 | 7,3 | 9,0 |
| 18 | 21,4 | 25,4 | 29,1 | 34 | 9,2 | 11,8 | 14,1 | 50 | 5,1 | 7,1 | 8,8 |

Таким образом, неизвестными остаются две величины – смертность икры M_E и смертность личинок и молоди на первом году жизни M_0 . Проблема состоит в поиске метода оценки этих коэффициентов и их интерпретации.

Рассмотрим следующую схему. Известно, что рыбы имеют очень высокую плодовитость, и поэтому количество продуцируемой икры всегда избыточно. Следовательно, сбалансированность системы, согласно уравнению (23), должна обеспечиваться либо через коэффициент естественной гибели икры M_E , либо за счет гибели личинок и сеголеток M_0 .

Естественная гибель икры M_E , скорее всего, никак не связана с ее количеством, отложенным рыбами в данном нерестовом сезоне, и вряд ли может обеспечить регулирование численности популяции. В первом приближении смертность икры можно принять за константу, задав ей некоторой начальное значение. Например, при искусственной инкубации икры гибель ее составляет 20–30%. В естественных условиях она может достигать 90–99% и более, изменяясь в довольно широких пределах (Dahlberg, 1979).

В этой связи можно считать, что коэффициентом компенсационной смертности, который и осуществляет регуляцию численности, скорее всего, является естественная убыль сеголеток M_0 . Такой механизм, в частности, заложен в классических моделях запас–пополнение. Следовательно, исходя из уравнения (23), при имеющихся значениях биологических параметров E_a , S_F , M_E , M , t_s , t_λ существует единственное значение компенсационной смертности M_0 , обеспечивающее стабильность популяции. Оно может быть найдено как:

$$M_0 = \ln \left(S_F E_a e^{-(M_E + M(t_s - 1))} \times \frac{1 - e^{-M(t_\lambda - t_s)}}{M} \right). \quad (35)$$

С целью теоретического исследования влияния собственных параметров популяции на возможные значения коэффициента ком-

пенсационной смертности, обеспечивающего стабильность популяции, в табл. 3 приведены расчетные величины M_0 для различных значений предельного возраста рыбы t_λ и индивидуальной плодовитости E_a . Значения входящих констант приняты близкими для карповых и окуневых, приводимых в литературе (<http://fishbase.org/>; Dahlberg_1979; Froese, Binohlan, 2000), – доля самок в нерестовом запасе $S_F = 0,4$, возраст наступления половозрелости $t_s = 0,4$ t_λ , коэффициент естественной смертности икры $M_E = 3,912$ (98%). Объем выборки S_n для оценки коэффициента смертности взрослых рыб принят равным 1000 экз.

Анализ табл. 3 позволяет выделить ряд интересных моментов.

1. В расчетах задана очень высокая величина естественной смертности икры – 98%, однако даже в этом случае фонд икры оказывается настолько большим, что для сбалансированности системы гибель молоди на первом году жизни должна составить 68,8–99,9%. Это свидетельствует о том, что не популяционная плодовитость или численность личинок на ранних стадиях определяют стабильное существование популяции.

2. Для видов, имеющих одинаковую продолжительность жизни и, следовательно, одинаковую естественную смертность взрослых рыб, различия в гибели молоди изменяются в пределах нескольких процентов даже при существенно различной величине плодовитости. Если учесть, что большая часть личинок гибнет на ранних стадиях, то можно предположить, что к концу первого года жизни их количество будет в очень небольшой степени зависеть от собственно рождаемости. Это в перспективе позволяет упростить расчеты и принять некоторую среднюю величину выживаемости икры и личинок на ранних стадиях.

В любом случае данные табл. 3 позволяют оценить выживаемость молоди на первом году жизни и подойти к оценке коэффициента промыслового возврата K_R . С этой целью рассмотрим динамику численности популяции, существование которой обеспечива-

Таблица 3. Значения коэффициента компенсационной смертности M_0 для разных сочетаний популяционных параметров

| t_k | M | Плодовитость E_a , тыс. шт. | | | | | Φ_M | Плодовитость E_a , тыс. шт. | | | | | | |
|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Смертность M_0 , 1/год | | | | | | Смертность, % | | | | | | |
| | | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | | 200 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 |
| 5 | 1,885 | 1,166 | 1,859 | 2,552 | 3,468 | 4,161 | 4,855 | 84,82 | 68,83 | 84,41 | 92,21 | 96,88 | 98,44 | 99,22 |
| 6 | 1,457 | 1,268 | 1,961 | 2,654 | 3,570 | 4,264 | 4,957 | 76,70 | 71,86 | 85,93 | 92,96 | 97,19 | 98,59 | 99,30 |
| 7 | 1,179 | 1,396 | 2,089 | 2,782 | 3,698 | 4,391 | 5,085 | 69,23 | 75,23 | 87,62 | 93,81 | 97,52 | 98,76 | 99,38 |
| 8 | 0,985 | 1,529 | 2,223 | 2,916 | 3,832 | 4,525 | 5,218 | 62,64 | 78,33 | 89,17 | 94,58 | 97,83 | 98,92 | 99,46 |
| 9 | 0,842 | 1,661 | 2,354 | 3,047 | 3,964 | 4,657 | 5,350 | 56,91 | 81,01 | 90,50 | 95,25 | 98,10 | 99,05 | 99,53 |
| 10 | 0,733 | 1,788 | 2,481 | 3,174 | 4,091 | 4,784 | 5,477 | 51,95 | 83,27 | 91,64 | 95,82 | 98,33 | 99,16 | 99,58 |
| 11 | 0,647 | 1,909 | 2,602 | 3,295 | 4,212 | 4,905 | 5,598 | 47,65 | 85,18 | 92,59 | 96,29 | 98,52 | 99,26 | 99,63 |
| 12 | 0,578 | 2,024 | 2,717 | 3,410 | 4,327 | 5,020 | 5,713 | 43,91 | 86,79 | 93,39 | 96,70 | 98,68 | 99,34 | 99,67 |
| 13 | 0,521 | 2,133 | 2,826 | 3,519 | 4,436 | 5,129 | 5,822 | 40,63 | 88,15 | 94,08 | 97,04 | 98,82 | 99,41 | 99,70 |
| 14 | 0,474 | 2,237 | 2,930 | 3,623 | 4,539 | 5,232 | 5,926 | 37,74 | 89,32 | 94,66 | 97,33 | 98,93 | 99,47 | 99,73 |
| 15 | 0,434 | 2,335 | 3,028 | 3,721 | 4,638 | 5,331 | 6,024 | 35,19 | 90,32 | 95,16 | 97,58 | 99,03 | 99,52 | 99,76 |
| 16 | 0,399 | 2,429 | 3,122 | 3,815 | 4,731 | 5,424 | 6,118 | 32,92 | 91,18 | 95,59 | 97,80 | 99,12 | 99,56 | 99,78 |
| 17 | 0,370 | 2,518 | 3,211 | 3,904 | 4,821 | 5,514 | 6,207 | 30,89 | 91,94 | 95,97 | 97,98 | 99,19 | 99,60 | 99,80 |
| 18 | 0,343 | 2,603 | 3,296 | 3,989 | 4,906 | 5,599 | 6,292 | 29,07 | 92,60 | 96,30 | 98,15 | 99,26 | 99,63 | 99,81 |
| 19 | 0,321 | 2,685 | 3,378 | 4,071 | 4,987 | 5,680 | 6,374 | 27,43 | 93,18 | 96,59 | 98,29 | 99,32 | 99,66 | 99,83 |
| 20 | 0,300 | 2,763 | 3,456 | 4,149 | 5,065 | 5,758 | 6,452 | 25,94 | 93,69 | 96,84 | 98,42 | 99,37 | 99,68 | 99,84 |
| 21 | 0,282 | 2,838 | 3,531 | 4,224 | 5,140 | 5,833 | 6,527 | 24,58 | 94,14 | 97,07 | 98,54 | 99,41 | 99,71 | 99,85 |
| 22 | 0,266 | 2,910 | 3,603 | 4,296 | 5,212 | 5,905 | 6,599 | 23,34 | 94,55 | 97,28 | 98,64 | 99,46 | 99,73 | 99,86 |
| 23 | 0,251 | 2,979 | 3,672 | 4,365 | 5,282 | 5,975 | 6,668 | 22,21 | 94,92 | 97,46 | 98,73 | 99,49 | 99,75 | 99,87 |
| 24 | 0,238 | 3,046 | 3,739 | 4,432 | 5,348 | 6,041 | 6,735 | 21,17 | 95,24 | 97,62 | 98,81 | 99,52 | 99,76 | 99,88 |
| 25 | 0,226 | 3,110 | 3,803 | 4,496 | 5,413 | 6,106 | 6,799 | 20,21 | 95,54 | 97,77 | 98,89 | 99,55 | 99,78 | 99,89 |
| 26 | 0,215 | 3,172 | 3,865 | 4,559 | 5,475 | 6,168 | 6,861 | 19,33 | 95,81 | 97,90 | 98,95 | 99,58 | 99,79 | 99,90 |
| 27 | 0,205 | 3,232 | 3,926 | 4,619 | 5,535 | 6,228 | 6,921 | 18,51 | 96,05 | 98,03 | 99,01 | 99,61 | 99,80 | 99,90 |
| 28 | 0,195 | 3,291 | 3,984 | 4,677 | 5,593 | 6,286 | 6,980 | 17,75 | 96,28 | 98,14 | 99,07 | 99,63 | 99,81 | 99,91 |
| 29 | 0,187 | 3,347 | 4,040 | 4,734 | 5,650 | 6,343 | 7,036 | 17,04 | 96,48 | 98,24 | 99,12 | 99,65 | 99,82 | 99,91 |
| 30 | 0,179 | 3,402 | 4,095 | 4,788 | 5,705 | 6,398 | 7,091 | 16,38 | 96,67 | 98,33 | 99,17 | 99,67 | 99,83 | 99,92 |

Примечание. Обозначения см. в тексте.

ется за счет искусственного воспроизводства. Суть последнего заключается в следующем. Во-первых, за счет инкубации икры в искусственных условиях происходит существенное повышение ее выживаемости. Во-вторых, в течение периода выращивания молодь оказывается недоступной для хищников, а жизнестойкость ее с возрастом повышается.

Согласно уравнению (35), если молодь выпускается в водоем сразу после вылупления, ее гибель будет составлять величину M_0 и коэффициент промыслового возврата (суть – выживаемость до вступления в промысловый запас) составит согласно уравнению (20):

$$K_R = e^{-M_0 - M(t_s - 1)}. \quad (36)$$

В том случае, когда выпуск молоди происходит в конце первого года выращивания, промысловый возврат окажется равным коэффициенту выживаемости в течение периода наступления половозрелости в возрасте t_s :

$$K_R = e^{-M(t_s - 1)}. \quad (37)$$

В реальности выпуск молоди осуществляется не сразу после вылупления на стадии личинки, а несколько позже, когда она подрастет до определенного размера и будет более жизнестойкой. Обычной задачей искусственного воспроизводства является установление зависимости промыслового возврата от массы выпускаемой молоди.

Предположим, что с увеличением массы молоди ее естественная смертность M_{0+} снижается с некоторой скоростью m . Тогда можно записать, что на интервале возрастов от нуля до одного года (или любого другого максимального периода выращивания) смертности молоди изменяется в связи с весовым ростом рыбы:

$$\frac{dM_{0+}}{dW} = -mM. \quad (38)$$

Интегрируя с начальными условиями $W = W_0 \approx 0; M_{0+} = M_0$, получаем:

$$M_{0+} = M_0 e^{-mW}. \quad (39)$$

С целью нахождения неизвестного коэффициента m примем, что начальная масса личинки составляет W_0 , а масса в конце года (или другого момента, когда завершается искусственное выращивание) – W_1 . Величина начальной смертности равна M_0 , а конечной пусть будет соответствовать месячной гибели взрослых рыб $M_1 = M/12$. Если выпуск молоди происходит в середине года, то при необходимости можно пропорционально пересчитать и конечную смертность M_1 . В результате искомый коэффициент будет равен:

$$m = -\frac{\ln \frac{M}{12M_0}}{W_1 - W_0}. \quad (40)$$

Используя данное уравнение, может быть рассчитан коэффициент промыслового возврата для любой массы выпускаемой молоди W_a :

$$K_R = e^{-M_0 e^{-mW_a} - M(t_s - 1)}. \quad (41)$$

С целью апробации методики воспользуемся имеющимися фондовыми данными по биологическим параметрам массовых видов рыб водоемов Калининградской области (Рыбохозяйственный кадастр ..., 2008) и рассчитаем коэффициенты промыслового возврата для разной массы выпускаемой молоди (табл. 4).

Результаты расчетов показывают следующее:

1) для выбранных видов рыб промысловый возврат изменяется от сотых долей процента при выпуске ранней личинки до нескольких процентов – при достижении рыбой массы, близкой к массе годовиков;

2) несмотря на различие входных параметров, значения коэффициентов промыслового возврата получаются вполне реальными и сходными с приводимыми в литературе (Методика ..., 2011). Вместе с тем они получены на основании четко сформулированной концепции и ясных биологических параметров. Это кардинальным образом отличает полученный результат от приводимых в литературе значений, где, как правило, алгоритм, методика расчета и

Таблица 4. Коэффициенты промыслового возврата некоторых видов рыб водоемов Калининградской области

| Параметр | Сиг | Щука | Судак | Лещ | Плотва | Окунь | Кумжа |
|---------------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| t_{λ} , лет | 12 | 10 | 15 | 15 | 12 | 12 | 8 |
| t_s , лет | 5 | 4 | 6 | 6 | 5 | 5 | 3 |
| S_F , доля | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| E_a , тыс. шт. | 20 | 20 | 150 | 50 | 12 | 10 | 5 |
| M_E , 1/год | 3,912 | 3,912 | 4,605 | 3,912 | 3,912 | 3,912 | 3,912 |
| M_0 , 1/год | 3,293 | 4,391 | 5,736 | 4,638 | 3,115 | 2,600 | 1,728 |
| M , 1/год | 0,578 | 0,474 | 0,434 | 0,434 | 0,521 | 0,578 | 0,985 |
| W_0 , г | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 |
| W_1 , г | 10 | 10 | 24 | 10 | 5 | 5 | 15 |
| m , 1/год | 0,423 | 0,395 | 0,208 | 0,486 | 0,812 | 0,799 | 0,203 |
| Масса выпускаемой молоди W_a , г | Промысловый возврат, % | | | | | | |
| 0,01 | 0,37 | 0,47 | 0,06 | 0,11 | 0,63 | 0,75 | 2,49 |
| 0,1 | 0,42 | 0,52 | 0,06 | 0,14 | 0,76 | 0,90 | 2,57 |
| 0,2 | 0,48 | 0,59 | 0,07 | 0,17 | 0,93 | 1,08 | 2,66 |
| 0,5 | 0,69 | 0,82 | 0,09 | 0,30 | 1,55 | 1,73 | 2,93 |
| 1,0 | 1,14 | 1,31 | 0,15 | 0,66 | 2,88 | 3,08 | 3,41 |
| 2,0 | 2,41 | 2,63 | 0,34 | 1,98 | 5,73 | 5,85 | 4,42 |
| 3,0 | 3,92 | 4,21 | 0,66 | 3,88 | 7,77 | 7,82 | 5,46 |
| 5,0 | 6,65 | 7,15 | 1,74 | 7,60 | 9,44 | 9,44 | 7,47 |
| 10,0 | 8,85 | 9,70 | 4,17 | 10,40 | 9,86 | 9,86 | 9,94 |
| 15,0 | 9,44 | 10,44 | 5,88 | 11,03 | 9,89 | 9,89 | 11,13 |

входные параметры не приводятся. В перспективе, имея какие-либо конкретные значения по промысловому возврату для вида или весовой группы, модель допускает подстройку путем варьирования входных параметров.

Рассмотрим теперь влияние еще одного ограничения разрабатываемой методики. В уравнении (35) для нахождения естественной смертности личинок и сеголеток M_0 приходится задавать некоторые значения смертности икры M_E и смертности взрослых рыб M . Если величина последнего коэффициента более или менее обоснована методикой Баранова, то гибель икры приходится просто принимать как некоторую константу, исходя из умозрительных соображений. Возникает вопрос, насколько это влияет на оценку промыслового возврата? С целью ответа на дан-

ный вопрос мы рассчитали коэффициенты промыслового возврата применительно к сигу Куршского залива, по которому имеются необходимые биологические параметры (Шибает, 2015; Шибает С., Шибает Л., 2016). Коэффициент смертности икры M_E варьировал в пределах от 80 до 99% (для удобства коэффициенты представлены в действительных значениях – ϕ_M , %). Кроме того, рассмотрен вариант, когда смертность икры равна нулю и вся гибель отнесена на личинок и сеголеток. Основные биологические параметры сига взяты из табл. 4. Результаты расчетов представлены в табл. 5, и для наглядности зависимость коэффициента промыслового возврата от массы выпускаемой молоди для разных значений задаваемого значения гибели икры показана на рис. 2.

Таблица 5. Коэффициенты промыслового возврата сига Куршского залива для различных значений задаваемого коэффициента смертности икры

| Параметр | Смертность икры, % | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 80 | 90 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 |
| M_0 , 1/год | 7,205 | 5,595 | 4,902 | 4,209 | 3,986 | 3,698 | 3,293 | 2,600 |
| M , 1/год | 0,578 | 0,578 | 0,578 | 0,578 | 0,578 | 0,578 | 0,578 | 0,578 |
| W_0 , г | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 |
| W_1 , г | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| m , 1/год | 0,501 | 0,476 | 0,463 | 0,447 | 0,442 | 0,434 | 0,423 | 0,399 |
| Масса выпускаемой молоди W_a , г | Промысловый возврат, % | | | | | | | |
| | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,08 | 0,15 | 0,19 | 0,25 | 0,37 |
| 0,1 | 0,01 | 0,05 | 0,09 | 0,18 | 0,22 | 0,29 | 0,42 | 0,81 |
| 0,2 | 0,01 | 0,06 | 0,11 | 0,21 | 0,26 | 0,33 | 0,48 | 0,90 |
| 0,5 | 0,04 | 0,12 | 0,20 | 0,34 | 0,41 | 0,50 | 0,69 | 1,18 |
| 1,0 | 0,13 | 0,31 | 0,45 | 0,67 | 0,76 | 0,90 | 1,14 | 1,73 |
| 2,0 | 0,70 | 1,14 | 1,42 | 1,77 | 1,91 | 2,10 | 2,41 | 3,07 |
| 3,0 | 1,99 | 2,59 | 2,91 | 3,30 | 3,43 | 3,63 | 3,92 | 4,52 |
| 5,0 | 5,50 | 5,90 | 6,09 | 6,32 | 6,39 | 6,50 | 6,65 | 6,95 |
| 8,0 | 8,69 | 8,74 | 8,77 | 8,80 | 8,81 | 8,83 | 8,85 | 8,90 |
| 10,0 | 9,44 | 9,44 | 9,44 | 9,44 | 9,44 | 9,44 | 9,44 | 9,44 |

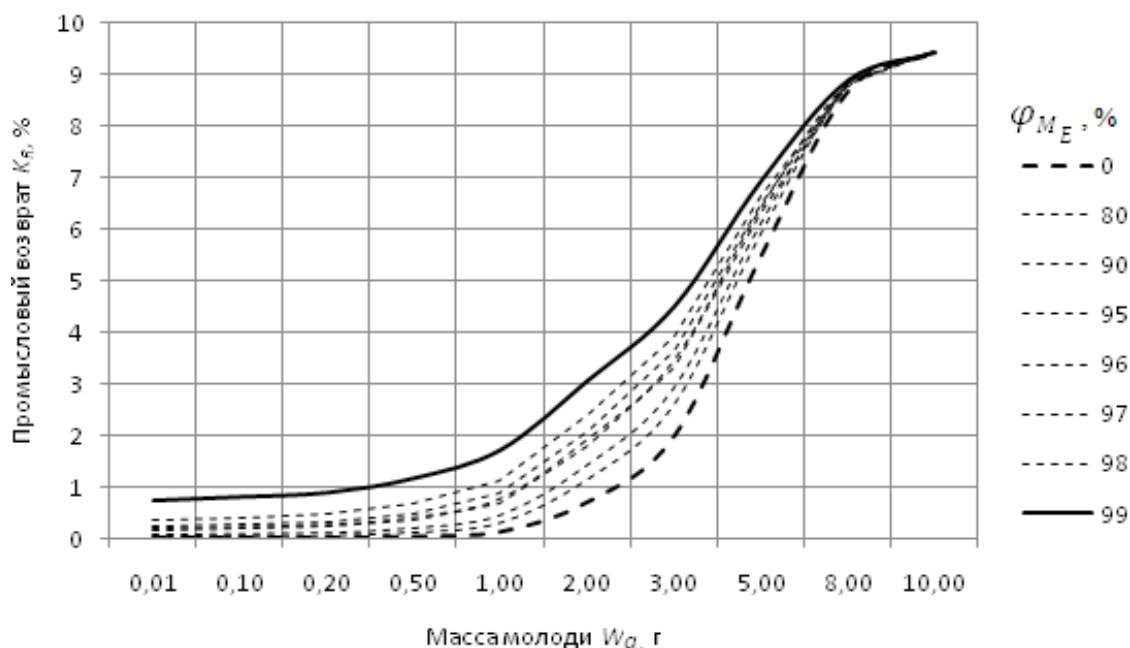


Рис. 2. Зависимость промыслового возврата сига (K_R , %) Куршского залива от массы выпускаемой молоди для различных значений задаваемого коэффициента смертности икры (ϕ_{ME} , %); пояснения см. в тексте.

Расчеты показывают следующее: варьирование величины гибели икры в пределах от 0 до 99% оказывает довольно существенное влияние на коэффициенты промыслового возврата для личинок и ранней молоди, хотя различия между крайними значениями составляют всего 0,7%. Для более крупных рыб различия уменьшаются до 1–2%, а для особей с массой, близкой к предельной, коэффициенты сходятся. Последнее, впрочем, обуславливается методикой расчета коэффициента m .

Установленная закономерность позволяет сделать два вывода.

1. Очевидно, что основная гибель молоди, компенсирующая ее избыток, происходит именно на ранних стадиях жизненного цикла. Поэтому в последующем варьирование задаваемого значения смертности икры уже в очень слабой степени влияет на оценку выживаемости выпускаемой молоди;

2. Учитывая незначительную вариабельность искомого коэффициента K_R , представляется возможным при расчетах принять какое-то стандартное значение задаваемого коэффициента смертности икры, например, установить его равным 95 или 99% или, наоборот, вообще не учитывает его, считая равным нулю. Это полностью исключит субъективность оценок и упростит сам расчет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в настоящей работе исследования свидетельствуют о том, что в условиях отсутствия фактических данных оценка промыслового возврата возможна на основании моделирования динамики численности популяции с учетом ее стандартных биологических параметров – продолжительности жизни, естественной смертности, возраста наступления половозрелости и индивидуальной абсолютной плодовитости. Данный подход дает результаты, сходные с натурными наблюдениями, однако выгодно отличается от последних возможностью получения однозначного решения, которое к

тому же может быть воспроизведено. Учитывая прозрачность алгоритма и возможность его адаптации за счет задания тех или иных констант модели, получаемые коэффициенты могут быть утверждены на законодательном уровне. Это особенно важно при принятии управленческих решений для планирования строительства рыбоводных предприятий, а также в случае оценки ущербов, наносимых водным биоресурсам в результате планируемой хозяйственной деятельности.

В перспективе возможен расчет параметров промыслового возврата для всех искусственно воспроизводимых видов рыб в разных водоемах и при разной конечной массе выпускаемой молоди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баранов Ф.И. К вопросу о биологических основаниях рыбного хозяйства // Изв. отдела рыбоводства и науч.-промысл. исследований. 1918. Т. 1. Вып. 2. С. 84–128.

Бивертон Р., Холт С. Динамика численности промысловых рыб. М.: Пищ. пром-сть, 1969. 248 с.

Временная методика оценки ущерба, наносимого рыбным запасам в результате строительства, реконструкции и расширения предприятий, сооружений и других объектов и проведения различных видов работ на рыбохозяйственных водоемах. М.: Минрыбхоз СССР, 1990. 36 с.

Герасимов Ю.В., Васюра О.Л. Рост и питание молоди стерляди *Acipenser ruthenus* (Acipenseridae) в прудовых условиях при различной длительности предварительного содержания в бассейнах // Биология внутр. вод. 2013. №3. С. 64–72.

Дементьева Т.Ф. Биологическое обоснование промысловых прогнозов. М.: Пищ. пром-сть, 1976. 240 с.

Державин А.Н. Севрюга. Биологический очерк. Баку: Б. и., 1922. 392 с.

Кожин Н.И. Коэффициент промыслового возврата // Тр. ВНИРО. 1951. Т. 19. С. 127–135.

- Козлов В.И., Абрамович Л.С.* Краткий словарь рыбовода. М.: Россельхозиздат, 1982. 160 с.
- Козлов В.И., Абрамович Л.С.* Словарь рыбовода. М.: Росагропромиздат, 1991. 238 с.
- Никольский Г.В.* Теория динамики стада. М.: Пищ. пром-сть, 1974. 447 с.
- Рикер У.Е.* Методы оценки и интерпретация биологических показателей популяций рыб. М.: Пищ. пром-сть, 1979. 408 с.
- Рыбохозяйственный кадастр трансграничных водоемов России (Калининградская область) и Литвы / Под. ред. С.В. Шибаева и др. Калининград: ИП Мишуткина, 2008. 200 с.
- Сельскохозяйственный энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1989. 656 с.
- Серпунин Г.Г.* Биологические основы рыбоводства. М.: Колос, 2009. 384 с.
- Тюрин П.В.* Биологические обоснования регулирования рыболовства на внутренних водоемах. М.: Пищепромиздат, 1963. 120 с.
- Тюрин П.В.* Теоретические основания рационального регулирования рыболовства // Изв. ГосНИОРХ. 1974. Т. 86. С. 7–25.
- Тюрина П.В.* «Нормальные» кривые переживания и темпов естественной смертности рыб как теоретическая основа регулирования рыболовства // Там же. 1972. Т. 71. С. 71–128.
- Шибаев С.В.* Промысловая ихтиология. Калининград: Аксиос, 2014. 535 с.
- Шибаев С.В.* Практикум по промысловой ихтиологии. Калининград: Аксиос, 2015. 320 с.
- Шибаев Л.В.* Эколого-биологические и биотехнические основы воспроизводства сига (*Coregonus lavaretus* L.) Куршского залива Балтийского моря: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Калининград: КГТУ, 2016. 24 с.
- Шибаев С.В., Шибаев Л.В.* К методике оценки приемной емкости и промыслового возврата при искусственном воспроизводстве сига (*Coregonus lavaretus* L.) Куршского залива // Вестн. рыбохоз. науки. 2016. Т. 3. № 2 (10). С. 56–69.
- Dahlberg M.D.* A review of survival rates of fish eggs and larvae in relation to impact assessment // Marine Fish Review. 1979. № 41(3). P. 1–12.
- Froese R., Binohlan C.* Empirical relationships to estimate asymptotic length, length at first maturity and length at maximum yield per recruit in fishes, with a simple method to evaluate length frequency data // J. Fish Biol. 2000. № 56. P. 758–773.
- Orlov A.V., Gerasimov Yu.V., Lapschin O.M.* The feeding behavior of cultured and wild Atlantic salmon, *Salmo salar* (L.), in the Louvenga River, Kola Peninsula, Russia // ICES J. Marine Sci. 2006. V. 63. P. 1297–1303.

**FORMALIZATION OF METHODIC FOR EVALUATION
OF COMMERCIAL RETURN AT ARTIFICIAL REPRODUCTION
OF WATER BIO-RESOURCES**

© 2018 y. S.V. Shibaev

Kaliningrad State Technical University, 236022

The article describes a mathematical model for estimating of commercial return for artificial reproduction of water bio-resources. It base on modified version of Beverton-Hotl model. The dynamics of population number is calculated using three types of natural mortality – mortality of eggs, mortality of larvae and fingerlings, and mortality of older fish at the age more than one year. The last is determined by the Baranov's method using maximum fish age. The input parameters are maximal age, the individual fecundity, the age of maturity.

Natural mortality in the first age plays a compensatory role to balance initial number of eggs with resulting population fecundity. Compensatory mortality at the first age is described by an exponential function, depending on the weight of juveniles. It is shown that the model gives a clear assessment of commercial return, similar to that in the literature, but it allows us to calculate it using standard biological parameters of fish population. The model can be applicable of any fish species and used both for decision making for planning of artificial restoration of stocks and calculation of measures for compensation of damage to water bio-resources cause by human activity.

Keywords: artificial breeding, water bio-resources, commercial return, natural mortality, mathematic model of fish population.