

ДИСКУССИИ

УДК 57.087.23

МОДЕЛЬ СЕЛЕКТИВНОСТИ ЖАБЕРНЫХ СЕТЕЙ
С УЧЕТОМ ОБЬЯЧЕИВШИХСЯ И ЗАПУТАВШИХСЯ РЫБ

© 2015 г. Ф. С. Лобырев, Е. А. Криксунов, А. Е. Бобырев*, В. А. Бурменский

Московский государственный университет им. Ломоносова, Москва, 119992

* Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова, Москва, 119071

E-mail: lobyrev@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2014 г.

Предложена модель формирования долей объячеившихся и запутавшихся рыб в сетном улове, а также подход к реконструкции численности коснувшихся сети рыб по уловам одностенных жаберных сетей. В основе модели лежит физическая интерпретация процесса взаимодействия рыбы с сетью. Подход применим для практических целей, параметры модели оцениваются на основании анализа состава улова, промеров сетной ячей и морфометрии рыбы.

Ключевые слова: жаберная сеть, селективность, метод, частоты размерных групп, запутывание, объячеивание.

ВВЕДЕНИЕ

Не вызывает сомнения тот факт, что частоты размерных групп рыб в облавливаемой совокупности определяют частоты этих же размерных групп в улове. С другой стороны, размерно-частотный состав улова вследствие селективности жаберной сети является искажением состава совокупности рыб, пришедших в контакт с орудием лова. Тогда можно полагать существование определенной закономерности, по которой частоты/численность размерных групп в совокупности переводятся в частоты/численность размерных групп в улове.

Существуют два основных способа удержания рыбы в жаберной сети — объячеивание и запутывание (Lsema, Tjemslan, 1963; Hovgård, 1996; Hansen et al., 1997; Santos et al., 2003). Объячеивание считается закономерным проявлением улавливающих свойств сети по отношению к рыбе данного размера, тогда как запутывание рассматривается как отклонение от данной закономерности, и почти всегда запутавшуюся рыбу исключают из последующего анализа, как некий

артефакт (Helser et al., 1991; Amarasinghe, Pushpalatha, 1997; Santos et al., 2003). Реже по частотам запутавшихся рыб делаются попытки построения отдельного класса кривых селективности на основе методологии построения кривых для объячеившихся рыб (Sbrana et al., 2007), хотя научные обоснования для этого отсутствуют.

Пусть требуется определить состав облавливаемой совокупности рыб по составу сетного улова. Решение этой задачи связано с необходимостью анализа механизмов формирования селективных свойств орудий лова. Традиционные подходы к оценке селективности исходят из допущения о геометрическом подобии ячей идержанной в ней рыбы (Баранов, 1939; Hamley, 1975; Santos et al., 2003). В случае же запутывания это допущение по очевидным причинам не имеет силы, вследствие чего оценки численности приобретают систематические искажения.

Исследования, посвященные описанию механизма запутывания рыбы в жаберной сети, нам не известны. Оценки доли запутавшихся рыб встречаются в специальной литературе эпизодически, и они почти всегда

сопутствуют традиционным оценкам селективности (Helser et al., 1991; Kurkilahti et al., 1998; Santos et al., 2003).

Обратимся к распределениям долей запутавшихся рыб в уловах сетей разного шага ячей (табл. 1).

Представленные данные, с одной стороны, свидетельствуют о сопоставимости по величине долей объячеившихся и запутавшихся рыб, что указывает на необходимость учета этой компоненты улова при анализе селективности. С другой стороны, формирование долей объячеившихся и запутавшихся рыб, очевидно, подчиняется определенным закономерностям. Как видно из табл. 1, доли запутавшихся рыб каждого вида из уловов сетей разного шага ячей не разбросаны хаотически, а имеют явный тренд. Наконец, распределение отношений числа объячеившихся к числу запутавшихся рыб на интервале наблюденных в улове размерных групп имеет свою характерную динамику (рис. 1). Особенностью данных распределений является наличие выраженного пика, резкого обрыва левой части кривой и более или менее пологого наклона правой.

Настоящая статья посвящена описанию модели взаимодействия рыбы с жа-

берной сетью, на основе которой реализован подход к реконструкции численности коснувшихся сети рыб по уловам, включающим в себя как объячеившихся, так и запутавшихся рыб. Актуальность исследования в перспективе связана с оценкой локальной плотности рыб на некотором участке водоема. Детализированный анализ селективности позволит описать ту часть группировки, которая так или иначе вступила в контакт с сетью, но закономерно не вошла в улов. Это позволит, в частности, эффективно регулировать промысловые меры на рыбу научно обоснованной корректировкой параметров орудия лова.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Говоря о массовых мигрирующих видах, форма тела рыбы в общем случае такова, что при поступательном движении в водной среде лобовое сопротивление тела минимально. Подвижные элементы черепа и/или костные лучи плавников (если таковые имеются) при движении прижаты к телу, что уменьшает эффект лобового сопротивления, и даже при наличии подобных морфологических особенностей обтекаемость тела такой

Таблица 1. Доли запутавшихся рыб в сетях разного шага ячей, %

Вид рыбы	Размер ячей, мм	Доля запутавшихся рыб	Источник
Голец <i>S. nataycush</i>	51	0,47	Hansen et al., 1997
	57	0,47	
	64	0,44	
	70	0,31	
	76	0,18	
Хек <i>M. merluccius</i>	70	0,39	Santos et al., 2003
	80	0,38	
	90	0,36	
	100	0,43	
Палтус <i>H. hippoglossus</i>	160	0,22	Lsena, Tjemslan, 1963
	190	0,23	
	230	0,24	

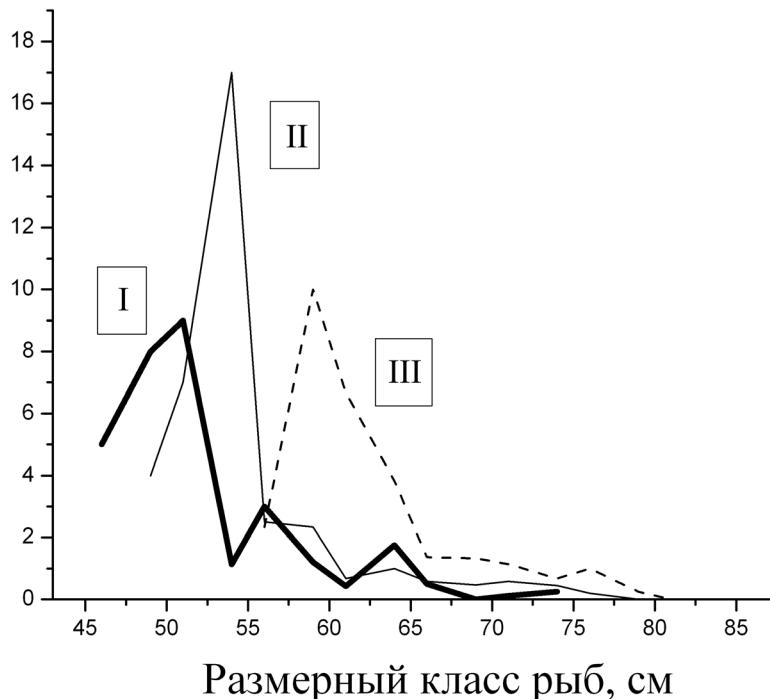


Рис. 1. Динамика отношений «число обячевшихся рыб / число запутавшихся рыб» (по оси ординат) для гольца *S. pataycush* в уловах сетей с размером ячей: I – 51, II – 57, III – 70 мм (по данным: Hansen et al., 1997).

рыбы сопоставима (а в ряде случаев выше) с обтекаемостью рыб, не имеющих таких элементов (Алеев, 1963). Отсюда можно утверждать следующее: подвижные костные элементы черепа или плавников у рыб при заходе в ячейю никак не препятствуют рыбке или удержаться в ячее, или свободно пройти сквозь ячейю, если максимальный охват тела рыбы меньше периметра данного шага ячей. Следовательно, рыба удерживается в сети отличным от обячевания способом только в том случае, если что-то препятствует ее проячеванию. Последний вариант может иметь место в результате попадания рыбы ртом на нить.

Как известно, при плавании эффективность газообмена у ряда видов рыб увеличивается за счет так называемой *напорной вентиляции* – рыба прокачивает воду через жабры силой скоростного напора, плавая с открытым ртом или периодически его открывая и закрывая (Кляшторин, 1983; Hristiansennd, Jobling, 1990; Wegner et al., 2010; Randall, 2014). Тогда при ударе в сеть

рыба, попадая на нить ртом, прогибает сетное полотно, и дальнейшее ее движение может привести к запутыванию, даже если максимальный охват тела рыбы меньше периметра ячей. Запутыванию также способствует наличие зубов и/или выступающих костных элементов черепа или скелета (Lander, 1969).

Таким образом, можно говорить о том, что способ удержания рыбы в сети в целом определяется особенностями *первого касания* рыбы с нитями ячей.

МОДЕЛЬ

Введем термин «запутывание» как способ удержания рыбы в сети, альтернативный удержанию в ячее вследствие обячевания. В модель входят следующие параметры: μ – шаг ячей; γ – угол между нитями ячей в вертикальной плоскости, определяемый посадочным коэффициентом; h – отрезок, соединяющий условные точки Q и F на концах верхней и нижней челюстей рыбы, когда рот открыт.

Взаимодействие рыбы с сетью с момента касания сети и до удержания в сети или ухода сквозь ячейю можно разделить на три этапа. Вероятность реализации ряда последовательных событий на каждом отдельном этапе определяется как характером контакта рыбы с сетью, так и ее морфометрическими характеристиками (табл. 2).

ЗАПУТЫВАНИЕ

Пусть h – расстояние между точками Q и F на концах верхней и нижней челюстей соответственно (рис. 2, *a*). Можно говорить

о том, что нить заходит в рот рыбы только в том случае, если оказывается в пределах отрезка QF , выход же нити за пределы отрезка QF ведет к объячеиванию. Тогда существуют два крайних положения нити относительно концов верхней и нижней челюсти рыбы, когда еще возможно попадание нити в рот (рис. 2, *b*).

Если нить расположена вблизи точки F , точка Q определяет верхнюю границу зоны запутывания (рис. 2, *b*, I), соответственно, если нить расположена вблизи точки Q , точка F определяет нижнюю границу зоны запутывания (рис. 2, *b*, II).

Таблица 2. Ряд последовательных событий взаимодействия рыбы с жаберной сетью

Этап	Событие	
1	Касание рыбы жаберной сети	
2	Заход в ячеею	Попадание ртом на нить
3	Удержание в ячеею	Уход сквозь ячеею
		Запутывание

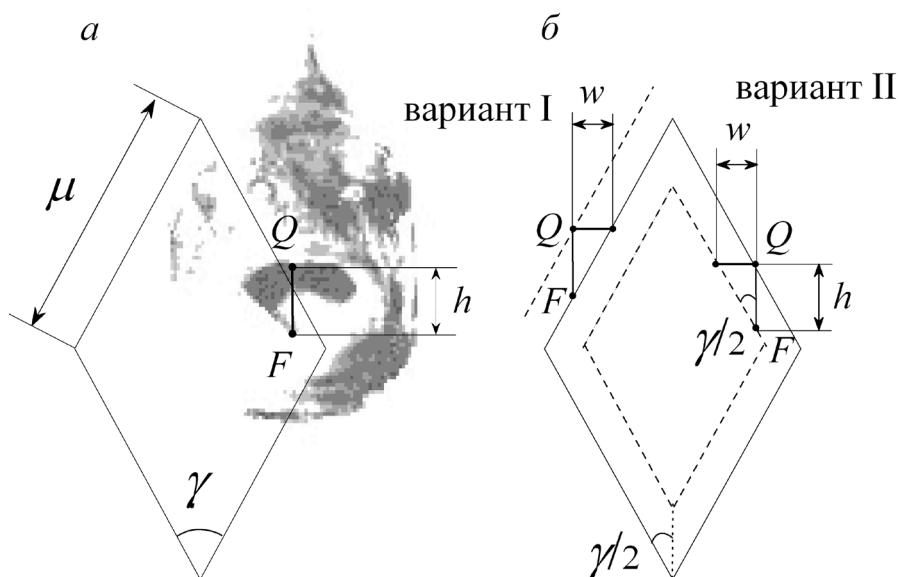


Рис. 2. Особенности контакта рыбы с сетью, приводящего к запутыванию (*a*) и границы зоны запутывания в соответствии с величиной параметра h (*b*). μ – шаг ячии, γ – угол между нитями ячии, h – размах челюстей, w – параметр, задающий границы зоны облова; Q и F – точки на концах верхней и нижней челюстей соответственно.

Согласно геометрическому определению вероятности, вероятность попадания в некоторую область пропорциональна площади, длине или объему этой области (Кендалл, Моран, 1972; Сантало, 1983). Тогда можно утверждать, что вероятность рыбы данной размерной группы зайти в ячейю данного шага рассчитывается как отношение площади ромба s , определяющего границы запутывания, к площади всей ячейи S . Соответственно вероятность рыбы попасть на нить рассчитывается как единица минус отношение s/S . Отсюда для рыбы любого размера вероятность захода в ячейю $P(\mathcal{Y})$ вычисляется по формуле:

$$P(\mathcal{Y}) = \frac{s}{S}, \quad (1)$$

соответственно вероятность попадания на нить $P(H)$ определяется как:

$$P(H) = 1 - \frac{s}{S}, \quad (2)$$

причем $P(\mathcal{Y}) + P(H) = 1$. Тогда с учетом параметров модели формулы (1) и (2) имеют следующий вид:

$$P(\mathcal{Y}) = \frac{(\cos \frac{\gamma}{2} \mu - h)(\sin \frac{\gamma}{2} \mu - \tan \frac{\gamma}{2} h)}{\cos \frac{\gamma}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \cdot \mu^2}, \quad (3)$$

$$P(H) = 1 - \frac{(\cos \frac{\gamma}{2} \mu - h)(\sin \frac{\gamma}{2} \mu - \tan \frac{\gamma}{2} h)}{\cos \frac{\gamma}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \cdot \mu^2}. \quad (4)$$

Следует отметить то обстоятельство, что доли $P(\mathcal{Y})$ и $P(H)$ при данных μ , γ и h не зависят от угла касания рыбы сети.

Функции (3) и (4) описывают вероятности $P(\mathcal{Y})$ и $P(H)$ для некоторой рыбы произвольного размера. Для интервала размерных групп, наблюденных в улове, величины $P(\mathcal{Y})$ и $P(H)$ будут иметь свои характерные распределения (Приложение 1), а отношение $P(\mathcal{Y})/P(H)$ в общем виде можно записать как:

$$\frac{P(\mathcal{Y})}{P(H)} = u(l). \quad (5)$$

График функции (5) представлен на рис. 3.

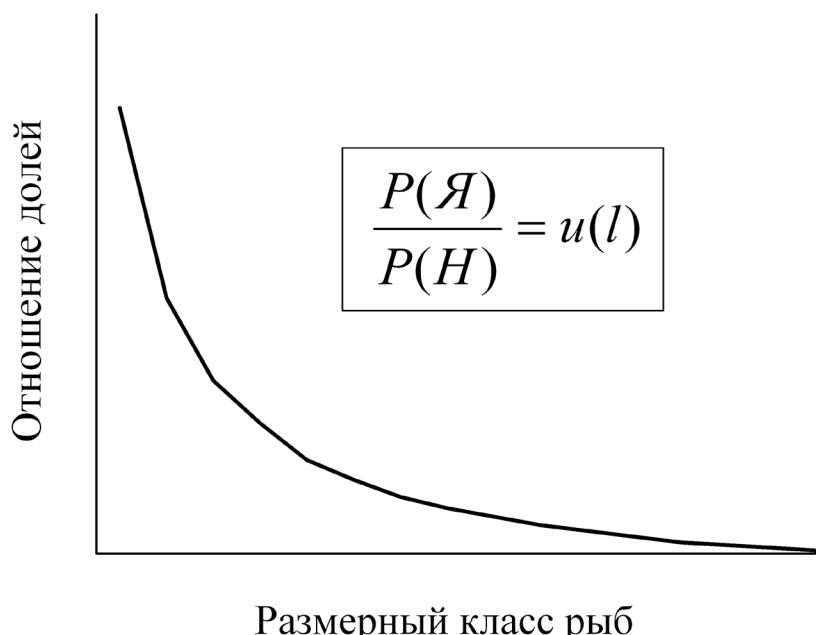


Рис. 3. График функции распределения отношений вероятности захода в ячейю к вероятности попадания на нить $P(\mathcal{Y})/P(H)$.

ОБЪЯЧЕИВАНИЕ

Морфометрической характеристикой, величина которой определяет удержание рыбы в ячее, является охват тела рыбы в наиболее широкой части G_{\max} . Рыба удерживается в ячее, если максимальный охват с учетом коэффициента сжатия тела (Андреев, 1955) больше периметра ячей 4μ , в противном случае рыба проячевается. Доля $P_{G_{\max}>4\mu}$ удержанных в ячее рыб в общем виде описывается нелинейной функцией вида:

$$P_{G_{\max}>4\mu} = g(l), \quad (6)$$

где l — длина рыбы. Функции (6) возрастает к единице и далее выходит на плато (Лобырев и др., 2013) (рис. 4). График функции (6) имеет свои характерные особенности динамики доли $P_{G_{\max}>4\mu}$ в трех различных областях (Приложение 2). График функции (6) идентичен графику функции удержания в ячее для отцепывающих орудий лова (Трещев, 1974), поскольку процесс ухода сквозь ячью в обоих случаях имеет сходный механизм.

СЕЛЕКТИВНОСТЬ.
ОЦЕНКА ЧИСЛЕННОСТИ
ПРИКОСНУВШИХСЯ К СЕТИ РЫБ

Селективность жаберной сети по отношению к размерному классу l есть доля удержанных в сети рыб от общего количества прикоснувшихся к сети (Баранов, 1939; Hamley, 1975). Следовательно, можно утверждать, что селективность жаберной сети складывается из селективности в отношении как объячеившихся, так и запутавшихся рыб. Для объячеившихся рыб селективность определяется как произведение вероятностей захода в ячью и удержания в ячее (Лобырев и др., 2013). По отношению к запутавшимся рыбам селективность определяется вероятностью $P(H)$ попадания на нить. В соответствии с данными вероятностями формируются доли/численность объячеившихся и запутавшихся рыб в улове сети данного размера ячей (табл. 2, 3).

Связь эмпирических и теоретических величин. Допустим, что выборка (улов) некоторой размерной группы достаточно представительна, чтобы отразить доли удер-

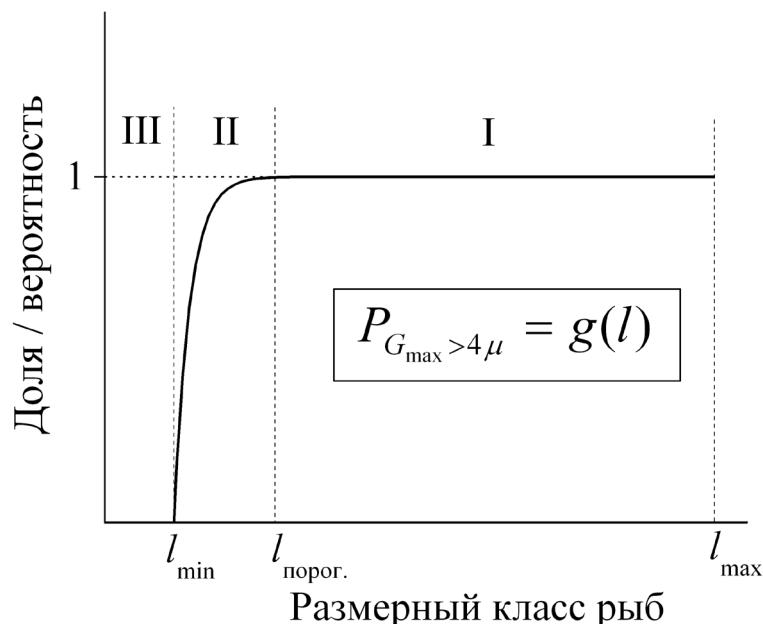


Рис. 4. График функции вероятности удержания рыбы в ячее $P_{G_{\max}>4\mu}$.

жанных в ячее и запутавшихся рыб в соответствии с теоретическими вероятностями удержания в ячее $P(Y)$ и запутывания $P(3)$. Пусть A и B — соответственно численности удержанных в ячее и запутавшихся рыб некоторой размерной группы. Тогда можно утверждать, что отношение численностей A/B равно отношению вероятностей $P(Y)/P(3)$. Действительно, $\frac{A}{B} = \frac{N \times P(Y)}{N \times P(3)} = \frac{P(Y)}{P(3)}$ (табл. 3).

Аналогично пусть Z — численность проячевшихся рыб, $A+Z$ — численность всех рыб, зашедших в ячью, а $P(Y)$ и $P(H)$ — вероятности попадания в ячью и попадания на нить. По аналогии с предыдущим случаем $\frac{A+Z}{B} = \frac{N \times P(Y)}{N \times P(H)} = \frac{P(Y)}{P(H)}$ (табл. 3). Разделив почленно функции из первой и третьей строки колонки «Этап 3» (табл. 3), выводим в общем виде формулу, описывающую отношение $P(Y)/P(3)$:

$$\frac{P(Y)}{P(3)} = u(l) \times g(l). \quad (7)$$

Совокупность наблюденных в улове размерных групп можно представить в виде четырех интервалов (областей), в каждом из которых наблюдается своя характерная динамика величин $P(Y)/P(H)$ и $P(Y)/P(3)$ (Приложение 3). Общий вид теоретической кривой функции (7) идентичен распределениям, полученным на основе выборочных данных (рис. 1).

Графики функций (5), (6) и (7) представлены на рис. 5.

Реконструкция численности рыб, пришедших в контакт с сетью. Количество рыб, пришедших в контакт с сетью, складывается из вошедших в улов и проячевшихся рыб, причем уход сквозь ячью имеет место только в областях Δ и Ψ (рис. 5). Реконструкция численности коснувшихся сети рыб реализуется с использованием распределений, построенных на основе как выборочных данных, так и теоретически рассчитанных величин. Опишем процесс реконструкции численности отдельно для каждой области.

О б л а с т ь Δ . Характеризуется уменьшением величины $P(Y)/P(3)$ за счет частичного ухода сквозь ячью. Для данного интервала размерных групп в улове имеем:

1. Выборочные численности удержанных в ячее A и запутавшихся B рыб, причем $A/B = P(Y)/P(3)$.

2. Величину $C = P(Y)/P(H)$, рассчитанную для каждого размерного класса на основе модели, переменными которой являются параметры, полученные в результате измерений сетной ячей и морфометрии рыбы.

Для реставрации количества N рыб, прикоснувшихся сети, необходимо оценить численности зашедших в ячью X и попавших на нить рыб Y . Нахождение неизвестных величин строится следующим образом.

По условию $X/Y = P(Y)/P(H) = C$ и $X + Y = N$. Тогда на основе равенства

Таблица 3. Численность рыб на каждом отдельном этапе взаимодействия с сетью

Этап 1	Этап 2	Этап 3
N_l	$N_l \times P(Y)$	$N \times P(Y) \times g(l) = N \times P(Y) - \text{улов}$
		$N \times P(Y) \times (1 - g(l)) = N \times P(\Pi) - \text{уход сквозь ячью}$
	$N_l \times P(H)$	$N \times P(H) \approx N \times P(3) - \text{улов}$

Примечание. N — количество рыб, коснувшихся сети; $P(Y)$ — вероятность захода в ячью, $P(H)$ — вероятность попадания на нить, $g(l)$ — вероятность удержания в ячее, $P(Y)$ — доля рыб, вошедших в улов в качестве обячевшихся рыб; $P(\Pi)$ — доля рыб, прошедших сквозь ячью, $P(3)$ — доля запутавшихся рыб.

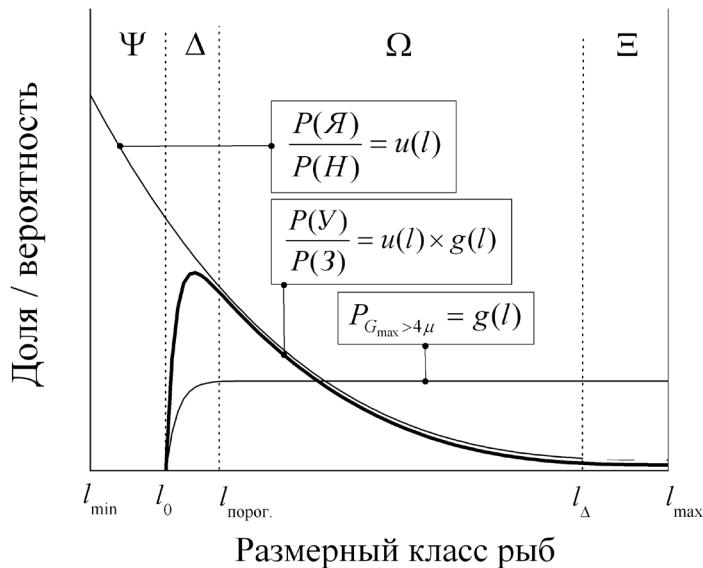


Рис. 5. Распределение отношения доли удержаных в ячее рыб к доле запутавшихся $P(Y)/P(3)$ как произведение отношения доли зашедших в ячью рыб к доле попавших на нить $P(\mathcal{Y})/P(H)$ и функции вероятности удержания в ячее $g(l)$.

$N \times P(H) \approx N \times P(3)$ (табл. 3) можно утверждать, что $Y \approx B$. Отсюда X равен:

$$X = C \times B. \quad (8)$$

Следовательно, искомое количество N рыб, прикоснувшихся сети, равно:

$$N_l = C \times B + B, \quad (9)$$

а общее количество коснувшихся сети N_{Δ} рыб в области Δ составит

$$N_{\Delta} = \sum_{i=1}^k (C \times B + B), \quad (10)$$

где k – количество размерных классов в области Δ .

Доля $P(\Pi)$ прошедших сквозь ячью рыб данного размера от общего количества прикоснувшихся к сети рыб составит:

$$P(\Pi) = \frac{C \times B - A}{C \times B + B}. \quad (11)$$

Область Ψ . Характеризуется тотальным уходом сквозь ячью рыб всех размерных групп, и улов в данной области представлен только запутавшимися рыбами. Соответственно имеем:

1. Выборочную численность B запутавшихся в сети рыб.

2. Расчетную величину $C = P(\mathcal{Y})/P(H)$ для каждого размерного класса l данной области.

По аналогии предыдущего расчета $Y \approx B$, $X = C \times B$ и $N = C \times B + B$. Общее количество коснувшихся сети N_{Ψ} рыб для области Ψ равно:

$$N_{\Psi} = \sum_{i=1}^j (C \times B + B), \quad (12)$$

где j – количество размерных классов в области Ψ .

Доля $P(\Pi)$ проявившихся рыб размера l от общего количества прикоснувшихся к сети рыб размера l составит:

$$P(\Pi)_l = \frac{C \times B}{C \times B + B} = \frac{C}{C + 1}. \quad (13)$$

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методические особенности модели. Представленный подход характерен тем, что все параметры модели могут быть

получены на основе анализа состава уловов, а также морфометрических характеристик рыбы и промеров сетной ячей. С другой стороны, тесная связь опытной и теоретической составляющих метода позволяет корректировать теоретическое распределение в соответствии с выборочными данными.

Как видно из рис. 5, функции $P(Y)/P(H) = u(l)$ и $P(Y)/P(3) = u(l) \times g(l)$ совпадают в области Ω . Функция $P(Y)/P(H) = u(l)$ является теоретическим распределением, а значения функции $P(Y)/P(3) = u(l) \times g(l)$ получены на основе анализа улова и представляют собой распределение отношений $P(Y)/P(3) = A/B$, где A и B соответственно количества удержанных в ячее и запутавшихся рыб длины l . Следовательно, добиваясь совпадения кривых функций (5) и (7) при использовании модели, мы уточняем форму теоретической кривой $P(Y)/P(H) = u(l)$ для областей Δ и Ψ , что позволяет повысить точность оценки.

Определение границ областей. Очевидно, что точность оценки границ областей определяет точность конечной оценки искомой численности, поскольку в каждой отдельной области формирование доли проявлений рыб происходит по своим закономерностям.

Пусть имеем количества удержанных в ячее A и запутавшихся B рыб в улове сети данного шага ячей. Тогда $l_{\text{порог}}$ определяется как размерная группа, для которой отношение A к B на данном интервале размерных групп будет максимальным — $(A/B)_{\text{max}}$.

Левой границе области Δ — размерной группе l_{Δ} — будет отвечать наименьшее отношение A к B слева от $l_{\text{порог}}$ — $(A/B)_{\text{max,лев}}$. Соответственно, правую границу области Ω — размерную группу l_{Ω} — можно найти как наименьшее отношение A к B справа от $l_{\text{порог}}$ — $(A/B)_{\text{max,прав}}$.

Факторы, вызывающие отклонение эмпирических оценок от теоретических. Отклонение эмпирических величин от своих теоретических значений, как правило, связано с небольшими объемами выборок. Как известно, увеличение объема выборки

приближает выборочное значение случайной величины к своему значению в генеральной совокупности. Так, для области Ω с увеличением объема выборки отношение (A/B) будет стремиться к своему математическому ожиданию, т.е. к теоретической доле $P(Y)/P(3) = P(Y)/P(3)$ (участки этих кривых в данной области совпадают (рис. 5)).

Точность конечной оценки также связана с точностью определения принадлежности рыбы к классу «удержанных в ячее» или «запутавшихся» рыб, что особенно актуально для малых выборок. В связи с этим следует отличать рыб, запутавшихся в сети после попадания ртом на нить, и рыб, запутавшихся при попытке выбраться из сети уже после захода в ячью. Спорный вопрос решается внимательным осмотром рыбы, а также последовательным снятием с рыбы сетных ячеек.

Следующий тип искажения связан с допущением о наличии двух различных исходов у рыбы, зашедшей в ячью, а именно: удержание в ячее и уход сквозь ячью. Здесь не рассматривается третий вариант, когда рыба имеет ненулевую вероятность отхода от сети после того, как передняя часть головы пересекла плоскость ячей (и рыба формально зашла в ячью). Данная вероятность описывается функцией $P_{d,AB} = 1 - (2/\pi) \left[\arcsin(d/AB) \right] \times k$ (Лобырев и др., 2013) и как поправка легко вводится в расчет.

Наконец, искажение конечной оценки связано с удерживающими способностями сети, не связанными с объчеиванием. При отклонении размера рыбы от некоторого оптимального размера как в большую, так и в меньшую сторону, эмпирическая вероятность войти в состав улова будет ниже своего теоретического значения. Другими словами, не вся рыба, попавшая ртом на нить, запутается в сети. Это обстоятельство описано *приблизительным* равенством $N \times P(H) \approx N \times P(3)$ (табл. 3). Причины этому могут быть следующие.

Для крупной рыбы уменьшение вероятности связано с несоответствием размера ячей экстерьеру рыбы, что не позволяет надежно запутаться в сети. С другой стороны, прочность нити часто не соответствует силе

рывков крупной рыбы при попытке вырваться из сети.

Что касается мелкой рыбы, то вероятность запутывания может снижаться за счет повышенной жесткости/толщины нити для рыб такой длины, что ведет к уменьшению цепкости сети. Это приводит к тому, что полотно сети недостаточно облегает тело рыбы при запутывании и возрастает вероятность ухода сквозь ячейю. (Жесткость/толщина нити, как правило, имеет решающее значение для удерживающей способности сети даже по отношению к крупной рыбе (Баранов, 1939)).

Влияние параметров сети на удержание рыбы. Параметры сети оказывают несомненное влияние на вероятность поимки рыбы данного вида и экстерьера. Так, вероятность захода в ячейю в значительной мере определяется конусностью тела рыбы (Андреев, 1959; Треццев, 1974), следовательно, данный параметр необходимо учитывать, анализируя улов рыб различных видов, а также для рыб одного вида, находящихся в определенных физиологических состояниях (различная степень жирности, преднерестовое состояние и т.д.). Однако после захода в ячейю рыба с равной надежностью удерживается в любом сечении тела от охвата за жаберными крышками до максимального охвата с учетом степени сжатия тела (Андреев, 1955; Сечин, 1969а).

Вероятность захода в ячейю в значительной мере определяется геометрией ячейи, задаваемой посадочным коэффициентом, а также степенью натяжения сетного полотна (Андреев, 1955; Сечин, 1969б). Как показывают авторы, оптимум величины посадочного коэффициента в значительной мере видоспецифичен и его оценка требует знания видового состава облавливаемой совокупности.

Как упомянуто выше, особое внимание необходимо обратить на толщину нити ячейи. В общем случае для сети данного шага ячейи вероятность поимки рыбы снижается при увеличении толщины нити (Андреев, 1955; Сечин, 1969а, б; Треццев, 1974), что при прочих равных окажет несомненное вли-

яние как на вероятность захода в ячейю, так и на вероятность запутывания.

Связь отношения $P(Y)/P(3)$ с размером ячейи. Одно из допущений, принятых в рыбопромысловой статистике, можно переформулировать следующим образом: ко всем одновременно выставленным сетям разного шага ячей подходит одно и то же количество рыб в одном и том же соотношении размерных групп (Santos et al., 2003). Как следствие, группировки рыб, пришедшие в контакт с сетями разного размера ячей, имеют одно и то же распределение величины G_{\max} максимального обхвата — параметра, определяющего долю проявлений рыб для ячей данного размера и, в частности, определяющего ту размерную группу $l_{\text{порог}}$, с которой начинается проявление.

Пусть для шага ячей μ_1 пороговое значение $G_{\max,1}$ максимального обхвата тела принадлежит размерной группе $l_{\text{порог}, 1}$, соответственно, для шага ячей μ_2 пороговое значение $G_{\max,2}$ принадлежит размерной группе $l_{\text{порог}, 2}$. Тогда справедливо следующее утверждение: при условии $\mu_1 < \mu_2$ необходимо выполняются условия $G_{\max,1} < G_{\max,2}$ и $l_{\text{порог}, 1} < l_{\text{порог}, 2}$. Следовательно, с увеличением шага ячейи возрастает доля рыб, прошедших сквозь ячейю. Следствием данной закономерности является сдвиг модального значения функции $P(Y)/P(3) = u(l) \times g(l)$ вправо при увеличении шага ячей, что демонстрируется опытными распределениями, представленными на рис. 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алеев Ю. Г. Функциональные основы внешнего строения рыбы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 274 с.

Андреев Н. Н. Некоторые вопросы теории лова рыбы жаберными сетями // Тр. ВНИРО. 1955. Т. 30. С. 109–127.

Баранов Ф. И. Теория и расчет орудий рыболовства. М.: Пищепромиздат, 1939. 461 с.

Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности. М.: Наука, 1972. 192 с.

- Кляшторин Л.Б.** Водное дыхание и кислородные потребности рыб. М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1983. 169 с.
- Лобырев Ф.С., Криксунов Е.А., Бобырев А.Е., Бурменский В.А.** О математическом описании селективности жаберных сетей // Вопр. рыболовства. 2013. Т. 14. № 3 (55). С. 524–542.
- Мина М.В., Клевезаль Г.А.** Рост животных. М.: Наука, 1976. 294 с.
- Сантало Л.** Интегральная геометрия и геометрические вероятности. М.: Наука, 1983. 360 с.
- Сечин Ю.Т.** Изменение уловистости сетей в зависимости от диаметра нитки, натяжения и коэффициента посадки сетного полотна // Тр. Саратов. отдел. ГосНИОХРа. 1969а. Т. 9. С. 8–61.
- Сечин Ю.Т.** Оптимальный ассортимент сетей для водохранилищ // Там же. 1969б. Т. 9. С. 132–139.
- Треццев А.И.** Научные основы селективного рыболовства. М.: Пищ. пром-сть, 1974. 446 с.
- Amarasinghe U.S., Pushpalatha K.B.** Gillnet selectivity of *Ompok bimaculatus* (Siluridae) and *Puntius dorsalis* (Cyprinidae) in a small-scale riverine fishery // J. Natn. Sci. Cont. Sri-Lanca. 1997. V. 25. № 3. Р. 169–184.
- Hamley J.M.** Review of gillnet selectivity // J. Fish. Res. Board Canada. 1975. V. 32. № 11. Р. 1943–1969.
- Hansen M., Madenjian C., Selgeby J., Helser T.** Gillnet selectivity for lake trout (*Salvelinus namaycush*) in Lake Superior // Canad. J. Fish. Aquatic Sci. 1997. V. 54. Р. 2483–2490.
- Helser T.E., Condrey R.E., Geaghan I.P.** A new method of estimating gillnet selectivity, with an example for spotted seatrout, *Cynoscion nebulosus* // Ibid. 1991. V. 48. Р. 487–492.
- Hovgård H.A.** Two-step approach to estimating selectivity and fishing power of research gill nets used in Greenland waters // Ibid. 1996. V. 59. № 4. Р. 1007–1013.
- Hristiansennd J.H., Jobling M.** The behaviour and the relationship between food intake and growth of juvenile Arctic charr, *Salvelinus alpinus* L., subjected to sustained exercise // Canad. J. Zool. 1990. V. 68. Р. 2185–2191.
- Kurkilahti M., Appelberg M., Begstrand E., Enerledin O.** An indirect estimate of bimodal gillnet selectivity of smelt // J. Fish Biol. 1998. V. 52. Р. 243–254.
- Lander R.** Swimming thrust of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to selectivity of gillnets // J. Fish. Res. Board Canada. 1969. V. 26. Р. 1383–1385.
- Lleonart J., Salat J., Torres G.J.** Removing allometric effects of body size in morphological analysis // J. Theor. Biol. 2000. V. 205. Р. 85–93.
- Lsena S., Tjemsland J.** A method of finding an empirical total selection curve for gill nets, escribing all means of attachment // Retorts Norw. Fish. Marine Investigations. 1963. V. 13. № 6. Р. 88–94.
- Randall D.** Hughes and Shelton: the fathers of fish respiration // J. Experim. Biol. 2014. V. 217. Р. 3191–3192.
- Santos M., Gaspar M., Monteiro C., Erzini K.** Gill net selectivity for European hake *Merluccius merluccius* from southern Portugal: applications for fishery management // Fish. Sci. 2003. V. 69. Р. 873–882.
- Sbrana M., Belcari P., Ranieri S. et al.** Comparison of the catches of European hake (*Merluccius merluccius* L., 1758) taken with experimental gillnets of different mesh sizes in the northern Tyrrhenian Sea (western Mediterranean) // Sci. Marina. 2007. V. 71. № 1. Р. 47–56.
- Wegner N.C., Sepulveda C.A., Bull K.B., Graham J.B.** Gill morphometrics in relation to gas transfer and ram ventilation in high-energy demand teleosts: scombrids and billfishes // J. Morphol. 2010. V. 271. Р. 36–49.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Положим, что между размахом челюстей h и длиной рыбы l существует аллометрическая зависимость (Мина, Клевезаль, 1976).

заль, 1976; Leonart et al., 2000). Описывая зависимость величины h от l нелинейной функцией вида $h = f(l)$, находим величину h для каждой размерной группы l . Подставляя h в функции (3) и (4), вычисляем величины $P(\mathcal{Y})$ и $P(H)$ для каждой размерной группы, вошедшей в улов. Полученные распределения представлены на рис. 6. Имеет место характерная взаимная связь вероятностей $P(\mathcal{Y})$ и $P(H)$, а именно: при увеличении размера рыбы вероятность захода в ячейку уменьшается, тогда как вероятность попадания на нить возрастает. Динамика величин $P(\mathcal{Y})$ и $P(H)$ лучше прослеживается не на отдельных значениях $P(\mathcal{Y})$ и $P(H)$, а на отношении $P(\mathcal{Y})/P(H)$ (рис. 3). Действительно, пусть состав совокупности A изменился на состав B . Тогда если $\frac{P(\mathcal{Y})_A}{P(\mathcal{Y})_B} = \frac{P(H)_B}{P(H)_A} = 0,07$, то $\frac{P(\mathcal{Y})_A/P(H)_A}{P(\mathcal{Y})_B/P(H)_B} = 0,53$. Следовательно, при одном и том же изменении состава совокупности диапазон колебания отношения $P(\mathcal{Y})/P(H)$ шире диапазона колебаний отдельных величин $P(\mathcal{Y})$ и $P(H)$ в среднем в $\approx 7,6$ раз.

Приложение 2

Пусть $N_{G_{\max} > 4\mu}$ — количество рыб некоторой размерной группы, имеющих $G_{\max} > 4\mu$ и способных удержаться в ячейке шага μ , а $n_{G_{\max} \leq 4\mu}$ — количество рыб, имеющих $G_{\max} \leq 4\mu$ и проячивающихся через данную ячейку. Тогда для любой размерной группы доля $P_{G_{\max} > 4\mu}$ удержанных в ячейке рыб от общего количества прикоснувшихся к сети запишется в следующем виде:

$$P_{G_{\max} > 4\mu} = \frac{N_{G_{\max} > 4\mu}}{N_{G_{\max} > 4\mu} + n_{G_{\max} \leq 4\mu}}. \quad (14)$$

Область I. $P_{G_{\max} > 4\mu} = 1$. Характеризуется отсутствием рыб, способных пройти сквозь ячейку — член $n_{G_{\max} \leq 4\mu}$ в знаменателе дроби (14) равен 0.

Область II. $0 < P_{G_{\max} > 4\mu} < 1$. Характеризуется величиной доли $P_{G_{\max} > 4\mu}$, закономерно уменьшающейся от $l_{\text{порог}}$ к l_0 . Действительно, начиная с $l_{\text{порог}}$ в совокупности появляются рыбы, способные пройти сквозь ячейку, причем количество $n_{G_{\max} \leq 4\mu}$ таких рыб возрастает с уменьшением величины размерной группы, а количество рыб $N_{G_{\max} > 4\mu}$ убывает.

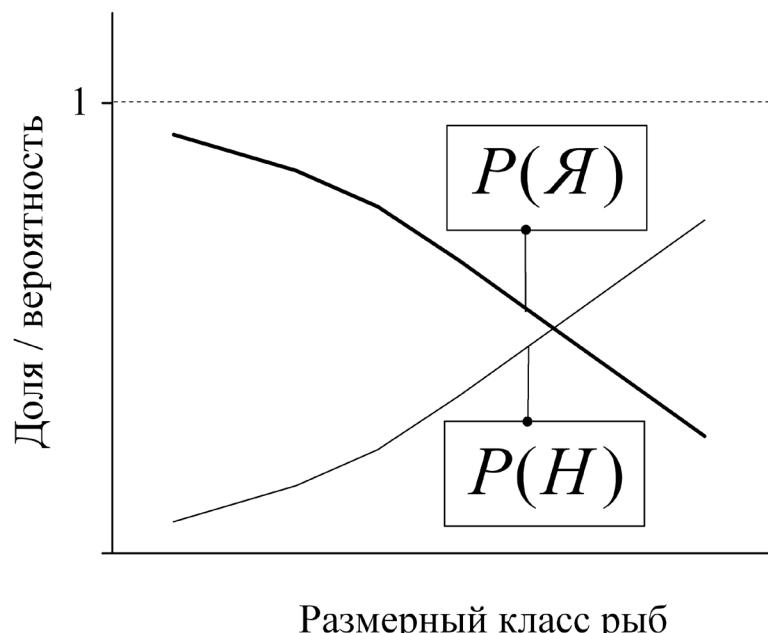


Рис. 6. Взаимная динамика величин вероятностей захода в ячейку $P(\mathcal{Y})$ и попадания на нить $P(H)$, рассчитанных на основе модели.

Область III. $P_{G_{\max}>4\mu} = 0$. Характеризуется тотальным уходом сквозь ячейю — член $N_{G_{\max}>4\mu}$ в числителе и знаменателе дроби (14) равен 0. Следовательно, $P_{G_{\max}>4\mu} = 0$ при любой величине $n_{G_{\max}\leq 4\mu}$.

Приложение 3

Формирование долей удержаных в ячее и запутавшихся рыб в четырех областях имеет свои характерные особенности.

Область Ξ . $P(\mathcal{Y})/P(H) = 0$, $P(Y)/P(3) = 0$. Равенство нулю обоих отношений имеет место вследствие равенства нулю обоих числителей — $P(\mathcal{Y}) = 0$ и $P(Y) = 0$, так как данный интервал включает в себя достаточно крупных для обвязывания рыб. Однако $P(H)$ и $P(3)$ могут быть не равны 0, и в этом случае услов пред-ставлен только запутавшимися рыбами.

Область Ω . $P(\mathcal{Y})/P(H) \neq 0$, $P(Y)/P(3) \neq 0$. Оба отношения на всем протяжении области равны друг другу и возрастают.

Область X. $P(\mathcal{Y})/P(H) \neq 0$, $P(Y)/P(3) \neq 0$. Отношение $P(\mathcal{Y})/P(H)$ на данном интервале продолжает возрастать, тогда как $P(Y)/P(3)$ убывает до 0. Последнее обстоятельство связано с появлением рыб, имеющих максимальный охват меньше периметра ячей, причем их доля возрастает к единице с уменьшением размерной группы.

Область Ψ . $P(\mathcal{Y})/P(H) \neq 0$, $P(Y)/P(3) = 0$. Отношение $P(\mathcal{Y})/P(H)$ возрастает, однако отношение $P(Y)/P(3)$ равно нулю, поскольку $P(Y) = 0$ (имеет место тотальный уход сквозь ячейю). Однако $P(3)$ может быть не равно 0, следовательно, улов здесь представлен только запутавшимися рыбами.

GILLNET SELECTIVITY MODEL CONSIDERED FISH GILLED AND ENTANGLED

© 2015 г. F. S. Lobyshev, E. A. Kriksunov, A. E. Bobylev*, V. A. Byrmensky

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119992

**Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, 199071*

The method worked out is based on a physical description of catch that produces proportions of fish that are gilled and entangled. The approach is applicable for assessing the number of fish that contact gillnets. Model parameters are estimated from catch-length analysis, mesh measurements, and fish morphometry

Keywords: gillnet selectivity, model, size group frequency, gilled, entangled fish.