

УДК 591.524.1:597.517.949.2(262.54)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ АЗОВСКИХ РЫБ  
НА ПРИМЕРЕ ХАМСЫ И БЫЧКА-КРУГЛЯКАЛ.В.Абецдарская, Т.А.Ворон,  
А.Б.Горстко, Н.С.Задорожная,

В.Ю.Сычева

(НИИМ и ПМ СКНЦ ВШ)

С.П.Воловик, И.Ф.Ковтун

(АзНИИРХ)

Моделирование основных процессов, определяющих динамику биомассы и численности популяций рыб, описывается блоком "Рыба", который является составной частью модели экосистемы Азовского моря. Учитывали представителей ихтиофауны Азовского моря, имеющих наибольшее промысловое значение или играющих существенную роль в экосистеме. Осетровые, судак, лещ, тарань, хамса, тюлька и бычок-кругляк рассматривались отдельно, а остальные были объединены в разряд "Прочие".

Таким образом, блок "Рыба" представлял собой совокупность восьми блоков, каждый из которых отражал основные этапы жизненного цикла популяций указанных рыб (рис.1).

По каждой рыбе исследовались следующие этапы одного годового цикла: зимовка; преднерестовый нагул; нерест - период, определяющий величину нового поколения каждой рыбы; посленерестовый нагул. Таким образом, моделировались все наиболее важные этапы годового цикла рыб.

Рассмотрим моделирование процесса питания, который является общим для всех рыб. Пусть  $K = \{ K_1, K_2, \dots, K_p \}$ , - вектор, характеризующий состояние кормовой базы на шаге. Компонентами этого вектора являются биомассы тех видов животных и растительных организмов, которые представляют собой основные объекты питания рассматриваемых в модели популяций. Для каждой популяции вектор  $K$  упорядочен в соответствии с тем местом, которое занимает этот вид в рационе питания, заданного

вектором  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ . Поскольку вектор  $K$  описывает состояние всей кормовой базы, в нем возможно равенство нулю некоторых компонент, что означает отсутствие видов, представленных этими компонентами, в рационе питания популяции.

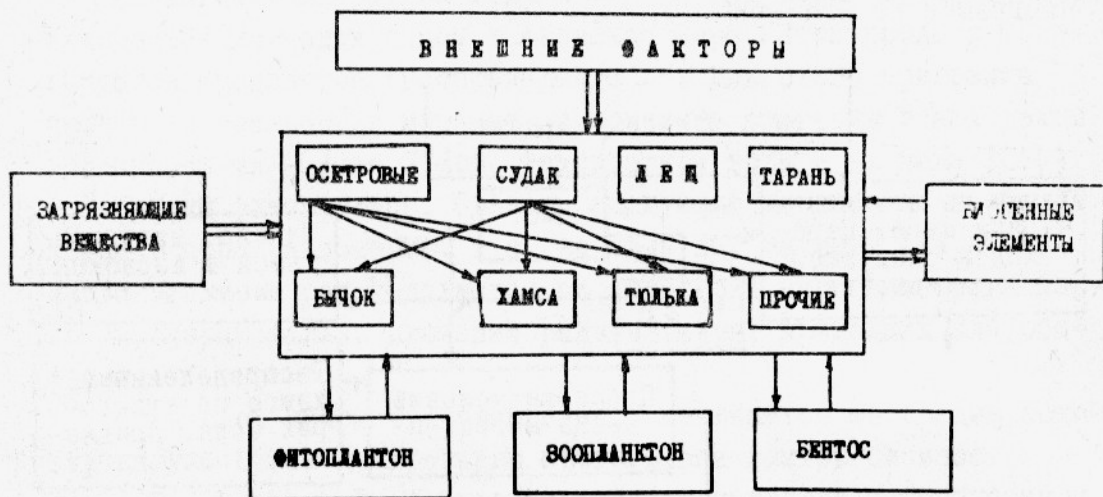


Рис. I. Взаимодействие блока "Рыба" с другими блоками имитационной системы:

— — трофические связи; == — иные отношения

Обозначим через  $B$  и  $N$  биомассу и численность популяции. Процесс питания моделируется в процедуре "Корм" по следующему алгоритму. По заявке на  $i$ -ый вид корма проверяется возможность ее удовлетворения для всей популяции  $a_i = \frac{K_i}{N} - R_i$ .

Величину  $a_i$  назовем невязкой.

1. Если  $a_i > 0$ , то заявка удовлетворена, при этом фиксируется остаток биомассы этого вида корма. Будем предполагать, что в случае нехватки корма, обладающего более высоким приоритетом, этот остаток потребляется рыбой для восполнения неудовлетворенного спроса.

2. Если  $a_i < 0$ , то просматривается вектор невязок  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{i-1}\}$  и неудовлетворенный спрос ликвидируется за счет видов корма, имеющих положительные невязки  $a_j$ .

Если же все  $a_j (j = 1, 2, \dots, i-1)$  неположительны (случай 2) или все  $a_j (j = 1, 2, \dots, i-1)$  неотрицательны (случай 1), а также, когда  $a_i = 0$ , следует переход к виду корма  $i + 1$ .

В результате расчетов по данному алгоритму преобразуются величины  $B$  и  $N$  получением положительных или отрицательных приращений  $\Delta B$  и  $\Delta N$  соответственно.

Моделирующий алгоритм блока "Хамса" реализован в виде программы на ЭВМ (рис.2).

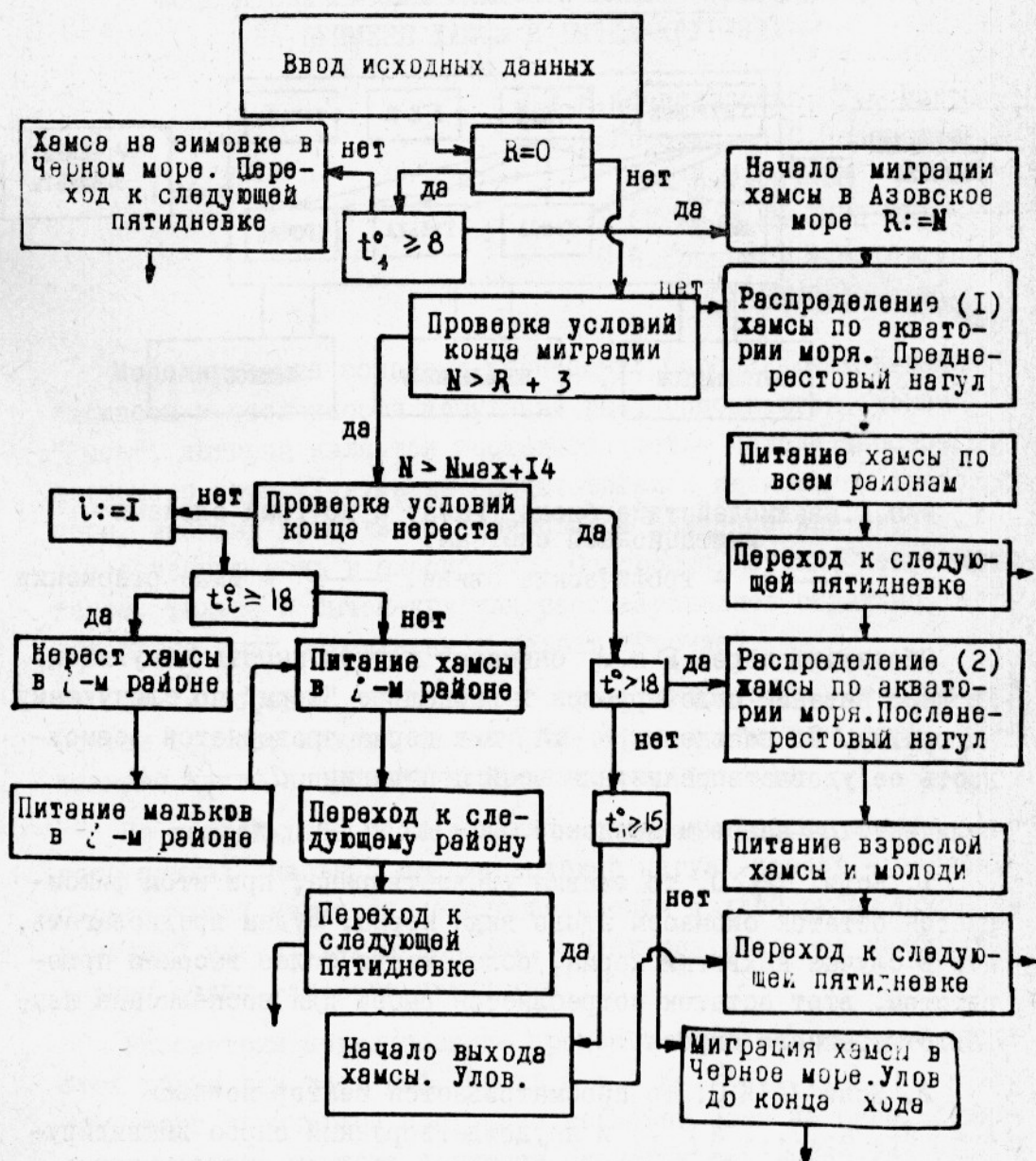


Рис.2. Блок-схема модели "Хамса":  
 $i$  - номер района ( $i = 1, 2, \dots, 7$ );  $N$  - номер пятидневки;  $R$  - счетчик, фиксирующий начало весенней миграции хамсы в Азовском море;  $t_i^0$  - температура воды в  $i$ -ом районе моря

1. Поскольку хамса не зимует в Азовском море, а появляется в нем после середины апреля, мигрируя из Черного моря, процесс зимовки ее в программе, реализующей моделирующий алгоритм данного блока, не учитывается.

2. Когда температура воды в Керченском проливе равна  $8^{\circ}\text{C}$ , начинается миграция хамсы в Азовское море. Этот процесс моделируется процедурой "Распределение I". Для этого программа проверяет все районы моря на пригодность обитания в них хамсы (соленость их - выше  $7^{\circ}/\text{oo}$ , температура воды - не ниже  $10^{\circ}\text{C}$ ). Эти районы фиксируются. Сделаны следующие допущения: хамса заходит в море равномерно, т.е. за один шаг заходит  $1/4$  часть всего стада, и распределяется по акватории моря тоже равномерно, пропорционально площадям районов моря, пригодных для обитания.

С заходом хамсы в Азовское море начинается ее преднерестовый нагул. Для моделирования этого этапа вектор биомасс  $B = \{ B_1, B_2, \dots, B_7 \}$  преобразуется - подвергается описанной выше процедуре "Корм", в результате чего вычисляются измененные биомассы хамсы в каждом районе.

3. Поскольку сигналом к началу нереста в значительной мере является температура воды (обычно до  $18^{\circ}\text{C}$ ), то в программе после завершения процедуры "Распределение I" проверяется температура по всем районам обитания и фиксируются те из них, где температура оказывается не меньше  $18^{\circ}\text{C}$ . Также фиксируется номер соответствующей пятидневки ( $N_{нач. i}$ ) - начало нереста хамсы в  $i$ -ом районе. Компоненты  $N_{i1}$  и  $B_i$  векторов численности и биомассы  $N_i$  и  $B$  преобразуются процедурой "Нерест", в результате чего подсчитывается численность и биомасса нового урожая молоди.

Эффективность нереста, т.е. величина нового урожая, зависит от большого числа факторов. Анализируя данные многолетних наблюдений, можно отметить, что на качество урожая хамсы особенно сильно влияет численность производителей. Зависимость величины нового урожая от числа производителей используется в моделировании процесса нереста при подсчете численности мальков, появившихся на  $N$ -м шаге в  $i$ -м районе.

$$N_{\text{мол.}i}^N = N_{\text{мол.}i}^{N-1} + K_1^N \cdot K_2^N \cdot N_{i1}^N \cdot N_{\text{сеч.}}$$

где  $N_{\text{мол. } i}$  - численность мальков, появившихся в  $i$ -м районе на шаге  $N$  :

$N_{\text{сег.}}$  - количество сеголеток в расчете на одного производителя;

$K_1$  - коэффициент, указывающий долю производителей, участвующих в нересте;

$K_2$  - коэффициент, характеризующий влияние остальных факторов на изменение векторов  $N_{\text{мол.}}$  и  $B_{\text{мол.}}$  в процедуре "Нерест".

Известно, что нерест хамсы длится в среднем 2,5 мес., что соответствует примерно 14-ти пятидневкам. Зная значение  $N_{\text{нач. } i}$ , т.е. номер пятидневки начала нереста в  $i$ -ом районе, определяется время окончания нереста в тех районах моря, где он происходил. Это соответствует пятидневке с номером  $N_{\text{нач. } i} + 14$ . Однако, учитывая тот факт, что размножение хамсы по акватории моря начинается, как правило, не в одно время, процедура "Нерест" работает в программе до шага с номером  $N_{\text{max}} + 14$ ,

где  $N_{\text{max}} = \max_i N_{\text{нач. } i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 7$ .

Когда номер шага станет больше значения  $N_{\text{max}} + 14$ , программа рассчитывает численность нового урожая, суммируя количество мальков по всем районам.

4. После нереста хамса распределяется по морю (предполагается, что равномерно). Векторы численностей и биомасс взрослой хамсы и молоди суммируются, определяя ее общий запас. В течение шагов, соответствующих по времени периоду нагула хамсы, эти векторы преобразуются - подвергаются воздействию процедуры "Корм". Распределение и питание хамсы продолжается до того момента, когда температура воды в первом районе превышает  $18^{\circ}\text{C}$ . Сосредоточивается хамса в первом и втором районах при более низкой температуре, что учтено в программе, которая распределяет всю популяцию в соответствующих районах.

Проверяя на каждом шаге температуру воды в первом районе, программа фиксирует начало выхода хамсы в Черное море (при снижении температуры воды в Азовском море до  $18-15^{\circ}\text{C}$ ).

В период осенней миграции ведется промысловый лов хамсы. Известно, что первыми выходят из Азовского моря сеголетки, а после охлаждения воды в проливе (ниже  $15^{\circ}\text{C}$ ) мигрируют и взрос-

лые особи. Соответственно, и в программе на каждом шаге определяется численность хамсы, мигрирующей в Черное море, с учетом вылова, а также подсчитывается ее остаток.

Когда этот остаток станет равным нулю, счет прекратится. На выходе мы получим численность нового урожая, величину улова и численность азовской популяции хамсы с учетом улова.

Описанный выше моделирующий алгоритм был использован для численных экспериментов. Исходные данные о численности и биомассе возрастных групп хамсы, а также результаты расчетов приведены ниже.

Численность (числитель, млн.шт.) и биомасса (знаменатель, тыс.ц) поколения хамсы

Август 1971 г.

Возраст	
0+ . . . . .	$\frac{40027}{1076}$
1+ . . . . .	$\frac{10950}{951}$
2+ . . . . .	$\frac{7780}{772}$
3+ . . . . .	$\frac{59}{5}$

Сентябрь 1972 г.

Фактическая . . . . .	$\frac{39792}{1865}$
Расчетная . . . . .	$\frac{25247}{1207}$

Отклонения расчетных величин от фактических составляют соответственно 36 и 35%. Такой результат для первого этапа моделирования столь сложной системы вполне удовлетворителен.

Бычок-кругляк – важнейший компонент экосистемы моря, где он является одним из основных утилизаторов продукции бентоса. Кроме того, это важная промысловая рыба, уловы которой достигали 906 тыс.ц., а за последнее десятилетие составляли в среднем 425 тыс.ц.

Основные этапы годового цикла жизни популяции бычка /1-5/ отражены в моделирующем алгоритме (рис.3).

Зимовка. При температуре воды ниже 5<sup>0</sup>С бычок-кругляк становится пассивным и почти не питается. Зимует он в основном в северной и северо-восточной части центрального района Азовско-

го моря. В связи с этим в модели проверяется температура воды во втором районе для выяснения возможности обитания бычка в предполагаемых районах зимовки.

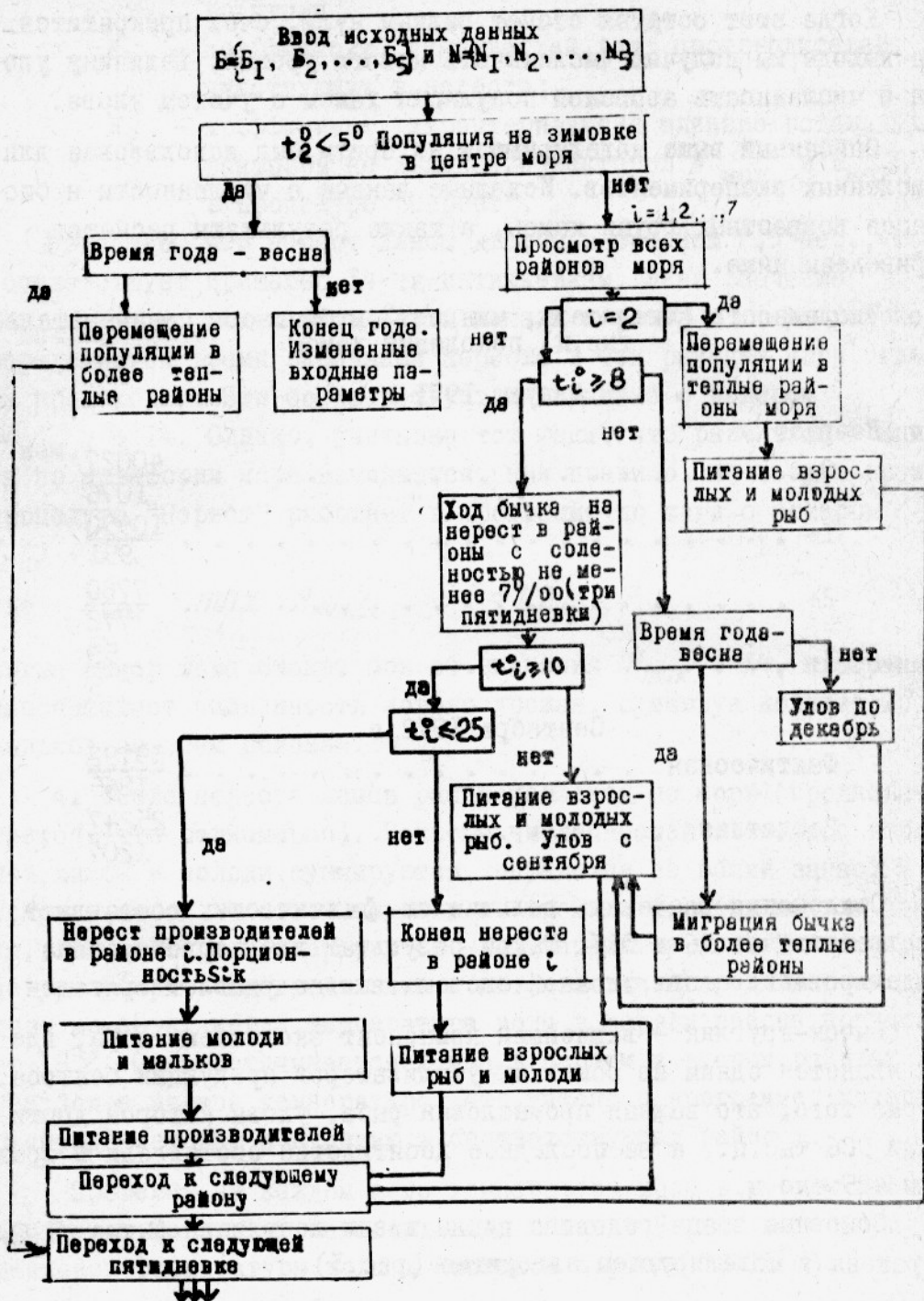


Рис.3. Блок-схема модели "Бычок-кругляк":

$B = \{B_1, B_2, \dots, B_5\}$  - вектор биомассы возрастных групп;  $N = \{N_1, N_2, \dots, N_5\}$  - вектор численности возрастных групп;  $i$  - номер района;  $t_i^0$  - температура воды в районе.

Температура воды во втором районе может быть ниже  $5^{\circ}\text{C}$  либо весной, когда бычок еще зимует, либо осенью, когда рыба уходит на зимовку. Если бычок находится в районе зимовки, то при прогревании воды в более мелких районах, граничащих со вторым, какая-то часть рыбы будет уходить кормиться в эти районы.

Допускается, что рыба полностью заходит в район зимовки, если температура воды в этом районе будет меньше  $5^{\circ}$  в течение трех пятидневок, в противном случае рыба продолжает питаться в тех районах моря, где температура воды не меньше  $5^{\circ}\text{C}$  и откуда постоянно подходит в район зимовки. Подобное допущение не существенно, но введено с целью экономии машинного времени.

Программа реализует описываемый алгоритм при помощи введенной в нее функции  $f(t^{\circ}, g^{\circ})$ , зависящей от температуры воды  $t^{\circ}$  и прочих факторов  $g^{\circ}$ , среди которых наиболее важно состояние кормовой базы. Она служит для определения той части популяции, которая покидает район.

Здесь и в дальнейшем численность кругляка в районах моря в каждый момент времени пересчитывается по формуле:

$$N_i^t = N_i^{t-1} + f(t^{\circ}, g^{\circ}) \cdot N_j^t,$$

где  $j$  - рассматриваемый район моря;  
 $i$  - район соседний с  $j$ .

Преднерестовый нагул и нерест. Ввиду того, что нерестовые миграции бычка-кругляка главным образом определяются температурой воды, подсчитывается половозрелая часть стада, непосредственно участвующая в нересте, введением некоторой функции  $g(t)$ , так что

$$N_H^t = N_H^{t-1} + g(t) \cdot N^t,$$

где  $N_H^t$  - численность участвующих в нересте особей в рассматриваемом районе в данный момент времени  $t$ .

Районы, непригодные для нереста, исключаются проверкой условий на соленость воды; район 2 не рассмотрен.

Предполагается, что подход на нерест длится в течение трех пятидневок, что фиксируется счетчиком. На самом деле подход бычка в нерестилищах длится приблизительно 15 дней. Поскольку нерест осуществляется порционно (может выметываться до пяти порций), то счетчик  $S_{ik}$  указывает, какую порцию мечет рыба,



зашедшая на нерест в район  $i$  через  $k$  пятидневок после начала хода.

Икрометание продолжается в течение всего периода, когда температура воды остается выше  $10^{\circ}\text{C}$ , и заканчивается, когда она достигает  $25^{\circ}\text{C}$ .

Известно, что отложив очередную порцию икры, самки отходят от берега и в течение 18 дней кормятся, поэтому в программе предусмотрено изменение их биомассы под воздействием описанной выше процедуры "Корм".

Количество выживших мальков определяется следующим соотношением:

$$N_{мл. iks} = a \times N_{H iks},$$

где  $N_{H iks}$  - численность особей, зашедших через  $k$  пятидневок от начала хода в  $i$  район на нерест, откладывающих  $S$ -ю порцию икры.

Коэффициент  $a$  выбирается с учетом средней плодовитости для бычка-кругляка и условий, в которых происходит нерест.

Неучаствующие в процессе нереста особи (молодь и мальки, уже появившиеся от других производителей), в течение всего периода нереста кормятся, т.е. находятся под воздействием процедуры "Корм".

После нереста, который длится до середины августа, бычок-кругляк отходит от берегов в районы нагула. Здесь, начиная с 15 сентября и по декабрь, его ловят (отлавливается до 30% стада).

Результаты работы описанного моделирующего алгоритма - преобразованные значения численности и биомассы популяции бычка.

По программе, реализующей этот алгоритм, проведены численные эксперименты. Исходными данными служили биомасса и численность популяции по состоянию на октябрь 1971 г.

Данные по состоянию на октябрь 1972 г.

Показатели	Фактические	Расчетные	Ошибки расчетов, %
Численность, млн. шт.	655	673	3
Биомасса, тыс. ц	108	139	28

Из приведенных данных следует, что процент ошибки между фактическими и расчетными данными по численности и биомассы бычков-кругляков составляет около 30%.

#### Список использованной литературы

1. Ш у л ь м а н Г.Е., В е н г р ж и н Е.П., Д у б и н и н а В.Н. Особенности газового обмена бычков Азовского моря в связи с условиями обитания. "Вопросы ихтиологии", 1957, вып.8, с.77.
2. М и х м а н А.С. О плодовитости азовских бычков-кругляка и сирмана. Труды АзНИИРХ, 1963, вып.6, с.105.
3. К о с т ю ч е н к о В.А. Распределение бычка-кругляка в Азовском море в связи с распределением его кормовой базы Труды АзчерНИРО, 1955, т.16, с.157.
4. К о с т ю ч е н к о В.А. Питание бычка-кругляка и использование им кормовой базы Азовского моря. Труды АзНИИРХ, 1960, т.1, вып.1, с.341.
5. К у д е л и н а Е.Н. Суточный рацион мальков бычков-кругляка и рыжика на ранних этапах развития. Труды АзНИИРХ, 1963, вып.6, с.83.
6. Г р у д и н и н П.И. Прогнозирование запаса азовской хамсы. "Рыбное хозяйство", 1963, № 12, с.21.
7. К о р н и л о в а В.П. Питание азовской хамсы. Труды ВНИРО, 1955, т.31, вып.1, с.368-378.
8. К о р н и л о в а В.П. Питание хамсы и тьялки в условиях нового режима Азовского моря. Труды АзНИИРХ, 1960, т.1, вып.1, с.361.
9. К а л и н и н а Э.М. Допустимые и критические концентрации кислорода для молоди. Труды Севастопольской биол. станции, 1961, т.14, с.215-219.

Modelling of the dynamics of fish populations  
from the Azov Sea with special reference to  
anchovy and round goby

L.V. Abetsedarskaya, S.P. Volovik,  
T.A. Voron, A.B. Gorstko,  
N.S. Zadorozhnaya, I.O. Kovtun,  
V.Yu. Sycheva

S u m m a r y

Since 1930 data have been collected on the dynamics of populations of most important species of fish from the Azov Sea. Regularities and relationships characterizing variations in the parameters of fish populations have been ascertained. One of the main blocks, FISH from the simulation model of the ecosystem is generally described. The processing of data in separate blocks referred to such abundant marine species of fish as anchovy and round goby is discussed. The error of computed results at modelling the population dynamics and biomass within an annual cycle constitutes about 35% as compared to actual observations.