

УДК 681.3:639.2

## О МОДЕЛИРОВАНИИ НЕКОТОРЫХ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ РЫБОЛОВСТВА И РЫБОВОДСТВА С УЧЕТОМ ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Т. И. Булгакова, А. В. Засосов, М. И. Шатуновский  
ВНИРО

Результаты современных исследований и практики рыболовства свидетельствуют о том, что ресурсы океана не безграничны. В последнее время показано неблагоприятное состояние большого количества ранее многочисленных промысловых объектов, обитающих на континентальном шельфе, и изменения структуры биоценозов. В некоторых прибрежных районах в результате загрязнения индустриальными отходами и сокращения стока рек резко ухудшились условия воспроизводства ценных видов рыб. В этой связи все более необходимо разумное построение рыбного хозяйства и промысла на основе научного регулирования, а также рыборазведения не только для товарного выращивания, но и для пополнения естественных популяций.

Эти задачи — часть общей проблемы управления природными ресурсами, решать которые и у нас, и за рубежом стараются при помощи математического моделирования (Вишберг, Анисимов, 1969; Полетаев, 1966; Меншуткин, 1971, Уатт, 1971 и др.).

Учитывая некоторый опыт такого моделирования в рыбном хозяйстве, мы попытались показать возможность моделирования управляющего воздействия.

В настоящей работе формализовано решение трех наиболее важных и актуальных задач: рациональное построение промысла естественных популяций, товарное рыборазведение (прудовое, садковое, бассейновое) и выращивание полноценной молоди для выпуска в естественные водоемы. При построении моделей учитывались различные моменты производственного процесса, в основном обменного характера, вытекающие из анализа физиологических закономерностей: ассимиляции пищи, закономерностей роста, энергетического обмена, процесса воспроизводства.

С точки зрения системного анализа эти задачи можно обобщить и представить как проблему управления хозяйственными системами. Под хозяйственной системой  $S$  будем понимать совокупность  $n$  взаимосвязанных компонент вместе с управляющими воздействиями. Некоторые из компонент — популяции живых организмов, некоторые — косные (например, количество биогенов или искусственного корма). Каждая  $i$ -ая компонента характеризуется состоянием  $x_i$ . При организации эксплуатации системы  $S$  возникает необходимость оптимального управления ею.

**Задача управления естественной популяцией в водоеме.** Пусть при эксплуатации системы  $C$  нас интересует снятие урожая с ее компонент, причем, не нарушая общности, обозначим эти компоненты первыми  $m$  номерами. Обобщая постановку задачи управления рыбной популяцией, данную В. Р. Меншуткиным (1970), считаем, что для того чтобы в единицу времени получить урожай  $\bar{Y} = \{y_1, \dots, y_m\}$  при величине запаса  $\bar{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$ , нужно приложить усилие  $\bar{f} = \{f_1, \dots, f_n\}$ . Вектор  $\bar{f}$ , в общем случае имеющий размерность  $n$ , будет характеризовать управление системы  $C$ . Компонента  $f_i$  этого вектора, например, характеризует интенсивность промысла  $i$ -ой популяции (при  $i \leq m$ ).

В общем случае популяции нельзя считать однородными, т. е. нужно рассматривать их разделенными по возрасту ( $j=1, \dots, I_i$ ) и полу. Тогда вместо векторов будем иметь матрицы  $X$ ,  $Y$ ,  $f$ , которые могут быть функциями от времени.

Если рассматривать дискретные моменты времени с дискретом  $\Delta t$ , то модель системы  $C$  с управлением запишется в виде

$$X(t) = \Phi[x(t-1), f(t-1), Z(t-1)],$$

т. е. состояние системы в момент времени  $t$  представляет собой функцию от ее предыдущего состояния, от управляющих воздействий и от случайных возмущений  $Z$ , которые могут быть заданы законом распределения. Определение вида функции  $\Phi$  и представляет собой моделирование системы  $C$ . В результате управляющего воздействия  $f$  на  $C$  получим урожай

$$Y(t) = Y[x(t), f(t)].$$

Одной из задач оптимального управления природными ресурсами является максимизация урожая  $Y^g$  в течение длительного времени  $T$ , который представим в виде линейной функции от  $y_{ij}$  ( $y_{ij}$  — урожай, полученный от  $j$ -ой возрастной группы популяции  $i$ ), а именно

$$Y^g = \sum_{t=0}^{T/\Delta t} \sum_i^m \sum_j^{I_i} A_{ij} \cdot y_{ij}(t),$$

где  $t=0$  и  $t = \frac{T}{\Delta t}$  — моменты начала и конца промысла;

$A_{ij}$  — числовая мера ценности биомассы  $j$ -ой возрастной группы популяции  $i$ .

При постоянной величине  $A_{ij}$ , не зависящей от  $i$  и  $j$ , будем максимизировать величину снимаемой биомассы  $Y^b$ .

Другой задачей оптимального управления является задача максимизации экономической прибыли от эксплуатации системы  $C$ . Пусть  $P(t)$  — общая прибыль от эксплуатации системы  $C$  в единицу времени. Денежная стоимость единицы биомассы  $i$ -го вида, выраженной в калориях,  $\alpha_i$  может быть различной для разных популяций (например, она может отражать вкусовые качества  $i$ -го вида) и может зависеть от величины урожая (в общем случае может падать с его ростом).

Затраты на промысел можно представить в виде суммы затрат:

- 1) пропорциональных величине усилия  $f_j$ ;
- 2) пропорциональных величине урожая  $y_{ij}$ ;
- 3) постоянных, не зависящих от величины усилия или от урожая ( $B_{ij}^0$ ).

Например, если интенсивность некоторого рыболовного промысла измерять количеством выметанных сетей в единицу времени, то часть затрат будет пропорциональна интенсивности промысла, часть (например, расходы на переход судна в район промысла, навигационные расходы и др.) не зависит ни от  $\bar{f}$ , ни от  $Y^b$ , а часть (например, на первичную обработку рыбы на судне) — пропорциональна  $Y^b$ .

Тогда

$$P(t) = \sum_i^m x_i \sum_j^{S_m} A_{ij} y_{ij} - \sum_i^n \sum_j^{S_n} (B_{ij} f_{ij} + b_{ij} y_{ij} + B^0_{ij}).$$

Перейдем к подробному рассмотрению системы промысла одной популяции ( $i=1$ ). Модель одной популяции следует строить обязательно с учетом ее возрастной структуры.

Как в теоретических, так и в практических экологических исследованиях необходимо знать, какие возрастные группы популяции накапливают наибольшее количество органического вещества, какие кормовые ресурсы водоема они потребляют, у каких из них наибольшая эффективность прироста вещества в тканях. Необходимо также представить роль отдельных возрастных групп в воспроизводстве популяций, знать относительные затраты энергии на прирост и обмен. В онтогенезе рыб закономерно изменяются соотношения между пластическим, энергетическим и генеративным обменом. С увеличением возраста у рыб снижается эффективность использования пищи на рост (метаболическая эффективность  $K_1$ ), увеличивается доля генеративного обмена в годовом балансе энергии (вещества). До определенного возраста увеличивается синтез жиров в организме, а также относительная масса гонад, их калорийность, вес и содержание жира в зрелой икре.

Биомасса рыб разного возраста различается не только по метаболической эффективности, но и по калорийности, а следовательно, по пищевой ценности (табл. 1).

Таблица 1

Соотношение белок/жир и калорийность тела (тушка + печень) и зрелой икры самок балтийской трески разного возраста (Шатуновский и др., 1972)

Показатели	Возраст, годы					
	2	3	4	5	6	7
Соотношение содержания белка и жира в теле трески $P_f/G_f$	8,0	4,5	2,9	3,2	3,2	4,0
Калорийность тела, $A_i$ , кал/г сырого вещества	680	770	870	840	810	720
Соотношение содержания белка и жира в икре	—	8,1	4,4	4,7	4,9	8,1
Калорийность икры, кал/г сырого веса икры	—	890	930	910	890	830

У особей старших возрастных групп многих видов рыб пищевая ценность ниже, у них велико содержание калогенов, мало содержание жиров; кроме того, в течение нерестового сезона они значительно истощаются. Сезонные изменения калорийности тела (тушка + печень) четырехгодовалых самок балтийской трески (в кал/г сырого вещества) даны ниже.

Ноябрь	880
Январь	940
Март	910
Апрель	840
Июнь	810



Кроме исследований возрастных изменений в обмене и в основных параметрах продукционного процесса, необходимо учитывать сезонные ритмы обменных процессов. Работы последних лет показали, что ритмы сезонных физиологических процессов у рыб разного возраста, а также у самцов и самок не совпадают (Шатуновский, 1973). У самцов многих видов при большей, чем у самок, интенсивности энергетического обмена больше затраты белков и жиров в ходе размножения. В период нагула у них раньше, чем у самок, завершается белковый синтез, скорость накопления жиров в их организме в первую половину вегетационного периода выше, чем во вторую. Созревание гонад самцов также начинается и завершается в течение годового цикла раньше, чем у самок.

С увеличением возраста половозрелых рыб в их организме израсходованные за период размножения ресурсы белка и жира восстанавливаются дольше, максимальная интенсивность белкового роста и накопления жиров сдвинута на середину и конец вегетационного периода, сроки созревания половых продуктов у рыб разного возраста неодинаковы. Перед нерестом наблюдается значительный дисбаланс между постоянно возрастающими масштабами генеративного обмена и пластическими и энергетическими возможностями организма. Это приводит к истощению, вызванному распадом белково-липидных комплексов в мышечной ткани и увеличению естественной убыли старших рыб после нереста. В последнее время в ряде работ сделаны попытки сопоставить степень встречаемости истощенных по физиологическим показателям рыб с коэффициентами их естественной убыли (Love, 1970; Борисов, Шатуновский, 1973; Борисов, статья в настоящем сборнике).

У молоди специфичны как ритмы накопления белка и жира в организме, так и оптимальные зоны температур для этих процессов.

Таким образом, при построении моделей рациональной эксплуатации популяций нужно учитывать данные по метаболической эффективности различных возрастных групп, данные по биохимической «ценности»  $A_{ij}$  биомассы рыб разного возраста и в разные сезоны, а также разное качество их половых продуктов.

На рис. 1 дана принципиальная блок-схема математической модели естественной популяции с учетом эколого-физиологических характеристик. Она построена только для самок и не отражает сезонных физиологических изменений; за единичный интервал времени взят год. Чтобы учесть сезонность и разновременность размножения разных возрастных групп, нужно брать более мелкие интервалы времени, например, квартал.

Состояние популяции описывается вектором  $\bar{X} = \{x_j\}$ ,  $j = 1, I$ , где составляющая  $x_j$  соответствует  $j$ -ой возрастной группе и описывается четырьмя характеристиками:  $N_j$  — численность;  $W_j$  — вес одной особи, г;  $P_j$  и  $G_j$  — содержание белка и жира в одной особи, г. На схеме сплошными линиями показаны потоки вещества или энергии, а пунктирными — функциональные связи.

Компонента  $X_k$  не детализируется и представляет собой кормовую базу данной популяции, через эту компоненту осуществляется связь данной популяции с другими популяциями системы  $S$ . Формирование рациона детально не показываем, его можно описать аналогично тому, как это было сделано в работе В. В. Меншуткина и Ю. Я. Кислякова (1967).

Подробно продукционный процесс показан для одной особи  $j$ -ой возрастной группы. Рацион ее  $r_j$  распределяется между основным об-

меном ( $Q_0$ ), активным ( $Q_a$ ), пластическим ( $P_L$ ), генеративным ( $G$ ) и неувоенной частью вещества (энергии)  $U$ .

Распределение вещества (энергии) между разными формами обмена для разных  $j$  различно и задается функцией  $p_1$ . Доля вещества, идущего на пластический обмен, подразделяется на собственно вещество (энергию) прироста  $\Delta\omega$  и на обеспечение этого прироста ( $\omega$ )\*. Для разных  $j$  соотношение между приростом белка ( $\Delta P$ ) и жира ( $\Delta G$ ) различно и задается функцией  $p_2$ . Доля вещества, идущего на генера-

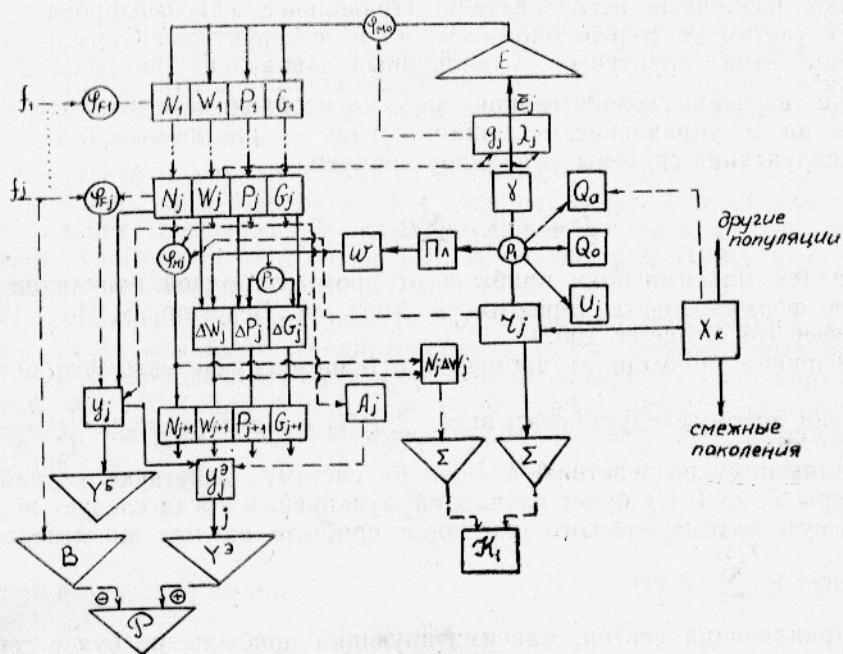


Рис. 1. Блок-схема системы управления промыслом естественной популяции

тивный обмен, подразделяется на создание вещества половых продуктов  $\bar{e}_j$  и на обеспечение этого процесса  $\gamma_j$ .  $\bar{e}_j$  представляет собой вектор, его компонента  $\lambda_j$  — количество продуцированной одной особью икры, компонента  $g_j$  — содержание жира в одной зрелой икринке, которое влияет на ее смертность  $\phi_{m0}$  (Грауман, 1972; Шатуновский, 1973). Выжившая молодь пополняет первую возрастную группу.

На естественную убыль  $j$ -ой группы  $\phi_{mj}$  влияет как численность возрастной группы  $N_j$ , так и качественный состав рыбы: соотношение в ее организме белка и жира  $P_j/G_j$ .

Управляющее воздействие  $\bar{f}$  — вектор, составляющая которого  $\bar{f}_j$  представляет собой интенсивность промысла  $j$ -ой возрастной группы и влияет на промысловую убыль  $\phi_{Fj}$ . Вылов  $j$ -ой группы, выраженный в биомассе, равен  $y_j = N_j \cdot W_j \cdot \phi_{Fj}$ ;  $A_j$  — «ценность» одного грамма биомассы  $j$ -ой возрастной группы (в калорийном выражении) — зависит от структуры этой биомассы и равна

\* Мы считаем, что на прирост вещества в соматических тканях, так же как и в генеративной ткани, затрачивается определенное количество энергии. Так, Стелл (Stell, 1965) считает, что для генеративного обмена сельди эта дополнительная энергия равна массе гонад. Фактически, в большинстве работ эта дополнительная энергия включается в энергетический обмен.

$$A_j = a \frac{P_j}{W_j} + b \frac{G_j}{W_j},$$

т. е. зависит от процентного содержания белка и жира. Здесь  $a$  и  $b$  — постоянные, соответствующие физиологической калорийности белка и жира (1 г белка — 4,1 ккал; 1 г жира — 9,3 ккал).  $Y^3_j = \sum A_j y_j$  есть ценностное выражение суммарного вылова.

Одной из задач оптимального управления системой  $S$  является максимизация урожая в весовых единицах, которую наиболее часто решают различные исследователи. Правильнее максимизировать урожай с учетом не только биомассы, но и ее структуры. Суммарное выражение этой структуры — калорийный эквивалент биомассы  $Y^3$ .

При изучении хозяйственной системы необходимо учитывать и затраты на ее управление, в данном случае — на промысел. Прибыль от эксплуатации системы за единицу времени

$$P = \alpha Y^3 - \sum B_j f_j - B_0.$$

Задачу максимизации прибыли от промысла одной популяции пытались формализовать Бивертон и Холт (R. Beverton, S. Holt, 1957) и Шефер (M. Schaefer, 1957).

Величина прибыли от промысла в общем случае есть функция от времени, потому следует искать  $\max \sum_{t=0}^{T/\Delta t} P(t)$  на интервале  $t = \left[0, \frac{T}{\Delta t}\right]$  по управляющему воздействию  $\bar{f}$ . Если на систему действуют случайные факторы  $Z$ , то  $P(t)$  будет случайной функцией, и тогда следует искать максимум математического ожидания прибыли на том же интервале,

$$\text{т. е. } \max E \sum_t^{T/\Delta t} P(t).$$

Управляющий вектор, максимизирующий прибыль, не будет совпадать с вектором, максимизирующим  $Y^3$  или  $Y^B$ .

При решении описанной задачи оптимизации нужно выполнять обязательное условие, чтобы по окончании периода промысла  $T$  система находилась в состоянии, допускающем дальнейшую эксплуатацию. Ю. М. Свирижев и Е. Я. Елизаров (1972) решают задачу оптимального управления биогеоценозом с точки зрения получения максимального урожая за интервал  $[0, T]$ . В конечный момент времени процесс прекращается в результате полного отбора биомассы. Это условие позволяет в некоторых случаях получить аналитическое решение, но допустимо не при управлении природной системой ресурсов, а только при управлении некоторыми искусственно созданными биологическими системами (хемостатом, системой замкнутого товарного разведения рыб и др.).

Нужно отметить, что не всегда следует выбирать стратегию промысла (т. е. управляющее воздействие  $\bar{f}$ , при котором достигается максимум экономической прибыли). В условиях недостатка продуктов питания иногда следует несколько уменьшить величину прибыли и получить при этом больший урожай  $Y^3$  (Schaefer, 1957).

В. В. Меншуткин (1970) предлагает для решения задачи оптимизации использовать либо математическую теорию игр (тогда одним противником следует считать административные органы управления промыслом, другим — природную систему  $S$ ), либо динамическое программирование. Решение задачи оптимизации значительно упростится, если рассматривать систему с управлением в стационарном состоянии.



Если не учитывать случайных воздействий, то в каждый момент времени можно получать одинаковую прибыль  $P_0$ , обусловленную стационарным состоянием системы. В этом случае отпадает необходимость налагать условия на конечное состояние системы (при  $t = \frac{T}{\Delta t}$ ): система может эксплуатироваться неограниченно долго. Кроме того, в этом случае нужно максимизировать не сумму  $\sum_{t=0}^{T/\Delta t} = P(t)$ , а  $P_0$  по управляющему воздействию  $\bar{f}$ , т. е. задача упрощается.

Этот способ решения задачи является развитием принятой в теории рыболовства концепции уравновешенного улова (Schaefer, 1954, 1957; Засосов, 1970), смысл которой заключается в том, что вылов биомассы некоторой популяции в единицу времени должен быть равен приросту биомассы за то же время.

Выше мы рассмотрели промысел и прибыль от него на примере популяции одного вида в водоеме. Для сложных морских экосистем трудно рассматривать совокупную многопопуляционную систему, как сделали Ф. В. Крогнус, Е. М. Крохин и В. В. Меншуткин (1969) для сообщества пелагических рыб озера Дальнего.

Для повышения продуктивности водной экосистемы важно, чтобы каждая из ее компонент (планктоноядные рыбы, бентосоядные рыбы, хищники) с наибольшей эффективностью использовала свои кормовые ресурсы на рост. Для одной популяции эффективность использования корма на рост (метаболическая эффективность  $K_1$ ) выражается формулой

$$K_1 = \frac{\sum N_j W_j}{\sum r_j},$$

для  $j$ -ой возрастной группы

$$K_{1j} = \frac{N_j \Delta W_j}{r_j}.$$

Данные, приведенные в табл. 2 и 3, иллюстрируют, как меняется продукция, урожай на корню и метаболическая эффективность популяции сельди (салаки Балтийского моря) и пикши Северного моря при селективном интенсивном промысле. Для салаки принято отсутствие флюктуаций численности поколений, модели для пикши составлены с учетом реального промысла стада Северного моря при отсутствии и наличии значительных флюктуаций численности отдельных поколений.

За основу была принята теоретическая непромысловая популяция салаки, численностью 3000 особей, соотношение возрастных групп в которой соответствует кривой населения (естественная убыль  $\phi_{mj}$  для  $j=1, \dots, 3$  принята в 35%, для  $j=4, \dots, 6$   $\phi_{mj}=50\%$ ) и флюктуации численности поколений отсутствуют. Продукция такой популяции 25,4 кг/год при потреблении 311 кг корма\*, эффективность использования потребленного корма на рост 8,2%. Если мы снимем урожай с такой популяции неселективно в 1000 особей, то получим 17,9 кг. Продукция икры на 1000 особей 1,5 кг.

\* Количество потребленного корма рассчитывалось отдельно для каждой возрастной группы по формуле балансового равенства Г. Г. Винберга (1965)  $r = 1,25 (\Delta W + Q)$ , где  $\Delta W$  — весовой прирост данной возрастной группы,  $Q$  — траты на энергетический обмен, полученные экспериментальным путем (Чекунова, Шатуновский, 1973). При этом затраты на обеспечение прироста  $W$  включены в  $Q$ . Продукция икры для каждой возрастной группы определялась по собственным материалам М. И. Шатуновского, собранным в Рижском заливе в 1965—1966 гг.

Расчет продукции, урожая и метаболической эффективности  
для балтийской салаки

Показатели	Возрастные группы						Сум- ма
	1	2	3	4	5	6	
<i>При отсутствии промысла</i>							
Численность, $N_j$ , шт.	1200	840	540	240	120	60	3000
Средний вес $W_j$ , г	8	16	25	35	45	53	—
Продукция $\Delta W_j N_j$ , кг	9,6	6,7	4,9	2,4	1,2	0,6	25,4
Урожай с 1000 особей $y_j$ , кг	3,2	4,5	4,5	2,8	1,8	1,1	17,9
Съеденный корм $r_j$ , кг/год	49	79	82	52	31	18	311
Продукция икры, кг	—	1,2	1,5	0,9	0,6	0,3	4,5
Метаболическая эффективность $\kappa_1$ , %	19	8,5	6,0	4,6	3,9	3,3	8,2
<i>Селективный промысел</i>							
Численность, $N_j$ , шт.	120	290	400	200	60	30	1000
Продукция $\Delta W_j N_j$ , кг	0,2	2,3	3,6	2,0	0,6	0,2	8,9
Урожай $y_j$ , кг	0,2	4,6	10,0	7,0	2,7	1,6	26,1
Съеденный корм $r_j$ , кг/год	1	28	61	42	16	9	157
Продукция икры, кг	—	0,4	1,0	0,7	0,3	0,1	2,6
Метаболическая эффективность $\kappa_1$ , %	—	—	—	—	—	—	5,7
<i>Остаток после воздействия селективного промысла</i>							
Численность $N_j$ , шт.	1180	550	140	40	60	30	2000
Продукция $\Delta W_j N_j$ , кг	9,4	4,5	1,3	0,4	0,6	0,2	16,4
Съеденный корм $r_j$ , кг/год	45	51	20	16	16	6	154
Продукция икры, кг	—	0,8	0,4	0,2	0,4	0,2	2,0
Метаболическая эффективность $\kappa_1$ , %	—	—	—	—	—	—	10,7

Таблица 3

Расчет продукции, урожая и метаболической эффективности  
для пикши Северного моря

Показатели	Возрастные группы						Сум- ма
	1	2	3	4	5	6	
<i>Продукция и количество потребленного корма 1000 особями гипотетической популяции пикши, необлавливаемой промыслом, при отсутствии флюктуации численности поколений</i>							
Средний вес $W_j$ , г	38	113	310	506	673	792	—
Численность $N_j$ , шт.	400	280	180	80	40	20	1000
Урожай биомассы $y_j$ , кг	15,2	31,6	55,8	40,5	26,9	15,8	186
Продукция $\Delta W_j N_j$ , кг	15,2	21,0	35,5	15,7	6,7	2,4	96,5
Съеденный корм $r_j$ , кг/год	76	105	284	173	114	50	802
Продукция икры, кг	—	3,5	6,7	5,3	3,8	2,0	21,3
Метаболическая эффективность $\kappa_1$ , %	20	20	12,5	9,1	6,0	4,8	12,0



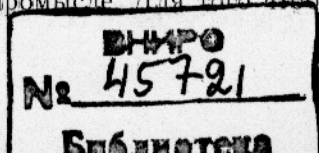
Показатели	Возрастные группы						Сум- ма
	1	2	3	4	5	6	
<i>Селективный промысел в 1957 г.</i>							
Численность $N_j$ , шт.	324	324	377	193	87	19	1000
Урожай с 1000 особей $y_j$ , кг	—	37	117	98	60	15	327
Продукция $N_j \Delta W_j$ , кг	24		74	38	14	2	152
Съеденный корм $r_j$ , кг	120		592	418	238	40	1408
Продукция икры, кг	—	4,1	14,0	11,8	8,3	2,0	30,2
Метаболическая эффективность $\kappa_1$ , %	—	—	—	—	—	—	10,8
<i>Селективный промысел в 1967 г. Присутствует урожайное поколение 1962 г.</i>							
Численность $N_j$ , шт.	10	22	9	4	942	13	1000
Урожай с 1000 особей $y_j$ , кг	0,4	2,5	2,8	2,0	634	10,3	652
Продукция $N_j \Delta W_j$ , кг	0,4	1,6	1,8	0,8	157	1,5	162,1
Съеденный корм $r_j$ , кг	2,0	8,0	14	9	2670	30	2733
Продукция икры, кг	—	0,3	0,3	0,2	88,8	1,3	90,9
Метаболическая эффективность $\kappa_1$ , %	—	—	—	—	—	—	5,9

Фактически промысел салаки в восточной части Балтийского моря изымает различные ее возрастные группы в соотношениях, представленных в табл. 2, т. е. промысел селективен (Н. П. Бирюков, 1970). При этом от 1000 рыб урожай равен 26,1 кг, продукция этих рыб за предшествующий вегетационный сезон — 8,9 кг при 157 кг съеденного корма. Метаболическая эффективность этих 1000 рыб низкая — 5,7%. Продукция икры — 2,6 кг, т. е. выше, чем продукция икры от 1000 рыб при неселективном промысле.

Если рыба поймана до нерестового сезона, то эта масса икры «погеряна» для естественного воспроизводства. При этом наиболее полноценная икра (Шапиро, 1970; Шатуновский, 1973) — у модальных возрастных групп — трех- и четырехгодовиков — составляет при неселективном промысле 65% всей продукции икры. А из табл. 2 видно, что эти возрастные группы давали 53% всей продукции икры популяции. В табл. 2 рассмотрена популяция в 2000 особей — остаток, образовавшийся в результате действия на исходную популяцию селективного промысла, изъявшего 33, (3) % особей популяции. Годовая продукция такой популяции 16,4 кг, однако эта омоложенная популяция съедает за год 154 кг корма и ее метаболическая эффективность — наивысшая — (10,7%). Продукция икры от 1000 особей этой популяции — 1 кг, причем относительное значение в воспроизводстве трех- и четырехгодовиков снижается до 33%.

Из приведенных данных можно понять, что интенсивный промысел приводит к значительному омолаживанию популяции, снижению его удельной (на 1000 особей) продуктивности, но к значительному повышению ее метаболической эффективности. Мы приняли, что во всех случаях темп роста отдельных возрастных групп одинаковый, фактически же такой селективный и интенсивный промысел часто приводит к ускорению темпа роста младших возрастных групп.

Приведенные расчеты иллюстрируют происходящие в популяции процессы при интенсивном селективном промысле. Для того чтобы дать



рекомендации для ведения оптимального промысла, нужно строить комплексную модель системы, например, соответствующую блок-схеме на рис. 1.

Рассмотрим продукцию и урожай биомассы пикши Северного моря, которая характеризуется значительными флюктуациями численности отдельных поколений. В табл. 3 представлены расчеты по гипотетической популяции пикши при отсутствии флюктуаций численности отдельных поколений и при смертности  $\varphi_{mj} = 35\%$  ( $j=1,3$ ),  $\varphi_{mj} = 50\%$  ( $j=4,6$ ).

Данные по возрастному составу уловов пикши взяты из синопсиса Блэкера (Blacker, 1972); данные по весовому приросту и массе икры любезно предоставлены сотрудником ВНИРО В. В. Шевченко. Данные по энергетическому обмену взяты из работы Титлера (Tytler, 1969) и пересчитаны нами. Количество потребляемого за год корма рассчитано по тем же формулам, что и для балтийской салаки.

Продукция 1000 особей такой популяции — 96,5 кг, при этом количество съеденного за год корма — 802 кг, метаболическая эффективность — высокая (12%). Это свойственно вообще бентосоядным рыбам (Steel, 1965). Продукция икры — 21,3 кг.

В табл. 3 приведены данные по снятой конкретным промыслом в 1957 и 1967 гг. биомассе в расчете на 1000 пикш. В 1957 г. в промысел не входили высокоурожайные поколения, метаболическая эффектив-

ность снятого селективным промыслом урожая — 10,8%, продукция икры — 302 кг. В 1967 г. промысел базировался в основном на урожайном поколении 1962 г. Метаболическая эффективность снятого в этом году урожая низка — 5,9%. Продукция икры — 90,9 кг, причем из нее 88,8 кг — продукция икры пятигодовиков. Но нужно учесть, что для пикши самое высокое качество икры (по биохимическим показателям) — у рыб трехлетнего возраста.

Таким образом, видно, что высокоурожайные поколения отрицательно воздействуют на метаболическую эффективность популяции.

**Задача товарного разведения рыб** — снять урожай содной выращиваемой популяции с наибольшей прибылью. Процесс выращивания товарной биомассы можно разделить на два этапа\*. Схема системы товарного разведения рыб показана на рис. 2.

На первом этапе получаем молодь, характеризующуюся вектором  $x_0$ , компоненты которого представляют собой численность  $N_0$ , вес одной особи  $W_0$ , содержание в нем белка  $P_0$  и жира  $G_0$ .

\* I этап — выращивание посадочного материала (сеголетков, годовиков). Не принимались во внимание формы морского рыбоводства, основанные на взятии посадочного материала из естественных водоемов: выращивание угря и других морских рыб в Японии (Нонпа, 1971).

II этап — выращивание годовиков до товарных размеров (пруды, садки, бассейны).

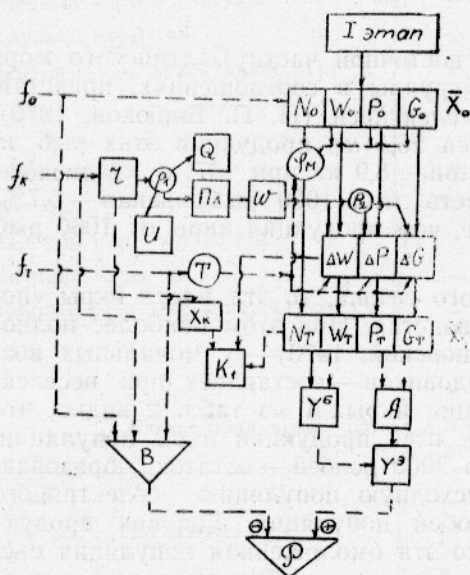


Рис. 2. Блок-схема системы управления товарным выращиванием рыбы

Экономические затраты на получение  $\bar{x}_0$  пока представим в виде некоторой функции  $\psi(\bar{x}_0)$ . В частности, хозяйство может закупить посадочный материал. На выходе II этапа через время  $T$  имеем популяцию, состояние которой описывает вектор  $\bar{x}_T$  с аналогичными характеристиками. Для II этапа нужно определить оптимальное управление  $\bar{j}$ , компоненты которого представляют собой плотность посадочного материала ( $\bar{j}_0$ ), количество искусственного корма, потребляемого популяцией в единицу времени ( $\bar{j}_K$ ), регулирование длительности периода II этапа ( $\bar{j}_T$ ). С увеличением времени выращивания рыбы достигают больших размеров, но все больший их процент погибает от естественных причин ( $\varphi_M$ ).

Влияние усвоения пищи и распределения ее на прирост белка и жира аналогично показанному на рис. 1, но при товарном выращивании отсутствуют траты на генеративный обмен и минимальны траты на энергетический обмен. За время  $T$  рыба выращивается до определенных размеров  $W$ , причем  $W_T$ , судя по экспериментальным материалам (Jensen, 1972; Catfish Feedsand Feeding, 1970), представляет собой убывающую функцию от плотности посадки молоди  $N_0$  типа  $W_T = dN_0^{-k}$ , где параметры  $d$  и  $k$  постоянны для данных условий выращивания данного вида, т. е. зависят от количества искусственного корма и от абиотических факторов.

Для получения веса  $W_T$  требуется корма

$$x_k = \sum_{t=0}^{T/\Delta t} r(t)N(t)\Delta t,$$

где  $r(t)$  — рацион одной рыбы за  $\Delta t$  в момент  $t$  ( $t$  при дискретном времени с дискретом  $\Delta t$  меняется от 0 до  $\frac{T}{\Delta t}$ );

$N(t)$  — число живых рыб в момент  $t$ ;

$x_k = \psi_2(W_T)$  — возрастающая функция от  $W_T$ .

В момент  $T$  полученная биомасса полностью изымается, причем пищевая ценность единицы биомассы определяется ее калорийностью (содержанием жира и белка), как указывалось при описании предыдущей системы,

$$A = a \frac{P_T}{W_T} + b \frac{G_T}{W_T}.$$

Себестоимость единицы полученной биомассы определяется затратами на рыбоводство, в том числе на искусственные корма. Поэтому в данном случае особенно важно разводить рыбу с высокой метаболической эффективностью. Нужно отметить, что в искусственных условиях человек получает возможность рационально использовать потенциальные возможности роста рыб. Рост рыб в естественных условиях ограничивается абиотическими и биотическими факторами: температурой, соленостью, неравномерностью распределения кормовых объектов и в ряде случаев большими затратами энергии на их добычу и др. В искусственных же условиях их влияние может быть снято. Как показывает опыт выращивания пресноводных и проходных рыб, эффективность использования молодью пищи на рост в среднем за сезон достигает 50—60%.

Рассмотрим примеры из практики американских и японских хозяйств (Bowker et al., 1970; Nonna 1971; Catfish Feedsand Feeding 1970). В хозяйстве «Эдентон» (США) выращивают сеголетков полосатого окуня — *Morone saxatilis*. В этом хозяйстве в прудах с плотностью посадки 60 тыс. шт/га выживание сеголетков составляет 74%, конечный средний вес — до 40 г, продукция — 735 кг/га,  $K_1 = 30\%$ . При вы-



ращивании сеголетков *Ictalurus punctatus* при плотности посадки 30 тыс. шт/га рыбопродукция — около 400 кг/га,  $K_1=55\%$ . В этих двух случаях рыбы к концу первого года выращивания не достигают товарного веса. До оптимального веса в 320 г *I. punctatus* вырашивается на втором году жизни. При плотности посадок годовиков в 7,4 тыс. шт/га продукция 2240 кг/га и  $K_1=35\%$ , на третьем году выращивания этого вида  $K_1$  снижается до 20%. При выращивании желтохвоста *Seriola quinquiradiata* в течение 9 мес. в Японии сеголетки достигают 1 кг, продукция — до 20 тыс. ц с 1 га садков,  $K_1$  — порядка 15—20%.

В то же время на втором году жизни, когда вес многих исследованных в естественных условиях морских рыб достигает 100—300 г,  $K_1$  у них 15—20%, т. е. примерно в два раза меньше, чем у рыб того же возраста, выращенных в искусственных условиях. Так, темп весового роста морской камбалы, выращиваемой при оптимальных температурах 15—16°C, вдвое выше, чем в естественных условиях (Nash, 1968). Таких примеров в настоящее время можно привести очень много. Если учесть, что в уловах многих естественных популяций доминируют трех-, пятилетние рыбы, то средняя эффективность использования ими пищи на рост еще ниже.

Таким образом, при искусственном выращивании затраты на активный обмен сводятся к минимуму, эффективность использования потребленной пищи на прирост высока.

Итак, на выходе системы будет стоять урожай биомассы  $Y^B = N_T W_T$ , ценностное его выражение  $Y^B = AY^D$  и прибыль от ведения хозяйства  $P = \alpha Y^B - B$ . Здесь  $B$  — затраты на выращивание, которые складываются из затрат на получение посадочного материала  $\psi_1(x_0)$ , на корм,  $v_k x_k$ , где  $v_k$  — стоимость единицы корма и трат на обслуживание системы (содержание прудов, поддержание условий выращивания и т. д.), которые растут с ростом  $T$ .

Таким образом, следует искать максимум прибыли  $P$  по трем переменным:  $f_1 = \bar{x}_0$ ,  $f_T = T$ ,  $f_k = r(t)$ , причем  $\bar{x}_0$  — векторная величина, а  $f_k$  — функция от времени.

Искусственное выращивание рыб при оптимальных условиях (температуре, обеспечивающей максимальную скорость белкового роста, солености, обеспечивающей также интенсификацию пластического обмена, при определенных соответствиях между численностью выращиваемых рыб и задаваемым на единицу площади пруда или объема садка кормом, сводящих к минимуму энергетические затраты рыб) дает высокие величины продуктивности.

**Задача искусственного разведения рыб для пополнения естественной популяции в водоеме с целью ее дальнейшей эксплуатации** не менее важна в настоящее время. На это направлена, например, деятельность лососевых и осетровых рыбоводных заводов.

Целесообразность выпуска искусственно выращиваемой молоди с целью пополнения естественной популяции определяется рядом факторов, зависящих от видовой принадлежности, от состава биоценозов, от степени воздействия промысла на численность и на естественное воспроизводство этой популяции, от возможных нарушений естественного воспроизводства под влиянием деятельности человека (загрязнение, нарушение нерестовых биотопов, уменьшение стока рек и т. д.). Если, например, некоторая популяция под действием интенсивного промысла слишком разрежена, и ее бывшая пищевая ниша занята другими видами, то эффект от искусственного развития этой популяции сомнителен. Если же пищевая ниша не занята или же численность популяции лимитируется на ранних стадиях развития какими-то факторами среды, выпуск искусственно полученной молоди, переведенной через эти критические стадии, может дать большой практический эффект.

На рис. 3 дана блок-схема такой системы. Процессы, происходящие в естественной популяции, показанные на рис. 1, здесь не детализированы. Отдельно вынесен блок естественного воспроизводства, пополняющий возрастную группу  $f_0$ . Эту же группу пополняет молодь, получаемая искусственным путем ( $\bar{x}_T$ ). Процесс искусственного выращивания молоди состоит из следующих подэтапов. Из естественной популяции

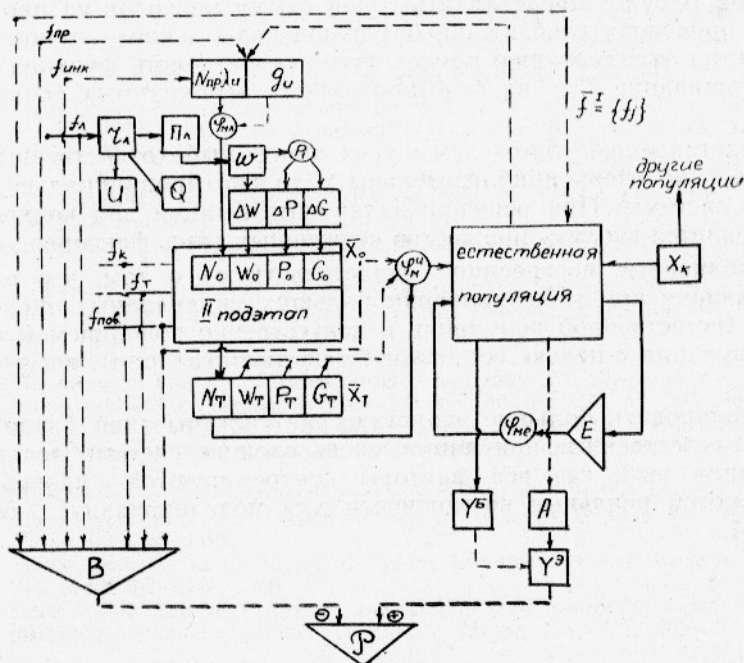


Рис. 3. Блок-схема системы управления искусственным разведением рыб для пополнения естественной популяции с целью ее дальнейшей эксплуатации

вылавливается некоторое число производителей  $N_{пр}$ , причем плодовитость одной особи характеризуется вектором  $e_u$ . В результате затрат некоторых усилий  $f_{инк}$  для инкубирования икры (для поддержания оптимальных условий в инкубаторах) получаем личинок, выкармливаемых искусственными или естественными кормами, причем  $r_{л}$  — рацион одной особи — распределяется по тому же принципу, что и на схеме рис. 2. На смертность  $\varphi_{мл}$  самых ранних стадий влияет запас жира в каждой икринке  $g_u$ . При переходе на новый вид питания как бы заканчивается I подэтап. Полученный посадочный материал  $\bar{x}_0 = \{N_0, W_0, P_0, G_0\}$  выращивается в бассейнах, садках или прудах (процесс роста от  $x_0$  до  $x_T$  детально показаны на рис. 2) в течение периода  $T$ . В результате моделирования всей системы мы должны определить необходимое количество искусственно выращенного пополнения естественной популяции, а также, в каком возрасте и какого качественного состава молодь должна выпускаться.

Смертность искусственно выращенной молоди  $\varphi_{ми}$  или обратная ей величина «коэффициент возврата» является одним из главных показателей эффективности действия этой рыбохозяйственной системы. На величину  $\varphi_{ми}$  будет влиять возраст выпускаемой молоди (т. е. и  $T$ ), ее вес  $W_T$ , биохимический состав ( $P_T$  и  $G_T$ ), а также характер ее поведения (активность при добыче пищи, защитные реакции и т. д.). Для получения этих реакций в искусственных условиях необходимы определенные мероприятия ( $f_{лов}$ ), при этом, возможно, придется уменьшить

плотность посадки. По количеству получаемой молоди  $N_T$  можно определить количество производителей, необходимых для получения нужного количества исходной икры.

В результате промысла естественной популяции с интенсивностью  $\bar{f} = \{f_i/f_i^0 = 1\}$  получим урожай  $Y^E$  или его калорийное выражение  $Y^E$ .

Основная цель моделирования такой системы — получение максимальной прибыли  $P$  от эксплуатации этой системы. В данном случае функция расходов  $B$  будет представлять собой сумму расходов на промысел, на вылов производителей, на инкубирование икры и корм личинок, на корм молоди, на эксплуатацию прудов (эти затраты есть функция от времени выращивания  $T$ ), на формирование необходимых реакций ( $f_{\text{нов}}$ ) и т. д.

Представленные блок-схемы трех типов рыбохозяйственных систем, конечно, еще очень приближительны и только принципиально описывают эти системы. При решении задач оптимизации для конкретных систем придется вводить множество неучтенных здесь факторов.

Выполненные построения свидетельствуют о том, что сложности, возникающие при моделировании больших управляемых экологических систем (естественной популяции и искусственно пополняемой естественной популяции с целью ее дальнейшей эксплуатации), вполне преодолимы.

Моделировать большие экологические системы типа 1 или 3, включающие естественные популяции, очень сложно, системы товарного выращивания рыб, где все факторы контролируются — проще, поэтому открываются реальные возможности для моделирования таких систем на ЭВМ.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бирюков Н. П. Сельдь Балтийского моря. 1970. Калининград, с. 3—203.
- Борисов В. М. К оценке естественной смертности азовской тюльки по показателю «сухой остаток — вода». (Опубл. в настоящем сборнике).
- Борисов В. М., Шатуновский М. И. О возможности применения показателя влажности для оценки естественной смертности баранцевоморской трески. Труды ВНИРО. 1973, т. 93, с. 309—319.
- Винберг Г. Г. Интенсивность обмена и пищевые потребности рыб. Изд-во Бел. Гос. ун-та, 1956, с. 3.
- Винберг Г. Г., Анисимов С. И. Опыт исследования математической модели водной экосистемы. Труды ВНИРО, 1969, т. 47, с. 49—75.
- Грауман Г. Б. Изменение биохимического состава икры в зависимости от морфо-биологических особенностей самок балтийской трески. Труды ВНИРО, 1972, т. 85, с. 63—67.
- Дорошев С. И., Горелов В. К., Стребкова Т. П., Дергалева Ж. Т., Сказкина Е. П., Гараев Р. А., Липкер В. М., Агапов В. С. Акклиматизация полосатого окуня *Morone saxatilis* в Азово-Черноморском бассейне. ОНТИ ВНИРО, 1973, 39с.
- Засосов А. В. Теоретические основы рыболовства. М., «Пищ. пром-сть», 1970, с. 118—129.
- Крогиус Ф. В., Крохин Е. М., Меншуткин В. В. Сообщество пелагических рыб озера Дальнего. М., «Наука», 1969, с. 5—85.
- Меншуткин В. В. Математическое моделирование популяции промысловых рыб. ОНТИ ВНИРО, 1970, с. 5—140.
- Меншуткин В. В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. Л. «Наука», 1971, с. 5—180.
- Меншуткин В. В., Кисляков Ю. Я. Моделирование популяции промысловой рыбы с учетом переменного темпа роста. «Зоол. журн.», 1967, т. 46, вып. 6, с. 805—810.
- Полетаев И. А. О математических моделях элементарных процессов в биогеоценозах. Сб. «Проблемы кибернетики», вып. 16. М., «Наука», 1966, с. 171—190.



- Свирижев Ю. М., Елизаров Е. Я. Математическое моделирование биологических систем. Сб. «Проблемы космической биологии», вып. 20, М. «Наука», 1972, с. 3—159.
- Шапиро Л. С. Влияние качества самок на икру у салаки Вислинского залива. «Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря», № 7, 1970, с. 66—84.
- Шатуновский М. И. Роль исследований обмена веществ в решении некоторых вопросов динамики численности рыб. Тезисы докл. Всес. конф. по экологической физиологии рыб, 1973, с. 14—16.
- Шатуновский М. И., Богоявленская М. П., Вельтищева И. Ф., Кривобок М. Н., Масленникова Н. В., Токарева Г. И. Динамика физиолого-биохимического состояния промысловых рыб Северо-Восточной Атлантики в течение жизненного и годовичного циклов, М., ОНТИ ВНИРО, 1972, 67 с.
- Уатт К. Экология и управление природными ресурсами. М., «Мир», 1971, с. 14—17.
- Beverton, R. & S. Holt. On the dynamics of exploited fish population. London, pp. 3—530, 1957.
- Bawker, R. G., D. J. Baumgartner et al. Striped bass, pp. 20—29, 1968.
- Blacker, R. W. Synopsis of biological data on haddock (*Melanogrammus aeglefinus* L.). FAO Fish. Synopsis No. 84, pp. 1—8, 1971.
- Cattfish feeds and feeding. Report to the fish farmers. Res. Publ. No. 83, pp. 30—41, 1970.
- Iensen, A. L. Population biomass. Number of individuals, average individual weight and the linear surplus production model. J. Fish. Res. Bd. Can. vol. 29, No. 11, pp. 1651—1655, 1972.
- Нонма, А. Aquaculture in Japan. Tokyo, pp. 40—43, 1970.
- Love, R. M. The chemical biology of fishes. London, pp. 230—251, 1970.
- Nash, C. E. Power stations as sea farms. New Sci. vol. 40, No. 623, pp. 367—369.
- Schaefer, M. B. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. Inter. Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. 1(2), p. 329, 1954.
- Schaefer, M. B. Some considerations of population dynamics and economics in relation to the management of the commercial marine fisheries. J. Fish Res. Bd. Can. v. 14, No. 5, pp. 669—681, 1957.
- Steel, J. H. Some problems in the study of marine resources. ICNAF Environ. Symp. Sp. Publ. No. 6, pp. 463—476, 1965.
- Tytler, P. Relationship between oxygen consumption and swimming speed in the haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). Nature, v. 221, pp. 274—275, 1969.

## TO MODELLING OF CERTAIN FISHERIES AND FISH — CULTURE SYSTEMS WITH REFERENCE TO ECOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL FACTORS

*T. I. Bulgakova, A. V. Zasosov, M. I. Shatunovsky*

### SUMMARY

A total of three types of systems are discussed: fisheries for natural populations, culture of marine and anadromous fish with subsequent release of the young into natural water bodies and fish pond culture for market purposes. The objective is to arrange optimum management of the systems in view of regularities of production processes aimed at obtaining the maximum yield and certain economic profits.

## SUR LE MODELAGE DES CERTAINS SYSTEMES DE LA PECHE ET DE LA PISCICULTURE TENANT COMPTE DES FACTEURS OECOLOGO — PHYSIOLOGIQUES

*T. I. Boulgakova, A. V. Zassosov, M. I. Chatounovsky*

### RÉSUMÉ

On a examiné trois types de systèmes: la pêche des populations naturelles, la culture de jeunes des poissons de mer et ceux de diadromes aux fins de leur versement dans des eaux et la pisciculture commerciale dans les étangs. On se pose comme but le commandement optimum de ces systèmes en considérant les régularités des processus de production au point de vue de rendement maximum et de profit.