

## ЧЕРНОМОРСКИЙ ШПРОТ В МОРЕ И В ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

*В.С. Латун*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail:lee@alpha.mhi.iuf.net

*Предложены дифференциальные уравнения, необходимые для включения черноморского шпрота в эколого-экономические модели системы «биогены – фитопланктон – зоопланктон – хамса – шпрот – ставрида – промысел этих рыб».*

Коллапс хамсы в конце восьмидесятых – начале девяностых годов прошлого столетия, вызванный, в основном, её хищническим выловом из зимовальных скоплений у берегов Турции, оказал катастрофическое влияние на экосистему Чёрного моря [1]. Истощение промысловых запасов хамсы сделало актуальным ускоренное развитие промысла шпрота, большие запасы которого ранее практически не использовались. Стала очевидной необходимость разработки научно обоснованных планов эксплуатации рыбных ресурсов, увеличился интерес к эколого-экономическим моделям. Чтобы включить шпрот в математические модели, нужно формализовать основные процессы его жизнедеятельности, динамику активной промысловой базы и оперативную работу рыболовного флота.

Цель предлагаемой работы – предложить дифференциальные уравнения для энергетического эквивалента удельной биомассы шпрота, динамики промыслового бюджета, а также для скоростей таксиса шпрота и передвижения рыболовного флота. Полученные уравнения будут использованы при разработке эколого-экономических моделей системы «биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – шпрот – ставрида – промысел этих рыб».

Черноморский шпрот – холодолюбивый планктонофаг североатлантического происхождения, предпочитает воды с температурой от 7–10 до 15 °С. Созревает на втором году жизни, живёт до 4–5

лет. С разной интенсивностью шпрот порционно нерестится во все сезоны года. Основной нерест шпрота происходит в холодные месяцы (ноябрь–март) на обширных акваториях открытого моря. Для развития икринок и личинок шпрота наиболее благоприятна температура воды 6.8–12.4 °С. В тёплое время года подходящие для нереста условия шпрот находит на глубинах 50–100 м. Во время нереста шпрот не образует плотных скоплений.

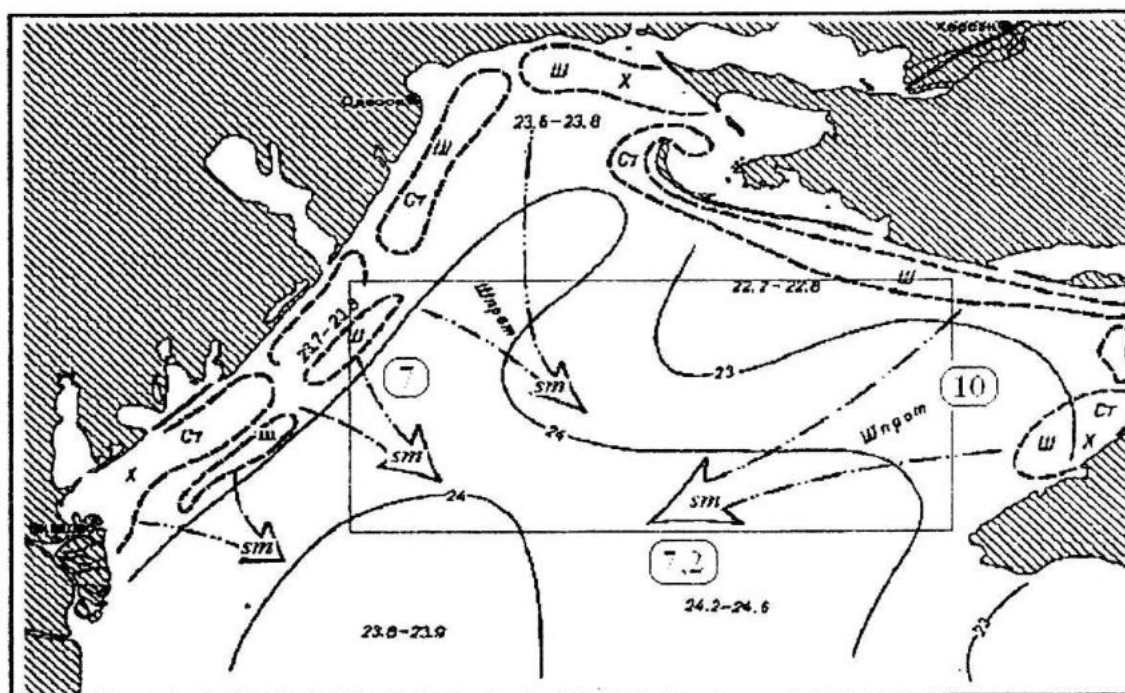
Стимулами к кормовому и нерестовому таксису шпрота служат градиенты концентрации кормового зоопланктона и градиенты температуры воды. Весной, с прогревом поверхностных вод до 8–9 °С, шпрот для откорма мигрирует в богатые кормовым зоопланктоном прибрежные районы моря, в основном на северо-западный шельф (СЗШ). Первыми приходят рыбы старших возрастных групп, последними – годовики. В мае–июне, когда температура верхнего слоя вод повышается здесь от 15 до 19.5 °С, а слой скачка температуры постепенно заглубляется, наблюдаются регулярные суточные перемещения шпрота по вертикали: днём он опускается в воды комфортной для него температуры, ночью для откорма поднимается к слою скачка температуры.

С повышения температуры воды на прибрежном мелководье, шпрот постепенно удаляется от берега, увеличивается амплитуда его вертикальных суточных перемещений. К концу июля шпрот переходит на более глубокую акваторию СЗШ, где до конца гидрологического лета сохраняется слой скачка температуры (рис. 1). На этой акватории дно сравнительно ровное, средняя глубина равна 35 м. В июле–сентябре среднемесячная температура воды на основных горизонтах изменяется здесь в таких пределах: на поверхности моря – от 20 до 23 °С, на глубине 10 м – от 17 до 22 °С, на глубине 20 м – от 8 до 16 °С, на глубине 30 м (придонный горизонт) – от 7.5 до 11.5 °С. При такой температурной стратификации, днём вблизи дна образуются плотные скопления шпрота, что позволяет развивать его промысел, применяя эко-

локацию для прицельного траления. В ноябре, вследствие конвективной циркуляции вод, их температура от поверхности до дна здесь выравнивается и составляет 10.5–12.0 °С. В это время шпрот для нереста переходит на более глубокие акватории, где температура воды на горизонте 50 м равна 8–9 °С, а на горизонте 75 м опускается ниже 8 °С [2–4].

Шпрот активно питается во все сезоны года. Гидрологической весной (апрель–июнь) он успевает пополнить жировые запасы, израсходованные во время

зимнего нереста. Летом жировая ткань защищает организм шпрота от перегрева. Максимальная жирность шпрота наблюдается летом, минимальная – зимой [5]. Основу рациона шпрота составляют copepody. В прибрежных районах СЗШ пищевая конкуренция между шпротом и хамсой обостряется в период май – середина июля, до миграции шпрота на более глубокие акватории. Шпрот и хамса входят в рацион взрослой ставриды, но в разгар гидрологического лета шпрот менее доступен для ставриды.

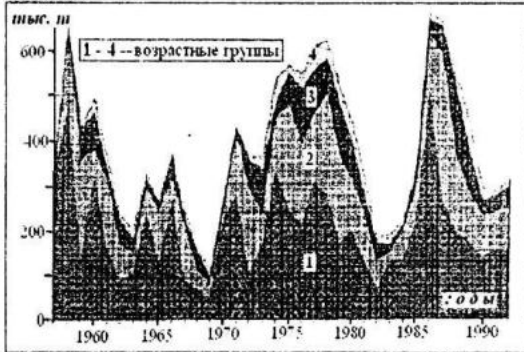


Р и с. 1. Места скопления хамсы, ставриды и миграция шпрота в третьей декаде июля [4]. Температура воды на поверхности (изолинии, интервалы значений) и в придонном слое (крупные цифры в рамке). Пути перехода шпрота (*sm*) на акватории с комфортной для него температурной стратификацией

Если, после коллапса анчоуса, биомасса половозрелого шпрота только в западной части моря составляла около 700 тыс. т [6], значит общие промысловые запасы черноморского шпрота превысили 1 млн. т (рис. 2). Новый способ добычи шпрота позволяет многократно увеличить его вылов, особенно в экономической зоне Украины на СЗШ. Неизбежна конкуренция между государствами за использование этого ресурса, возможен новый антропогенный удар по экосистеме Чёрного моря. Поэтому повысилась актуальность модернизации эколого-экономической модели путём

прямого учёта динамики биогенов и включения шпрота в модель. Продуктивность фитопланктона и изменчивость концентрации биогенов формализованы автором в работе [7]. Для включения шпрота в эколого-экономические модели системы «биогены – планктон – пелагические рыбы – рыбный промысел» нужны следующие дифференциальные уравнения: 1. Уравнение для энергетического эквивалента биомассы шпрота. 2. Уравнение для скоростей кормового и температурного таксиса шпрота. 3. Уравнение для удельной скорости передвижений

флота в зависимости от изменений промысловой обстановки. 4. Уравнение для технической базы промысла. Общий вид четвёртого уравнения ранее получен автором на основе анализа динамики промыслового бюджета [8]. Уравнение (11) – упрощенный вариант этого уравнения.



Р и с. 2. Изменчивость биомассы шпрота, нерестующего в западной части Чёрного моря [6]

Пополнение биомассы шпрота происходит при его питании кормовым зоопланктоном. Расходные статьи баланса биомассы шпрота обусловлены остальными процессами его жизнедеятельности, естественной элиминацией, прессом ставриды и промысловым изъятием. Перераспределение шпрота по акватории вызвано влиянием кормового и температурного таксиса, морских течений и стайной диффузии. Температурный таксис императивен: при локальном повышении придонной температуры воды летом выше определённого значения, шпрот сначала переходит на акваторию с комфортной температурной стратификацией, потом, в пределах этой акватории, ищет места с оптимальной концентрацией копепод. Для интенсивного откорма шпрот весной мигрирует на прибрежное мелководье СЗШ и остаётся здесь до тех пор, пока в придонном слое температура воды не превысит 7–9 °С. К третьей декаде июля шпрот откочевывает на открытую акваторию СЗШ, где в слое скачок температуры дно сохраняется комфортная для холодолюбивого шпрота температура (рис. 1). Горизонтальный градиент температуры придонных вод является стимулом для летнего температурного таксиса шпрота на СЗШ. С удалением от берега инерционность гидрологических процессов в придонном слое увеличивается, что облегчает учёт тем-

пературного таксиса. На пространственно-временных масштабах модели суточные вертикальные перемещения шпрота учтены параметрически. Перечисленные процессы формализованы в следующем уравнении для изменчивости энергетического эквивалента удельной биомассы шпрота:

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} = \delta_{zf_2} R_{zf_2}(Z)F_2 - \delta_{f_2f_3} R_{f_2f_3}(F_2)F_3 - \delta_{f_2l} R_{f_2l}(F_2)L - M(F_2) - \vec{V}_{f_2a} \vec{\nabla} F_2 + \mu_{f_2} \Delta F_2, \quad (1)$$

где  $Z(x, y, t)$ ,  $F_2(x, y, t)$ ,  $F_3(x, y, t)$ ,  $L(x, y, t)$  – энергетические эквиваленты удельных биомасс кормового зоопланктона, шпрота, ставриды и удельной технической базы активного флота соответственно;  $R_{zf_2}(Z)$ ,  $R_{f_2f_3}(F_2)$  – трофические функции шпрота и ставриды;  $R_{f_2l}(F_2)$  – производительность промысла;  $\delta_{zf_2}$ ,  $\delta_{f_2f_3}$ ,  $\delta_{f_2l}$  – соответствующие передаточные коэффициенты;  $\vec{V}_{f_2a}$  – скорость перемещения шпрота относительно неподвижной системы координат;  $M(F_2) = \sum_1^n a_n F_2^n$  – естественная элиминация шпрота;  $\mu_{f_2}$  – коэффициент его стайной диффузии;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $n$  – константы;  $\vec{\nabla}$  – оператор градиента;  $\Delta$  – лапласиан.

$$R_{zf_2}(Z) = \frac{a_{zf_2} Z^k}{b_{zf_2} + Z^k} + c_{zf_2}, \quad (2)$$

$$R_{f_2f_3}(F_2) = \frac{a_{f_2f_3} F_2^m}{b_{f_2f_3} + F_2^m} + c_{f_2f_3}, \quad (3)$$

$$R_{f_2l}(F_2) = \frac{a_{f_2l} F_2^h}{b_{f_2l} + F_2^h} + c_{f_2l}. \quad (4)$$

Конкретный вид S-образных функций  $R$  зависит от экологических условий акватории и масштабов осреднения зависимых переменных в математических моделях. Опыт показал, что эти гладкие функции можно, без заметной потери точности, аппроксимировать их кусочно-линейными аналогами. Замена функции (4) функцией (5) при математической имитации работы промыслового флота придаёт такой формализации практическую наглядность: при  $F_2 < F_{2min}$  промы-

сел шпрота прекращается из-за его нерентабельности ( $R_{f_2} = 0$ ); при  $F_2 > F_{2max}$  производительность промысла ограничена техническими возможностями флота ( $R_{f_2} = R_{f_2max} = const$ ).

$$R_{f_2}(F_2) \approx (c_1 F_2 - c_2) H(F_2 - F_{2min}) \times H(F_{2max} - F_2) + R_{f_2max} H(F_2 - F_{2max}), \quad (5)$$

где  $H$  – единичная функция Хевисайда.

Вектор  $\vec{V}_{f_2}$  представляет собой сумму вектора скорости течения  $\vec{U}$  и скорости либо кормового таксиса  $\vec{V}_{f_2z}$ , либо температурного таксиса шпрота  $\vec{V}_{f_2T}$ . Императивность температурного таксиса учтена в следующих уравнениях для скоростей:

$$\frac{\partial \vec{V}_{f_2z}}{\partial t} = \left( \frac{a_v F_2}{Z+r} \vec{\nabla} Z + v \Delta \vec{V}_{f_2z} \right) H(T_{st} - T), \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{V}_{f_2T}}{\partial t} = (-b_v \vec{\nabla} T + v \Delta \vec{V}_{f_2T}) H(T - T_{st}), \quad (7)$$

где  $T(x, y, t)$  – средняя по глубине температура в придонном слое;  $T_{st}$  – стартовая температура для начала температурного таксиса ( $T_{st} = 8$  °C);  $v$  – коэффициент стайной вязкости;  $a_v, b_v$  – константы.

Передвижения рыболовецкого флота зависят от изменений промысловой обстановки. Локальная концентрация шпрота и места его скоплений постоянно изменяются. Отдельное судно маневрирует и проводит локальный поиск мест с большей концентрацией шпрота у дна в светлое время суток. Группа судов может менять дислокацию на основании данных промразведки. Моделируется не относительное движение отдельного судна, а вектор средней скорости промысловых судов  $\vec{W}(x, y, t)$ , находящихся в квадрате определённого размера. Характер зависимости  $\vec{W}$  от градиента концентрации шпрота  $\vec{\nabla} F_2$  очевиден: флот движется в направлении градиента и увеличивает или уменьшает свою скорость при увеличении или уменьшении градиента. Модуль вектора  $\partial \vec{W} / \partial t$  зависит также от соотношения  $L/F_2$ .

Удельная техническая база промысла ( $L$ ) характеризуется суммарной производительностью судов, находящихся в ячейке вычислительной сетки площадью  $S_j$ . От  $L(x, y, t)$  зависит и то максимальное значение концентрации шпрота  $F_{2Emax}$ , при котором переход флота на акваторию с большей концентрацией становится экономически невыгодным. Разности между скоростью отдельного судна и средней скоростью группы судов являются подсеточными пульсациями скорости. Суммарный эффект таких пульсаций аналогичен стайному эффекту у рыб, имеет диссипативный характер и может быть соответственно аппроксимирован. Коэффициент виртуального трения  $\lambda$  в данном случае характеризует степень неупорядоченности движения промысловых судов на подсеточных масштабах. Перечисленные особенности движения флота учтены в следующем уравнении:

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = \left( -\frac{a_w L}{F_2 + b_w} \vec{\nabla} F_2 + \lambda \Delta \vec{W} \right) H(F_2 - F_{2Emax}), \quad (8)$$

где коэффициенты  $a_w, b_w, \lambda$  соответствуют условиям промысла.

Пространственно-временная изменчивость активной части технической базы промысла зависит от динамики компонентов промыслового бюджета [8]. Улучшение промысловой обстановки означает возможность увеличить прибыльность промысла путём увеличения производительности отдельного траулера и активизации большего числа рыболовных и транспортных судов. Удельная величина приходной статьи промыслового бюджета  $Q(x, y, t)$  соответствует вылову шпрота на акватории площадью  $S_j$ :

$$Q = R_{f_2} L I(x, y, t), \quad (9)$$

где через функцию  $I(x, y, t)$  учтено влияние на помысел экологических факторов, не рассматриваемых в явном виде. Когда на промысле используются суда одного типа с одинаковым оборудованием, величина  $L$  пропорциональна числу судов, работающих в квадрате площадью  $S_j$ . Если техническая база промысла не унифицирована, несложно определить

её эффективный эквивалент.

Основными расходными статьями промышленного бюджета являются амортизационные, ( $D_a$ ), эксплуатационные, ( $D_o$ ), транспортные ( $D_t$ ) и маркетинговые отчисления ( $D_m$ ). Расходные статьи сохраняются на определённом уровне при простоях рыболовецкого флота, они возрастают с началом промысла и при его интенсификации. Особенно это относится к эксплуатационным расходам, которые целесообразно представить в виде суммы расходов на содержание флота в порту ( $D_{os}$ ) и расходов на промысле ( $D_{ow}$ ), причём  $D_{ow} \gg D_{os}$ . Расходы  $D_{ow}$  прямо зависят от величины активной базы промысла и могут быть учтены в явном виде:  $D_{ow} = k_1 E^p$ . Сумму остальных расходов в единицу времени можно заменить средним её значением за  $n$  прошлых промысловых сезонов с аналогичными условиями,

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_a + D_{os} + D_t + D_m)_i. \quad (10)$$

Если бюджет сбалансирован,  $dL/dt = 0$ , а  $L$  и  $N_c$  – константы, то есть количество участвующих в промысле судов остаётся постоянным. Профицитность или дефицитность бюджета означают, соответственно, рост или уменьшение  $L$  и  $N_c$ . При неблагоприятной промысловой обстановке ( $F_2 < F_{2o}$ ) только суда промразведки продолжают работу. При самой благоприятной обстановке ( $F_2 > F_{2m}$ ) число промысляющих судов ограничено. Следовательно, величина  $L$  находится в пределах  $L_0 < L < L_m$ . В уравнении для  $L$  необходимо также учесть влияние процессов типа адвекции ( $\bar{W} \nabla L$ ) и диффузии ( $\mu \Delta L$ ) и зависимость эксплуатационных расходов от скорости перемещения флота по акватории ( $k_3 |\bar{W} - \bar{U}|^r$ ). В итоге получаем:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = Q - \bar{W} \nabla L + \mu \Delta L - k_2 L^q - k_3 |\bar{W} - \bar{U}|^r - \bar{D}. \quad (11)$$

Таким образом, формализованы основные процессы жизнедеятельности шпрота и его промысла. Очередная задача – включить уравнения для биогенов и шпрота в разработанную ранее модель,

получить численное решение усложнённой задачи и адаптировать его к экологическим условиям СЗШ. Здесь, в пределах экономической зоны Украины, находится самая перспективная акватория для развития механизированного промысла черноморского шпрота. Регулируя промышленное изъятие шпрота на этой акватории, можно воздействовать на динамику интегральной биомассы шпрота и стабильность экосистемы Чёрного моря.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gücü A.C. Role of fishing in the Black Sea ecosystem // Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea. – Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997. – P.149–162.
2. Основы биологической продуктивности Чёрного моря / В.Н. Грезе. – Киев: Наук думка, 1979. – 392 с.
3. Сырьевые ресурсы Чёрного моря. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 323 с.
4. Виноградов К.А., Розенгурт М.Ш., Толмазин Д.М. Атлас гидрологических характеристик СЗ части Чёрного моря (в рыбопромысловых целях). – Киев: Наукова думка, 1966. – 96 с.
5. Шульман Г.Е. Физиолого-биохимические особенности годовых циклов рыб. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 368 с.
6. Prodanov K., Mikhailov K., Daskalov G., et al. Environmental impact on fish resources in the Black sea // Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea. – Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997. – P. 163–181.
7. Латуш В.С. Учёт продуктивности фитопланктона и изменчивости концентрации биогенов в пространственных эколого-экономических моделях // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 198–201.
8. Латуш В.С. Учёт рыбного промысла в эколого-экономических моделях // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – С. 147–149.