

УЧЁТ ОСОБЕННОСТЕЙ ПИТАНИЯ И КОРМОВОГО ТАКСИСА ЧЕРНОМОРСКОЙ СТАВРИДЫ В ЭКОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

В.С.Латун

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

С целью учёта питания ставриды организмами двух трофических уровней предложены дифференциальные уравнения для энергетического эквивалента её удельной биомассы и составляющих скорости кормового таксиса. Скорость движения ставриды в неподвижной системе координат вычисляется с учётом скорости морского течения и скорости таксиса анчоуса.

Черноморская ставрида – теплолюбивая эвригалинная рыба, состав её пищи отличается значительным разнообразием. Цель данной работы – с учётом экологических условий на выделенной акватории в северо-западной части Чёрного моря предложить дифференциальные уравнения для энергетического эквивалента удельной биомассы черноморской ставриды и скорости её кормового таксиса. В уравнениях необходимо учесть особенности потребления ставридой основных составляющих её пищевого ресурса и соответствующие компоненты скорости кормового таксиса. Уравнения предназначены для использования в разрабатываемой автором математической модели системы фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел.[1–3].

В Чёрном море обширным ареалом обитания ставриды в тёплое время года, когда происходит её нагул и многократный нерест, является весь северо-западный шельф (СЗШ), на остальной акватории моря ставрида обитает в прибрежной полосе вод шириной до 30–50 км. В качестве модельной акватории обитания черноморской ставриды и организмов рассматриваемой системы (МАОС) в тёплое время года выбрана часть СЗШ (45°–46°с.ш., 30°–32.5°в.д.). Жидкие границы МАОС находятся за пределами прибрежных течений и фронтальных зон. Горизонтальные размеры МАОС – 100 на 200 км. При сравнительно ровном

дне средняя глубина моря здесь равна 35 м. Характерные особенности данного экотона позволяют основные закономерности функционирования системы учесть в пространственно двумерной (горизонтальная плоскость) или даже одномерной (вдоль МАОС) нестационарной эколого-математической модели [3]. Известно, что переход от рассмотрения осредненных по вертикали характеристик к объёмной модели не только значительно усложняет решение подобных задач, но и многократно увеличивает ошибки моделирования [4].

С мест зимовки ставрида приходит на МАОС во второй декаде мая, когда вода на поверхности моря прогревается до 13°C. У дна в это время температура воды равна 6 – 7°C. В третьей декаде июня температура воды на поверхности повышается до 20 – 21°C, у дна – до 8–10°C. Ставрида держится в слое поверхность моря – скачок температуры. К началу июля скачок температуры исчезает, но ставрида остаётся в приповерхностном слое толщиной 25–30 м. В период вторая декада июля – вторая декада августа средняя температура воды на поверхности моря равна 23–24°C. На зимовку ставрида начинает уходить в первой декаде октября, когда температура воды на МАОС понижается до 15–16°C [5, 6].

В перечень поедаемых ставридой организмов входят массовые виды зоопланктона (в основном copepody), придонные ракообразные (мизиды, амфиподы), более мелкие пелагические рыбы (шпрот, анчоус). На разных стадиях онтогенеза состав пищи ставриды различен. Рацион рыб разных возрастных групп изменяется также в зависимости от характеристик пищевого ресурса, доступного в данное время на конкретной акватории. На прибрежном мелководье, к примеру, заметную часть рациона взрослой ставриды составляют придонные ракообразные. На сравнительно глубокой МАОС роль придонных организмов в питании ставриды мала даже при отсутствии слоя температурного скачка.

Шпрот холодолюбив и нерестится в холодное время года, поэтому летом на МАОС нет ни икры, ни личинок, ни мальков шпрота, а сеголетки и взрослые рыбы уходят из данной акватории на время максимального прогрева морских вод [6]. Но именно это время является временем наибольшей интенсивности питания ставриды

и временем максимальной нерестовой активности анчоуса, когда его икра, личинки, мальки и рыбы разных размерных групп составляют большую часть рациона соответствующих размерных групп ставриды. Поэтому в питании ставриды на МАОС ролью шпрота можно пренебречь по сравнению с ролью анчоуса.

Согласно обобщенным по всему СЗШ натурным данным, которые не отражают некоторых особенностей МАОС (малая доступность для ставриды бентосных ракообразных, уход шпрота в разгар лета и др.), личинки ставриды питаются, в основном, копеподами, которые составляют свыше 90% их рациона. С ростом молоди доля копепод в её рационе уменьшается до 40%, доля рыб (в основном анчоуса) увеличивается до 60%. На прибрежном мелководье доля копепод в рационе взрослой ставриды сокращается (до 13% и менее) за счёт потребления зообентоса [5].

На основании изложенного при математическом моделировании трофических связей между энергетическими эквивалентами удельных биомасс копепод, анчоуса и ставриды в первом приближении можно считать, что в условиях МАОС рацион ставриды на 25% состоит из копепод и на 75% – из анчоуса. Когда потребуется учитывать изменчивость размерно-возрастной структуры популяций (и появятся необходимые для этого натурные данные), весовые коэффициенты можно будет заменить соответствующими функциями.

У ставриды время переваривания пищи Δt_d сильно зависит от температуры воды T_w : при $T_w = 15-18^\circ\text{C}$ $\Delta t_d = 8$ ч, при $T_w = 18-22^\circ\text{C}$ $\Delta t_d = 6$ ч, при $T_w = 24-25^\circ\text{C}$ $\Delta t_d = 4$ ч [5]. Эти осреднённые экспериментальные данные говорят о том, что при достаточной кормовой базе интенсивность питания и скорость прироста биомассы ставриды в середине гидрологического лета увеличиваются вдвое.

Перечисленные особенности питания ставриды на МАОС учтены в следующем дифференциальном уравнении для осреднённых по глубине функций:

$$\frac{\partial G}{\partial t} = (\delta c_1 q_z ZG + \varepsilon c_2 q_f FG)H(T) - \bar{W}\bar{V}G - M(G) + \nu \Delta G \quad (1)$$

Начало координат расположено в юго-западном углу МАОС, ось абсцисс направлена на восток, ось ординат – на север. В уравнении (1) использованы следующие обозначения: Z, F, G – энергетические эквиваленты удельных биомасс копепод, анчоуса и ставриды, $H(T)$ – зависимость интенсивности питания и скорости прироста биомассы ставриды от температуры морской воды, \bar{W} – скорость перемещения ставриды относительно неподвижной системы координат, $M(G) = \sum_1^n a_n G^n$ – влияние элиминации и самолимитирования ставриды, ν – коэффициент стайной диффузии, δ и ε – передаточные коэффициенты трофических функций, (q_z, q_f) – доли G , потребляющие (Z, F), c_1 и c_2 – константы.

Поскольку на МАОС основными составляющими рациона ставриды являются анчоус и копеподы, в “приходную” часть уравнения (1) включены только эти слагаемые. Опыт решения подобных задач показал, что S-образную форму трофических функций можно упростить при осреднении зависимых переменных по достаточно большому объёму морской воды.

Для определения \bar{W} необходимо адекватно учесть скорость кормового таксиса ставриды, – предложить соответствующее уравнение и включить его в математическую модель. Эта задача осложняется тем, что одна часть ставриды активным движением реагирует на неравномерное распределение копепод, другая – на неравномерное распределение анчоуса. Но копеподы переносятся морским течением как пассивная примесь, а у анчоуса есть свой таксис – кормовой и нерестовой. [7]. Скорость таксиса – это осреднённая по определённому объёму воды относительная скорость движения большого числа особей в поле градиента концентрации стимулирующего таксис объекта. Следовательно составляющими \bar{W} являются скорость морского течения \bar{u} , эффективная скорость таксиса анчоуса, учитывающая его кормовой и нерестовой таксис \bar{U} и скорости “копеподного” и “анчоусного” таксиса ставриды – \bar{V}_z и \bar{V}_f . Вывод уравнений для \bar{V}_z и \bar{V}_f по сути аналогичен выводу уравнения для скорости кормового таксиса анчоуса [3] с поправкой на новое обстоятельство: одна часть популяции

лянии анчоуса ($q_z G$) движется в поле градиента биомассы копепоид, другая часть ($q_f G$) – в поле градиента биомассы анчоуса. причём $q_z + q_f = 1$.

$$\frac{\partial \bar{V}_z}{\partial t} = \frac{aq_z G}{Z+p} \bar{\nabla} Z + \mu_z \Delta \bar{V}_z, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{V}_f}{\partial t} = \frac{bq_f G}{F+r} \bar{\nabla} F + \mu_f \Delta \bar{V}_f. \quad (3)$$

В уравнениях (2, 3) μ_z, μ_f – коэффициенты стайной вязкости, a, b, p, r – константы. Эти уравнения позволяют имитировать: 1. Зависимость ускорения движений ставриды к пищевому ресурсу от соотношений биомасс консумента и корма ($q_z G/Z$ и $q_f G/F$). (Если корма хватает в данном месте, ставриде незачем спешить в другое, даже если корма там больше.) 2. Ограничение скорости активного движения ставриды по МАОС физиологически возможным максимумом. Натурные наблюдения показали, что рыбы разных размерно-возрастных групп кормятся раздельно. Стаи молоди ставриды (длина тела 4-6 см) питаются на скорости до 40 см/с, стаи взрослой ставриды (длина тела до 20 см) активно питаются на скорости 100 см/с. При вспугивании ставрида удваивает скорость своего движения [8]. На основании этих наблюдений для настройки уравнений (2, 3) приняты значения $|\bar{V}_z|_{max} = 80$ см/с и $|\bar{V}_f|_{max} = 200$ см/с. При прочих равных условиях скорости таксиса пропорциональны биомассе той части ставриды, которая потребляет данный пищевой ресурс. Из сказанного следует, что

$$\bar{W} = \bar{u} + q_z \bar{V}_z + q_f (\bar{U} + \bar{V}_f). \quad (4)$$

Продолжая развивать математическую модель системы фитопланктон – кормовой зоопланктон – рыба, автор уже получил первые результаты по исследованию одновременного влияния кормового и нерестового таксиса анчоуса на функционирование соответствующей системы [9]. В тёплое время года нет промысла анчоуса, но есть промысел ставриды. Предложенные в настоящей работе уравнения (1 - 4) позволят существенно расширить модель включением в неё сначала ставриды, а затем, после

вывода соответствующего уравнения, и её промысла.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С.Латун. Устойчивость системы фитопланктон – зоопланктон – рыба. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Вып.10. Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2004. – С. 211-218.
2. В.С.Латун. Реакция системы фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел на кратковременные изменения вылова хамсы // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь, 2004. – С.179 - 183.
3. В.С.Латун. Учёт кормового таксиса хамсы в математической модели системы фитопланктон – зоопланктон – рыба // Морской экологический журнал. – 2005. – № 4. – С. 49 - 60.
4. В.И.Беляев. Кинетическая теория систем, состоящих из макроскопических частиц и её приложение к задачам экологии. Севастополь, МГИ НАН Украины, 1998. – 236 с
5. В.А.Костюченко, Т.Е. Сафьянова, Н.И.Ревина. Основные закономерности динамики численности планктоядных рыб Черного моря. Ставрида // Сырьевые ресурсы Черного моря. М.: Пищевая промышленность, 1979. – С 92-130.
6. К.А.Виноградов, М.Ш.Розенгурт, Д.М.Толмазин Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря (в рыбопромысловых целях).- Киев: Наукова думка, 1966. – 96 с.
7. В. С. Латун. Дифференциальное уравнение для скорости кормового и нерестового таксиса хамсы. // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь, 2005. – С. 212 – 214.
8. Ю.С.Белокопытин. Энергетический обмен морских рыб. – Киев: Наукова думка, 1993. – 128 с.
9. В.С.Латун. Влияние кормового и нерестового таксиса хамсы на систему фитопланктон – кормовой зоопланктон – рыба. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Вып.14. Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2006. – С. 231-242.