

УЧЁТ РЫБНОГО ПРОМЫСЛА 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 для учёта рыбного промысла в эколого-экономических моделях. Учтены основные технико-экономические характеристики промысла, а также перемещения рыбы и флота по акватории. Уравнения предназначены для использования в интегральных и пространственных динамических моделях системы фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел.

Математические модели морских экосистем разрабатываются с целью получить инструмент для исследования закономерностей функционирования конкретной системы, обосновать принципы управления рыбным промыслом и наметить стратегию рационального природопользования. Задача данной работы – предложить дифференциальные уравнения для учёта рыбного промысла в эколого-экономических моделях.

Рыбный промысел имеет формальные признаки активного хищника второго или третьего уровня. Этот своеобразный хищник потребляет биомассу объектов промысла. Денежный эквивалент уловов является приходной статьёй промыслового бюджета. Бюджет влияет на динамику технической базы рыбного промысла. Выловленная рыба реализуется по рыночным ценам. Объёмы вылова можно выразить в денежных единицах, а все расходы на организацию, проведение и развитие промысла – в единицах удельной биомассы (или энергетического эквивалента удельной биомассы) добытой рыбы. Такая конвертируемость единиц измерения позволяет унифицировать размерность основных уравнений в эколого-экономических моделях.

При моделировании процессов в морских экосистемах первая трудность математической имитации рыбного промысла вызвана необходимостью адекватно формализовать зависимость результатов промысла от концентрации промысляемой рыбы. Основные шаги на пути преодоления этой

трудности в интегральных (точечных) динамических моделях (ИДМ) сделаны автором при разработке сравнительно простой модели [1]. На новом этапе исследований необходимо уточнить первоначальную формализацию и расширить её для использования в пространственных динамических моделях (ПДМ).

При переходе к ПДМ появляются новые трудности, связанные с необходимостью учёта морских течений, перемещения рыб по акватории и соответствующих манёвров промыслового флота. Скорость движения стаи пелагических рыб значительно выше скорости морских течений, скорость промысляющих судов должна быть выше скорости рыб.

Учёт рыбного промысла в ИДМ. В ИДМ имитируется временной ход значений компонентов системы фитопланктон – кормовой зоопланктон – рыба – рыбный промысел, осреднённых по большому объёму обитаемых вод. В уравнениях для биологических компонентов системы формализованы однотипные процессы. Есть источник пополнения биомассы организмов (первичное продуцирование, питание), есть процессы элиминации их биомассы (метаболизм, пресс хищников, промысловое изъятие, естественная смертность и др.). Существует также эффект самолимитирования. В каждый момент времени баланс этих воздействий на популяцию определяет изменение её биомассы и соответственно влияет на структуру биоценоза. Если, к примеру, в уравнении для биомассы копепод учитывается пресс анчоуса, то в полном уравнении для биомассы анчоуса приходной статьёй является потребление им копепод. Уменьшение биомассы копепод приводит к увеличению биомассы фитопланктона. Если не все расходные статьи учтены в явном виде, суммарное влияние неучтённых факторов можно приближенно учесть через передаточный коэффициент при трофической функции.

В уравнениях для рыбного промысла формализуются не биологические, а технико-экономические процессы. Но промысел с использованием рыболовецкого флота имеет поведенческие признаки активного хищника, например ставриды. В книге [1] автор обосновал S -образность “трофической” функции промысла R_{pe} и предложил следующую формулу:

$$R_{fc}(F) = \frac{a_f F^m}{b_f + F^m} + c_f, \quad (1)$$

где F – концентрация рыбы, остальные величины – константы.

Количество рыбы, выловленной за единицу времени (Q), зависит от R_{fc} и пропорционально величине эффективной технической базы промысла (E). При использовании однотипными судами одинаковых способов лова и транспортировки добычи, величина E соответствует количеству участвующих в промысле судов (N_c). Путина проводится периодически, в определённый сезон и/или при определённых экологических условиях. Эта особенность промысла может быть учтена включением в выражение для Q функции времени t и соответствующих свойств биотопа – $I(t, \dots)$. В итоге приходная статья промыслового бюджета принимает вид; $Q = R_{fc} E I(t, \dots)$.

Основными расходными статьями промыслового 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_{ov}) и расходов на промысле (D_{ow}), причём $D_{ow} \gg D_{ov}$. Расходы D_{ow} прямо зависят от величины активной базы промысла и могут быть учтены в явном виде: $D_{ow} = k_f E^n$. Сумму остальных расходов в единицу времени можно заменить средним её значением за n прошлых промысловых сезонов с аналогичными условиями,

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_a + D_{ov} + D_t + D_m)_i. \quad (2)$$

Если бюджет сбалансирован, $dE/dt = 0$, а E и N_c – константы, то есть количество участвующих в промысле судов остаётся постоянным. Профицитность или дефицитность бюджета означают, соответственно, рост или уменьшение E и N_c . При неблагоприятной промысловой обстановке ($F < F_0$) только научно-промысловые суда продолжают работу. При самой благоприятной обстановке ($F > F_0$) число промышляющих судов ограничено. Значит величина E находится в пределах $E_0 < E < E_f$.

Следующее дифференциальное уравнение для E позволяет в рамках ИДМ учесть основные факторы рыбного промысла:

$$\frac{dE}{dt} = \left(\frac{a_f F^m}{b_f + F^m} + c_f \right) E I - k_f E^n - \bar{D}. \quad (3)$$

Учёт рыбного промысла в ПДМ. В ПДМ имитируется пространственно-временная изменчивость значений компонентов системы фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел. Большинство пелагических промысловых рыб обитает в сравнительно тонком приповерхностном слое морских вод, где сосредоточена основная часть биомассы планктона и рыб-планктонофагов. Значит есть основания рассматривать осреднённые по этому слою значения энергетических эквивалентов удельных биомасс. Известно, что переход от объёмной модели к рассмотрению осреднённых по вертикали характеристик биоты существенно облегчает решение математической задачи и многократно уменьшает ошибки моделирования [2].

Все компоненты системы находятся в движении. Что, например, происходит на северо-западном шельфе Чёрного моря в тёплое время года? Планктон переносится течением, рыбы-планктонофаги (анчоус) идут в места с достаточной концентрацией кормового зоопланктона (копепод), готовый к нересту анчоус ищет воду определённой солёности, взрослая ставрида преследует анчоус, в начале и в конце сезона флот ведёт интенсивный промысел ставриды. Автором адекватно формализован таксис рыб, его влияние на функционирование систем разной сложности рассмотрено в работах [1,3,4]. Теперь надо формализовать движения флота по акватории промысла.

Локальная концентрация промысловой рыбы и места её скопления постоянно изменяются. Отдельное судно в процессе работы маневрирует и проводит локальный поиск мест с большей концентрацией рыбы, группа судов может менять дислокацию на основании данных промразведки. Моделируется не движение отдельного судна, а вектор средней скорости судов, находящихся на акватории определённого размера, например в ячейке вычислительной сетки. 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 λ в данном случае характеризует степень неупорядоченности движения промысловых судов на подсеточных масштабах.

В ИДМ техническая база промысла изменяется во времени, в ПДМ – во времени и в пространстве, $E(x, y, t)$. Пространственная изменчивость величины E связаны с перемещениями флота по акватории. Если промысловый ставриду флот движется в поле градиента её биомассы со скоростью \vec{V} , а ставрида перемещается по акватории со скоростью \vec{U} , то скорость флота в неподвижной системе координат $\vec{W} = \vec{U} + \vec{V}$. Зависимость вектора \vec{U} от таксиса анчоуса, ставриды и движения вод формализована и использована автором в работе [4]. Характер зависимости вектора \vec{V} от градиента концентрации ставриды $\vec{\nabla}F$ очевиден: флот движется в направлении градиента и увеличивает или уменьшает свою скорость при увеличении или уменьшении градиента. Модуль вектора $\partial\vec{V}/\partial t$ зависит также от соотношения E/F . По понятным причинам реакция флота на изменение $\vec{\nabla}F$ не может быть мгновенной, а потому формализовать эту реакцию следует в рамках представлений о медленном таксисе [5]. Максимальная скорость флота ограничена. От характеристик технической базы промысла зависят те значения концентрации рыбы, при которых переход флота на акваторию с большей или меньшей концентрацией становится экономически нецелесообразным/

Перечисленным требованиям удовлетворяет следующее уравнение для \vec{V} :

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} = H(F - F_0) \frac{aE}{F + b} \vec{\nabla}F + \lambda\Delta\vec{V}, \quad (4)$$

где $H(F - F_0)$ – функция Хевисайда, a, b, λ – коэффициенты, соответствующие условиям промысла.

При переходе от ИДМ к ПДМ в уравнении (3) следует учесть влияние виртуальных адвекции ($\vec{W}\vec{\nabla}E$) и диффузии ($\mu\Delta E$), а также в явном виде выразить ту часть эксплуатационных расходов, которая связа-

на с перемещениями флота по акватории ($k_3|\vec{W} - \vec{u}|^r$, где \vec{u} – скорость течения):

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \left(\frac{a_f F^m}{b_f + F^m} + c_f \right) E I - \quad (5)$$

$$-\vec{W}\vec{\nabla}E + \mu\Delta E - k_2 E^q - k_3 |\vec{W} - \vec{u}|^r - \bar{D}$$

Таким образом, эколого-экономические модели могут имитировать динамику биомассы живых компонентов системы и динамику технической базы промысла. Изменчивость вылова рыбы является промежуточным результатом вычислительного процесса. Учёт рыбного промысла с помощью уравнений (4, 5) возможен в тех ПДМ, которые адекватно имитируют изменчивость структуры биоценоза на акватории промысла. Такая модель недавно разработана автором и уже адаптирована к условиям северо-западного шельфа Чёрного моря, это ПДМ системы фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида [4]. На следующем этапе исследований автор планирует развить эту модель включением в неё промысла ставриды.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Еремеев, И. Е. Тимченко, Е. Ф. Васечкина, Е. М. Игумнова, В. С. Латун, В. Д. Ярин. Системное моделирование морских эколого-экономических процессов – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика». 2007. – 451 с.
2. В. И. Беляев. Кинетическая теория систем, состоящих из макроскопических частиц и её приложение к задачам экологии. – Севастополь, МГИ НАН Украины, 1998. – 236 с.
3. 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, 2006. – С. 303–313.
4. В. С. Латун, Эколого-математическая модель системы фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида. // Настоящий сборник.
5. В. Н. Говорухин, А. Б. Моргулис, Ю. В. Тютюнов. Медленный таксис в модели хищник – жертва. // Доклады РАН, № 6. 2000. – С. 730–732.