

ОЦЕНОЧНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПЛАНКТОН-РЫБА- РЫБНЫЙ ПРОМЫСЕЛ

В.С. Латун

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

Предложена оценочная математическая модель системы кормовой зоопланктон - рыба - рыбный промысел. Полученное численное решение позволяет проводить вычислительные эксперименты в широком диапазоне параметров. Даны примеры реакции системы на экологические возмущения.

Структура модели обусловлена следующими целями ее создания: 1. Выяснить механизм функционирования системы. 2. Способствовать разработке метода диагностирования состояния системы. 3. Оценить последствия природных и антропогенных воздействий на систему. Единицей измерения планктона (P), рыбы (F) и ее вылова (E) выбран энергетический эквивалент средней удельной биомассы (кал/м³). Независимой переменной является время (t). Модель позволяет учитывать физиологические особенности конкретного вида рыб-планконофагов и реальные характеристики изучаемой системы.

Из рыб Черного моря главный интерес представляет хамса: этот мелкий планконофаг является абсолютным лидером по биомассе и объемам вылова. Хамса живет до четырех лет, продуктивного возраста достигает на втором году жизни, среди нерестящейся хамсы преобладают двух- и трехлетки. Хамса теплолюбива, в холодное время года почти не питается, теряя при этом до 50% своей калорийности. Все виды потребляемого хамсой зоопланктона принято объединять в понятие "кормовой зоопланктон", который, в основном, состоит из копепод. Внутригодовая и межгодовая изменчивость биомассы кормового зоопланктона (копепод) в Черном море известна, известны также приближенные значения соотношений биомасс копепод, хамсы и ее вылова. Для настройки математической модели на со-

стояние адекватного устойчивого функционирования системы использованы сведения, содержащиеся в работах [1-5].

Основные уравнения задачи имеют вид

$$\frac{dP}{dt} = Q \cdot (1 + A_p + B_p) \cdot P - R(P) \cdot F - L_p \quad \dots \quad (1)$$

$$\frac{dF}{dt} = \delta \cdot R(P) \cdot (1 + A_f + B_f) \cdot F - M(F) \cdot E - L_f \quad \dots \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = \varepsilon \cdot M(F) \cdot E - O(E) \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (3)$$

Использованы следующие обозначения: Q-скорость продуцирования среднегодового уровня биомассы кормового зоопланктона; A-функции, определяющие характерную периодичность изменений биомассы планктона и хамсы; B-непериодические природные или антропогенные воздействия на биомассу планктона и хамсы; R(P)- трофическая функция хамсы; L- самолимитирование планктона и хамсы; δ- доля потребляемой хамсой биомассы планктона, которая идет на увеличение ее собственной биомассы; M(F) - аналог трофической функции для рыбного промысла (который, по сути, является технико-экономическим хищником); ε-доля вылова рыбы, расходуемая на поддержание и развитие рыбного промысла; O(E) – эксплуатационные, амортизационные и сопутствующие расходы.

Выбор вида перечисленных функций обоснован логически и подтвержден известными данными. Кривая годового хода биомассы планктона близка к синусоиде (еще ближе – к сумме двух синусоид). Функции самолимитирования учитывают как пропорциональное биомассе вымирание, так и резкое сокращение численности популяции при ее высокой плотности. Элементы новизны в выборе вида других функций в уравнениях (1)-(3) оправдывают более подробное их описание.

Известная модификация трофической функции В.С. Ивлева, учитывающая прекращение поедания зоопланкtonом фитопланктона при уменьшении биомассы фитопланктона до определенного значения [6], подсказала новый вид функции R(P) для хамсы :

$$R(P) := \frac{a P^n}{b + P^n} + c \quad \dots \quad (4)$$

В таком виде (рис.1) эта функция существенно расширяет имитационные возможности модели.

Хамса перестает питаться осенью, когда температура воды опускается ниже значения T_1 , а $P = P_1$, и начинает поедать планктон весной, когда температура поднимается выше $T = T_2$, а $P = P_2$. Если формулу(4) настроить на $P_0 = 1/2(P_1 + P_2)$, то в модель будет введена зимняя потеря хамсой ее калорийности. В северо-западной части Черного моря приход хамсы в места нагула весной и уход из этих мест осенью наблюдается при $T_1 = T_2 = 12^\circ C$. [7].

Смена генераций копепод происходит и в холодную часть года (в замедленном темпе), поэтому прекращение их поедания хамсой в это время приводит к некоторому увеличению продукции и биомассы кормового зоопланктона. Этот фактор также учитывается через формулу (4).

Простые рассуждения приводят к выводу, что биомасса хамсы должна испытывать межгодовые колебания с периодом, равным удвоенному возрасту ее максимальной репродукционной активности, то есть этот период находится в пределах от 4 до 6 лет. Сведений о существовании такой периодичности найти не удалось. Но известны данные о годичных выловах хамсы за 26 лет, с 1960 по 1985 год [4]. Даже при большом изменении структуры ихтиоценоза в эти годы и развитии техники лова средняя биомасса хамсы в конкретном году должна влиять на результативность промысла. Значит в данных о динамике вылова может содержаться информация о характерных для хамсы длиннопериодных колебаниях ее биомассы. Но непосредственно на диаграмме уловов (рис.2) трудно увидеть какую-либо периодичность.

Для выявления скрытой периодичности разность ежегодных выловов отнесена к среднему значению вылова в эти смежные годы и к полученному таким путем ряду величин была применена процедура локальной полиномиальной регрессии. Результаты этих операций показали существование колебаний с периодом около 5 лет (рис.3).

С помощью функции $M(F)$ в модели учтены нерентабельность промысла при $F < F_1$ (промысел прекращается) и невозможность увеличивать вылов хамсы без модернизации технической базы лова

при $F > F_2$. Функция $O(E)$ отражает те известные обстоятельства, что при отсутствии лова амортизационные и эксплуатационные расходы не равны нулю, а при больших уловах они резко возрастают. Конкретный вид кривых $R(P)$, $M(F)$ и $O(E)$ зависит от выбора коэффициентов в формулах типа(4). Заметим, что значение δ определяет физиология хамсы, а величину ε можно назначать в зависимости от приемлемой рентабельности промысла с учетом планов его развития.

Система уравнений (1 - 3) решена численно методом Рунге - Кутта. Модель находится в устойчивом, адекватном состоянии при реальных соотношениях между средними значениями P , F , E и учете физиологических особенностей копепод и хамсы. Решение показало, что при трехмесячном перерыве в питании хамсы (теплая зима) минимум ее калорийности наступает примерно на месяц позже минимума калорийности копепод, при шестимесячном перерыве в питании (среднеклиматическая зима) - на три месяца позже. Такой сдвиг фаз подтвержден сопоставлением годового хода калорийности копепод [1] и хамсы [2].

Вычислительные эксперименты проведены с целью проследить влияние природных и антропогенных факторов на планктон, хамсу и результативность промысла хамсы. Устойчивый, близкий к фактическому ход P , F и E при теплых зимах и четырехлетнем периоде колебаний биомассы хамсы представлен на рис.4. Эффект непериодических воздействий B_p и B_f оценивался по нарушениям этого хода. По первому сценарию летнее уменьшение биомассы зоопланктона на 20% приводит к некоторому углублению ее осенне-зимнего минимума, к дополнительному уменьшению биомассы хамсы в холодное время года (на 25%) и к соответствующему уменьшению ее вылова. При фиксированном значении ε промысел возвращается к исходным показателям через полгода года. По второму сценарию в период нереста биомасса хамсы уменьшается на 60%, у копепод при этом продолжается обычный годовой цикл смены генераций. Через четыре года максимумы годичных значений энергетического эквивалента удельной

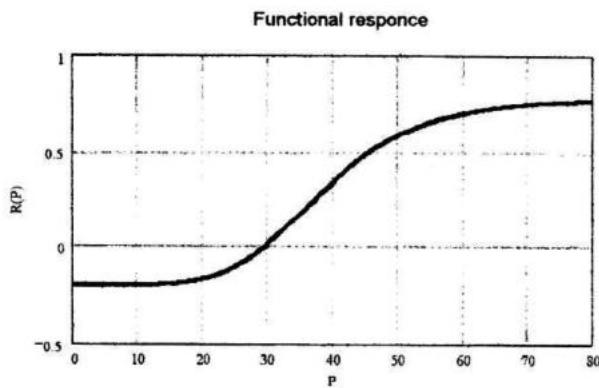


Рис.1 - Функция (4)

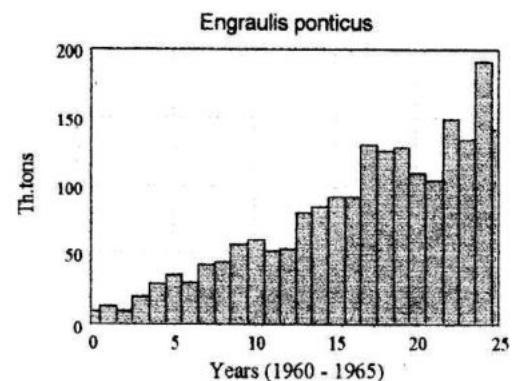


Рис.2 - Вылов хамсы с 1960 по 1985г.[4]

Рис.3 –
Длиннопериодные
колебания
биомассы хамсы

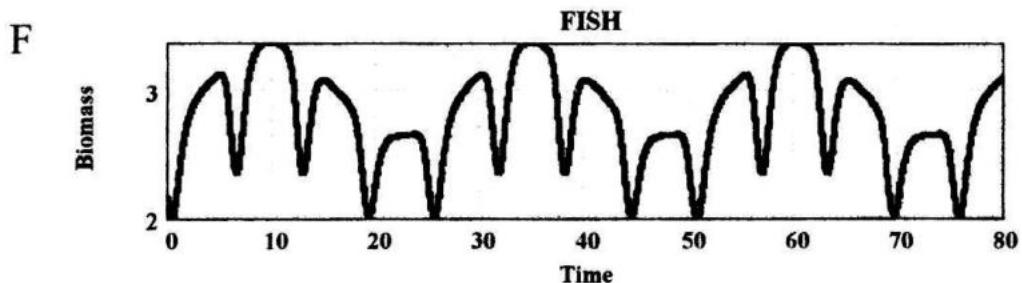
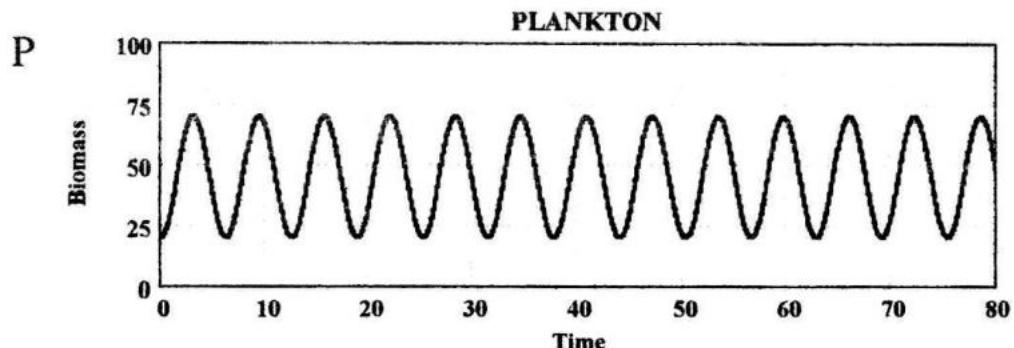
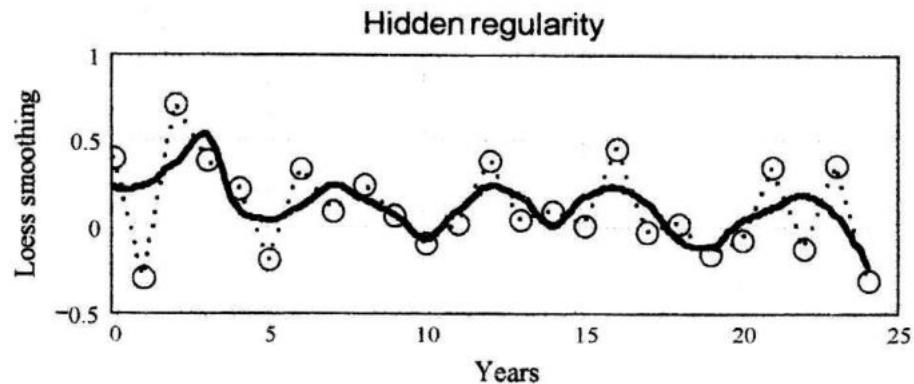
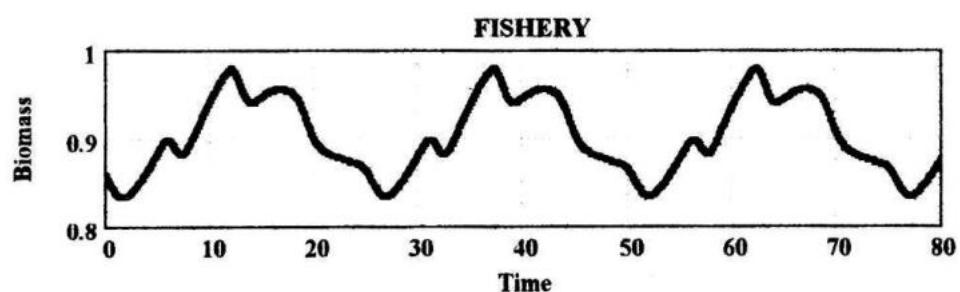


Рис. 4 - Основное
состояние
системы Р, F, E
(год = 2π)



биомассы хамсы и ее вылова возвращаются к своим исходным значениям. Третий сценарий объединяет два предыдущие, отрицательные возмущения состояния системы при этом усиливаются (рис.5).

позволяет проводить вычислительные эксперименты по исследованию реакции системы планктон-рыба-рыбный промысел на экологические возмущения.

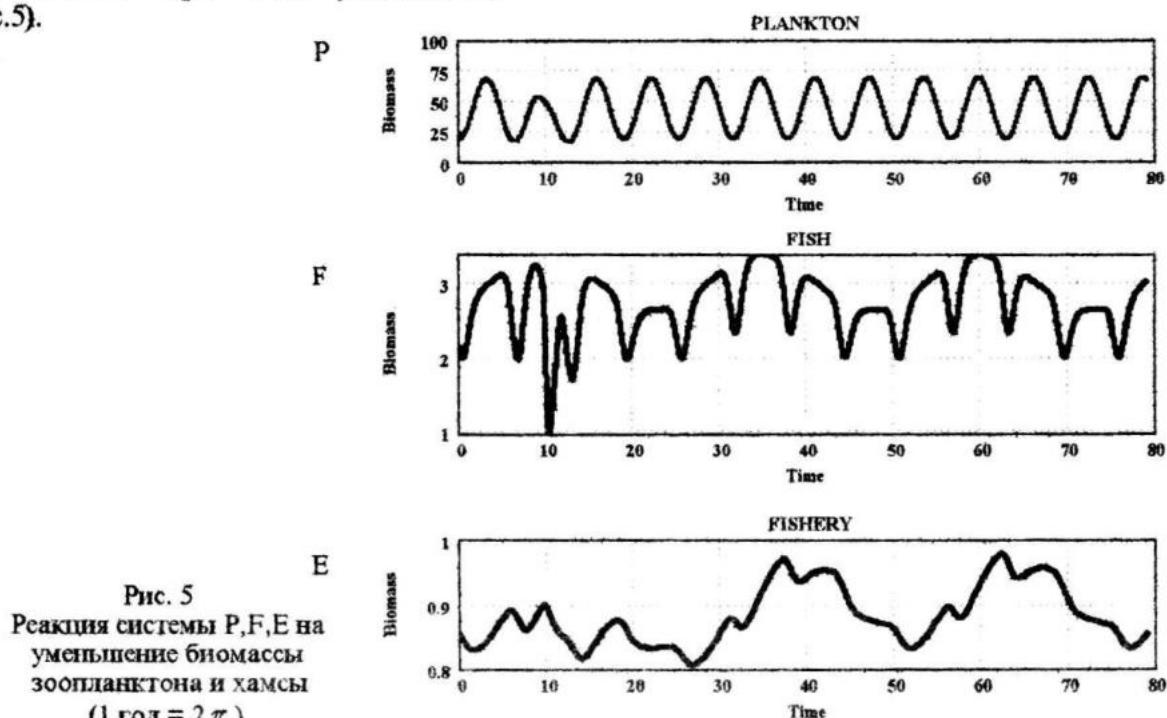


Рис. 5
Реакция системы Р, F, Е на
уменьшение биомассы
зоопланктона и хамсы
(1 год = 2π)

При реальном соотношении биомасс и физиологических особенностей копепод и хамсы пищевые ресурсы в течение всего года не являются для хамсы лимитирующим фактором. Вычислительные эксперименты показали, что только при увеличении биомассы хамсы в 3-5 раз происходит заметное уменьшение биомассы копепод в теплую часть года.

В Средиземном море вылов промысловых рыб близок к их годовой продукции [2]. В Черном море еще можно в определенных пределах увеличивать вылов хамсы. При увеличении вылова на 65% система переходит в иное устойчивое состояние, когда новые объемы вылова сохраняются, но биомасса хамсы уменьшается на 20%. За увеличением вылова в 2-3 раза последует значительное уменьшение как биомассы, так и вылова хамсы. После прекращения промысла из-за его нерентабельности (в модели это автоматическая процедура) начинается рост биомассы хамсы.

Таким образом эта трехуровневая модель учитывает основные особенности объектов каждого уровня и является надежно работающим инструментом, что

ЛИТЕРАТУРА

- Сорокин Ю.И. Черное море: Природа, ресурсы. М.: Наука, 1982, 217 с.
- Грезе В.Н. Пелагиаль Средиземного моря как экологическая система. Киев: Наук. думка, 1989, 200 с.
- Шульман Г.Е. Физико-биохимические особенности годовых циклов рыб. М: Пищевая промышленность, 1978, 368 с.
- Овси Л.С., Гордина А.Д., Гирагосов В.Е. и др. Современное состояние некоторых эксплуатируемых популяций рыб в Черном море. Сб. Изменчивость экосистемы Черного моря: Естественные и антропогенные факторы. М: Наука, 1991, 349 с.
- Ковалев А.В., Финенко З.З., Островская Н.А. и др. Планктон Черного моря. Киев: Наук. думка, 1993, 280 с.
- Денмен К.Л., Платт Т. Биологический прогноз в море. Сб. Моделирование и прогноз верхних слоев океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1979, 367 с.
- Виноградов К.А., Розенгурт М.Ш., Толмазин Д.М. Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря (в рыбопромысловых целях). Киев: Наук. думка, 1966, 96 с.