

УЧЁТ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ В ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ СИСТЕМЫ «БИОГЕНЫ – ФИТОПЛАНКТОН – ЗООПЛАНКТОН – АНЧОУС – СТАВРИДА – ПРОМЫСЕЛ АНЧОУСА И СТАВРИДЫ»

В. С. Латун

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

Для использования в математических моделях предложены способы учёта факторов, влияющих на динамику экологических процессов в Чёрном море. Эти способы позволяют моделировать многолетнюю изменчивость промысловых запасов анчоуса и пространственно-временную изменчивость вылова ставриды в тёплый период года на СЗ шельфе.

"К числу экологических проблем относится также вопрос о способах введения возмущений в модель". Дж. Стил [1].

Математизация экологии моря требует решения многих проблем. Морские экосистемы относятся к категории систем высшей сложности. Это многокомпонентные нелинейные динамические системы с гомеостатическими свойствами и разветвлёнными обратными связями. Организмы обитают в подвижных, пространственно неоднородных массах воды и могут передвигаться в поисках оптимальных условий жизнедеятельности (таксис организмов). Интенсивность и направленность физиологических процессов зависят от физических и химических свойств морской воды. Способность консументов к смешанному питанию значительно усложняет схему трофических связей. Адекватное математическое описание внутрисистемных функциональных зависимостей позволяет, при правильном введении возмущений, исследовать реакцию сложной системы на внешние воздействия.

Опыт последних десятилетий показал, что использование новых возможностей добычи рыбы способно привести к коллапсу промысловых запасов черноморского анчоуса (хамсы) [2]. Поэтому практически значимым стало нахождение эффективных способов учёта природных и антропоген-

ных возмущений в эколого-экономических моделях. Без решения этой задачи не может быть успехов в разработке научно обоснованных методов управления рыбным промыслом.

Цель данной работы – обосновать те способы учёта возмущающих факторов, которые используются или будут использованы нами в интегральных и пространственных эколого-экономических моделях системы «биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – промысел анчоуса и ставриды». Такие модели разрабатываются для всей акватории Чёрного моря и для его северо-западного шельфа (СЗШ) [3, 4, 5].

На любой компонент моделируемой системы могут воздействовать внешние возмущающие факторы. В общем случае невозможно ранжировать эти факторы по степени их влияния на функционирование системы и на результативность рыбного промысла. Трудности введения возмущений в модель имеют и математическую, и, главным образом, концептуальную основу. Математический учёт возмущений должен основываться на логически оформленных и экспериментально подтверждённых представлениях об основных свойствах моделируемых процессов и количественных соотношений между ними. Это утверждение проиллюстрируем следующим анализом.

В трофической пирамиде по ступеням «фитопланктон – зоопланктон (копеподы) – черноморский анчоус (хамса)» поднимается поток биомассы (энергетического эквивалента биомассы). Математически этот поток учтён через трофические и элиминирующие функции в соответствующих дифференциальных уравнениях. Кратковременное уменьшение биомассы фитопланктона, вызванное несколькими днями пасмурной погоды, через зоопланктон скажется на биомассе анчоуса. Модель имитирует прохождение этого сигнала. Если сигнал ослаблен, ослабление можно объяснить и математически представить как следствие большого различия между периодами репродукционных циклов фитопланктона и копепод. Но на биомассу фитопланктона влияют и те внешние факторы, цикличность которых измеряется неделями, месяцами и годами. Низкочастотные факторы функционально связаны с комплексом гидрометеорологических процессов в Черномор-

ском бассейне, периодичность которых под влиянием Северо-Атлантического колебания изменяется в пределах от трёх до шести лет. На изменчивость продуктивности фитопланктона эти процессы воздействуют, в основном, через суммарную солнечную радиацию, материковый сток, содержание биогенов, динамику, температуру и солёность морских вод. Сравнительный анализ влияния этих характеристик показал, что межгодовая изменчивость продукции фитопланктона во время нагула и нереста анчоуса (июнь – август) связана с изменчивостью концентрации биогенов, которая зависит от сроков первого цветения фитопланктона и от объёмов речного стока. На сроки первого цветения решающее влияние оказывает суровость прошлой зимы. Зимняя конвекция на СЗШ проникает до дна и поднимает в фотический слой большое количество биогенов, необходимых для первого цветения фитопланктона, которое происходит весной или в начале лета. Основным источником пополнения запаса биогенов для второго цветения фитопланктона, которое всегда происходит летом, служат эвтрофные воды речного стока. Периодически, при определённых синоптических условиях, восточные ветровые течения переносят большие объёмы этих вод из прибрежной зоны на открытую акваторию СЗШ.

Сроки первого цветения фитопланктона зависят от температуры воды, а значит, от скорости прогрева вод весной конкретного года. После тёплой, спокойной зимы приповерхностные воды быстро прогреваются, и весеннее цветение фитопланктона заканчивается рано (в 1972 году, например, в апреле), до прихода анчоуса с зимовки. После холодной, штормовой зимы температура воды повышается медленно и весной цветение фитопланктона не происходит, оно сдвигается на летний сезон. Такие годы отличаются большей урожайностью анчоуса, поскольку летом, во время нагула и нереста, из-за повышенного содержания биогенов происходит не одно, а два цветения фитопланктона (например, в июне и августе 1962 г.) и соответственно увеличивается биомасса кормового зоопланктона. Необходимо заметить, что и в 1962, и в 1972 году максимальный речной сток наблюдался в мае, но в 1962 г. его объём был в 1,7 раза большим в мае и в полтора раза

большим в июне – августе. Следовательно, 1962 году сложились благоприятные условия для урожая анчоуса, а в 1972 году – неблагоприятные.

Термическое состояние фотического слоя формируется под воздействием теплового баланса за предшествующий год (Q^{N-1}) и суммы месячных значений теплового баланса (q_i) за n месяцев текущего года ($\sum_{i=1}^n q_i^N$). Прогрев вод в конце n -ого месяца пропорционален суммарному теплозапасу Θ_n^N (МДж/м²):

$$\Theta_n^N = Q^{N-1} + \sum_{i=1}^n q_i^N \quad (1)$$

Нами показано [3], что весной цветение фитопланктона начинается при переходе величины (1) из области отрицательных значений в область значений положительных. Естественно предположить, что мониторинг теплозапаса позволяет уже в конце апреля предвидеть особенности предстоящего урожая анчоуса. Уточнение предварительных оценок может быть сделано на основании доступных прогнозов объёма речного стока и сроков паводковых волн на Днестре и Дунае.

Для проверки этих зависимостей использованы данные 1955–1984 годов о значениях апрельского теплозапаса, суммарного стока Днестра и Дуная в мае – июне, биомассы фитопланктона и кормового зоопланктона, а также, что особенно важно, данные об урожайности анчоуса (то есть о численности его молоди в августе). Совместный анализ динамики перечисленных характеристик показал, что рассмотренная цепочка зависимостей на качественном уровне соответствует природе рассматриваемых экологических процессов. Но почему в августе 1962 года молоди анчоуса было в 14 раз (!) больше, чем в августе 1972 года? Поиски ответа на этот вопрос помогли оценить влияние других факторов на межгодовую изменчивость численности молоди и промыслового запаса анчоуса.

Урожайность анчоуса зависит от биомассы и возрастной структуры нерестового стада. В урожайные годы оно состоит из четырех возрастных групп – от годовиков до четырехлеток, причем главный вклад в биомассу и урожайность вносят двухлетки и трехлетки. В депрессивные годы, после

которых происходит резкое уменьшение биомассы анчоуса, нерестовое стадо состоит, в основном, из годовиков (до 80-98% по численности) [6]. За июнь – август анчоус совершает более десяти икрометаний, причем у годовиков первое икрометание происходит несколько позже и их удельная плодовитость сравнительно мала. Элиминация икринок анчоуса велика, но от года к году изменяется в небольших пределах – от 65 до 85%. А выживаемость личинок анчоуса может изменяться в 20 раз (!), поэтому именно она сильно влияет на межгодовую изменчивость урожайности. Главный механизм этого влияния таков: личинки анчоуса, на ранней стадии их развития, питаются мелкими (диаметром около 40 мкм) клетками фитопланктона и, если в течение двух – трёх дней (на интенсивность питания влияет температура воды), концентрация таких клеток не превышает 20 кл./мл, личинки погибают [7]. Это означает, что *определённые внешние воздействия на фитопланктон могут непосредственно, минуя трофический уровень зоопланктона, оказывать основное влияние на урожайность анчоуса.* Теперь можно на новом концептуальном уровне вернуться к объяснению причин различия между урожаями анчоуса в 1962 и 1972 годах.

Урожайному 1962 году предшествовали два еще более урожайных года, поэтому биомасса нерестового стада была велика и главная репродукционная роль в нём принадлежала двухлеткам. Почему двухлеткам? Потому, что 1958 и 1959 годы были малоурожайными, а в 1960 году урожай анчоуса (число сеголеток) увеличился в 12 раз. Это обеспечило рекордную численность годовиков в 1961 году и преобладание двухлеток в нерестовом стаде 1962 года. Таким образом, летом 1962 года хорошие условия развития планктона (два цветения фитопланктона: в июне и августе, большой речной сток) совпали с достаточно высоким репродукционным потенциалом нерестового стада.

Исключительно неурожайному лету 1972 году предшествовали три одинаково малоурожайных года, следствием чего стала небольшая биомасса нерестовой популяции при её оптимальной возрастной структуре. В 1972 году первое цветение фитопланктона наблюдалось в апреле, до прихода анчоуса с зимовки, второе – в июне, ко-

гда морская вода ещё недостаточно прогрелась для его обильных икрометаний. В период с января по сентябрь месячные объёмы речного стока были относительно небольшими и почти одинаковыми, на Днепре и Дунае паводковых волн в этом году не было. Совпадение перечисленных условий привело к тому, что в августе 1972 года на СЗШ наблюдалось очень мало молоди анчоуса.

Известен лишь этот короткий ряд наблюдений за динамикой основных факторов влияния на межгодовую изменчивость биомассы анчоуса, поэтому использование методов множественного регрессионного анализа является делом будущего. Но один важный вывод из проведенного концептуального анализа можно сделать сегодня.

Если бы нерестовое стадо анчоуса состояло из рыб одной возрастной группы, период собственных колебаний биомассы анчоуса был бы равен удвоенному возрасту этих рыб. При среднемноголетних экологических условиях в нерестовом стаде анчоуса преобладают – по биомассе и репродукционному потенциалу – двухлетки и трёхлетки. Следовательно, биомасса анчоуса наиболее чувствительна к внешним воздействиям четырёх- и шестилетней периодичности. Именно такие воздействия на экосистему оказывает Северо-Атлантическое колебание. Если в нерестовом стаде представлены все возрастные группы, прямое влияние фитопланктона на анчоус может быть учтено через следующий множитель при его трофической функции:

$$G_f(t) = 1 + a \left[\frac{P(t) - \bar{P}}{\bar{P}} \right] \sum_{n=1}^l b_n \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} + \varphi_n\right) t, \quad (2)$$

где $P(t)$ – концентрация фитопланктона в тёплый период года, \bar{P} – среднее значение этой величины за многие годы, n , b_n – номер возрастной группы анчоуса, и её репродукционный потенциал, T_n – период соответствующего репродукционного цикла.

Основное влияние на изменчивость концентрации фитопланктона в тёплое время года оказывает изменчивость содержания биогенов в морской воде. Биогены переносятся нестационарными ветровыми течениями восточного направления. Значит, через адвективный перенос биогенов и планктона можно учитывать влияние воз-

мущений скорости течения на все компоненты трофической системы. Серии возмущений различных масштабов удобно представить в следующем виде:

$$u(x,t) = u_0(x,t) * \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i(x,t)H(t-t_i)}{b_i(t-t_i)^{m_i} + c_i(t-t_i)^{k_i} + d_i} \right), \quad (3)$$

где u_0 и u – исходная и возмущённая скорость течения, t_i – время начала индексированного возмущения, $H(t-t_i)$ – функция Хевисайда, $a_i(x,t)$ – пространственно-временная структура этого возмущения, b_i, c_i, d_i, m_i, k_i – константы. Возмущения скорости течений учтены во всех уравнениях задачи. Аналогичную форму аппроксимации возмущений удобно использовать и для других характеристик экосистемы.

Пространственная динамическая модель воспроизводит поведение экосистемы на СЗШ в тёплое время конкретного года, интегральная – на всей акватории моря в течение ряда лет. Через начальные условия в пространственную модель могут быть введены возмущения, сформировавшиеся в предшествующий холодный период года и содержащиеся в интегральной модели. О влиянии температуры воды весной на экологические процессы летом уже было сказано. Список примеров можно продолжить.

Зимние погодные условия влияют не только на интенсивность и сроки цветения фитопланктона, но и на естественную элиминацию анчоуса и ставриды. Как суровые зимы влияют на биомассу и возрастную структуру пришедшего с зимовки нерестового стада? Вылов зимующего анчоуса в недавние годы намного превышал его естественную элиминацию. Насколько избирательно новые способы лова уменьшают биомассу разных возрастных групп анчоуса к концу холодного сезона? Зная ответы на эти вопросы, можно повысить адекватность пространственной модели для тёплого сезона путём учёта соответствующих возмущений в начальных условиях.

Состояние интегральной модели в конце тёплого сезона можно корректировать результатами работы пространственной модели. Такая агрегация моделей, дополненная усвоением данных мониторинга, способна улучшить результаты каждой из них.

На динамику экологических процессов всё в большей степени влияют глобальные изменения климата. Математические модели способны имитировать различные варианты развития природных сценариев, что поможет заблаговременно определять тот максимальный объём вылова рыбы, при котором не произойдёт уменьшения её промысловых запасов. Базовые версии таких моделей уже предложены, разрабатываются концептуальные схемы их возможного развития. Для использования эколого-экономических моделей в конкретных прогностических проектах, необходимо организовать качественно новый мониторинг экологической обстановки и предвидеть возможные изменения климата в бассейне Чёрного моря. Чтобы решить эти актуальные задачи, следует разработать целевую программу междисциплинарных исследований и приступить к её выполнению.

Л и т е р а т у р а

1. Стил Дж. Экологическое моделирование верхних слоёв океана / Краус Э.Б. Моделирование и прогноз верхних слоёв океана. – Ленинград: Гидрометеоиздат. 1979. – С. 290–298.
2. Gucu A.C. Role of fishing in the Black Sea ecosystem // Sensitivity to change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea. – Netherlands: K1. Academic Publishers, 1997. P.149–162.
3. Латун В.С. Моделирование системы «фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел» / Еремеев В.Н., Тимченко И. Е. Системное моделирование морских эколого-экономических процессов. – Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2007. – С. 236 – 289.
4. Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е. Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: МГИ НАНУ. 2007. – 258 с.
5. Латун В.С. Влияние вылова ставриды на пространственно-временную изменчивость компонентов системы «фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – промысел ставриды» // Настоящий сборник.
6. Сырьевые ресурсы Черного моря. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 323с.
7. Парсонс Т.П., Такахаша М., Харгрейв Б. Биологическая океанография. – М.: «Легкая и пищевая промышленность». 1982. – 432 с.