

УЧЕТ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОТОПА В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ

В. С. Латун

Морской гидрофизический институт

НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: ocean@alpha.mhi.iuf.net

Рассмотрены вопросы выбора формы представления информации о гидрофизических процессах для ее использования в математических моделях морских экосистем.

При классификации систем морская экосистема попадает в класс высшей сложности. Это очень сложная многоуровневая иерархическая система, одни элементы которой являются детерминированными, другие - вероятностными. Это развивающаяся синергетическая система с гомеостатическими свойствами. Такая система принципиально не может быть formalизована исчерпывающим образом, иначе говоря, невозможно построить ее полную математическую модель. Поэтому в биологической океанографии основные усилия ученых направлены на создание математических моделей отдельных процессов с надеждой их последующего использования при моделировании более крупных систем. Метод контурного математического моделирования морских экосистем основан на учете небольшого числа основных переменных состояния и, в сущности, не рассчитан на получение адекватных количественных результатов.

Прогресс здесь возможен при агрегировании компонент, групповом учете аргументов и достаточном наборе альтернативных верифицируемых субмоделей разной сложности [1-4]. Вероятность создания работающего варианта модели экосистемы увеличивается, если, исходя из конкретных задач моделирования, определены пространственно-временные масштабы изучаемых процессов и структур, удачно выбраны интегральные и агрегированные характеристики, верифицированы субмодели и проведен концептуальный или эмпирический анализ чувствительности модели к изменениям параметров.

Основные субмодели естественно группируются в два блока, - "Биотоп" и "Биоценоз". В первый блок попадают имитационные модели физических и химических процессов в определенном объеме морской воды, во второй - модели функционирования сообществ морских организмов. Потоки энергии и вещества из биотопа в биоценоз являются определяющими

факторами функционирования экосистемы, равновесие которой может нарушаться и обратным влиянием процессов в биоценозе на характеристики биотопа. Ключевым вопросом при моделировании этих взаимодействий является вопрос согласования пространственно-временных масштабов в соответствующих подсистемах, причем идентичность масштаба времени гидрофизических и биологических процессов может быть как достоинством, так и недостатком конкретной методики [1].

Выбор оптимальных масштабов производится, как правило, применительно к задачам, поставленным в блоке "Биоценоз", на этих масштабах надо решать проблемы моделирования гидрофизических процессов и подготовки данных в блоке "Биотоп". Субмодели в этом блоке также образуют многоуровневую иерархическую структуру, здесь "иерархическая упорядоченность существует по крайней мере в том смысле, что результаты анализа, проводимого над локализованным элементом на некотором заданном уровне, могут быть подтверждены экспериментально" [5]. Субмодели имитируют термохалинную структуру и динамику вод, переносзвешенных и растворенных веществ, формирование оптических характеристик морской среды и происходящие в ней химические процессы. Многие характеристики более или менее регулярно измеряются в натуральных условиях и возможность верификации субмоделей зависит, в основном, от наличия массивов данных, достаточных для описания пространственно-временной изменчивости моделируемых элементов на конкретных масштабах. Без конкретизации масштабов задачи анализа процессов в биотопе являются неопределенными. От выбора масштабов зависит методика подготовки необходимых данных о физических характеристиках морской среды. Если моделируется внутригодовой ход биологических процессов с характерными масштабами осреднения 100 км по горизонтали, от 10 до 100 м по вертикали и один месяц по времени, нет необходимости в использовании термогидродинамических моделей, поскольку для большинства акваторий известна климатическая внутригодовая изменчивость гидрофизического режима. При уменьшении соответствующих масштабов до 10 км, 10 м и одной декады (отдельные участки шельфа, морские прибрежные экотоны [6]) методика анализа используемых в модели экосистемы характеристик биотопа нуждается в определенном усложнении даже в том случае, когда известны среднемноголетние декадные карты лимитирующих гидрофизических факторов [7]. В мелководных и прибрежных акваториях гидрофизические процессы отличаются меньшей инсценированностью, они в большей степени зависят от локального взаим-

модействия моря и атмосферы. Продолжительность естественного синоптического периода составляет, как известно, от 5 до 8 суток, элементарного синоптического процесса - от 3 до 4 суток, поэтому среднемноголетние карты гидрометеорологических характеристик за календарные промежутки времени нивелируют реальные процессы. Для имитации реальных или экстремальных экологических ситуаций применим подход, сочетающий использование средних климатологических характеристик с учетом эффекта статистически преобладающих последовательностей синоптических процессов или прогнозируемой метеорологической обстановки, при этом можно рассматривать осредненную, горизонтально-однородную структуру биотопа и по данным о ветре вычислить дополнительный водообмен через его жидкие границы, т.е. использовать метод боксов[3,6]. При уменьшении масштабов возникает необходимость в явном виде учитывать как прямые, так и обратные связи между блоками "Биотоп" и "Биоценоз".

Включению в блок "Биотоп" гидротермодинамической субмодели должен предшествовать анализ влияния ее структуры, мерности, коэффициентов и граничных условий на непротиворечивость субмодели, устойчивость и точность промежуточных и окончательных результатов численного решения задачи. Поскольку граничные условия всегда задаются с некоторой неадекватностью, а коэффициенты обмена являются интегральной характеристикой движений подсеточных масштабов, для разностной схемы, аппроксимирующей систему уравнений гидротермодинамики, существует оптимальный размер сетки, дальнейшее уменьшение которого приводит к расхождению численного решения. Выбором значений коэффициентов, граничных условий и параметров разностной аппроксимации осуществляется настройка субмодели на определенные масштабы и соответствующий массив натуральных данных. Поскольку проверка модели обычно проводится на этом же массиве данных, вопрос о противоречивости модели остается открытым. Между тем для некоторых гидрофизических характеристик биотопа накопились большие массивы натуральных данных, достаточные для того, чтобы непротиворечивость модели оценить по критерию смещения. Проиллюстрируем это утверждение следующим примером.

Термогидродинамическая модель и модель первичной продукции являются центральными субмоделями блоков "Биотоп" и Биоценоз". Адекватность этих моделей во многом зависит от правильного учета влияния турбулентности на фитопланктон, циркуляцию морских вод и распространение примесей. Турбулентный об-

мен анизотропен, поэтому в общем случае надо функционально или численно задать коэффициенты турбулентной диффузии вдоль трех координатных осей, (K_x, K_y, K_z). Элементарные соображения, подтверждаемые результатами экспериментов, говорят о зависимости этих коэффициентов от характеристических значений горизонтальных и вертикального размеров (L_x, L_y, H), интервала времени (T), скорости течения (U), градиента плотности ($\text{grad } \rho$), силы трения ветра о поверхность моря (F) и интенсивности волновых процессов в рассматривающей толще вод (W):

$$(K_x, K_y, K_z) = f(L_x, L_y, H, T, U, \text{grad } \rho, F, W). \quad (1)$$

Конкретизация зависимостей (1) приводит к полуэмпирическим формулам, которые затруднительно использовать в моделях экосистем. Более или менее обоснованный выбор постоянных значений коэффициентов может настроить модель на получение правдоподобных результатов, но может служить и причиной противоречивости модели. В этом можно убедиться, имея достаточно большой массив натуральных наблюдений над какой-либо из реальных представительных моделируемых переменных.

Допустим имеется массив из N разовых натуральных измерений моделируемой характеристики S . По определенным признакам сгруппируем из элементов этого массива n подмассивов:

$$N = a + b + c + \dots + n. \quad (2)$$

Такими признаками могут быть сочетания аргументов в функциональной зависимости (1), характеристические, скажем, для каждого месяца, гидрологического сезона или различных районов рассматриваемого биотопа. По этим признакам выберем значения коэффициентов применительно к средним условиям всего массива измерений ($K_x, K_y, K_z)_N$ и условиям отдельных подмассивов, например ($K_x, K_y, K_z)_a$. Относительную чувствительность модели к такому выбору коэффициентов показывает критерий смещения ϵ :

$$\epsilon_{N,a}^2 = \frac{\sum_{i=1}^a (S_{KN} - S_{Ka})_i^2}{\sum_{i=1}^a S_i^2}, \quad (3)$$

где S_{KN} и S_{Ka} - модельные значения характеристики S при использовании значений $(K_x, K_y, K_z)_N$ и $(K_x, K_y, K_z)_a$ соответственно.

Используя (2), можно составить набор различных вариантов формулы (3). Общее требование состоит в минимизации ϵ , в конкретной субмодели это может быть требование не выйти за пределы допустимой суммарной погрешности моделирования.

Математические модели морских экосистем разрабатываются для выяснения внутренних механизмов функционирования, адекватного диагностирования и прогноза состояния экосистемы с учетом антропогенных воздействий и вероятных изменений климата, а также для нахождения способов воздействия на экологические процессы. При решении этих задач целесообразно использовать данные текущего мониторинга океанологической обстановки. Обработка и использование этих данных зависят от особенностей конкретной имитационной модели. В пределах заблаговременности краткосрочного прогноза результаты модельного прогнозирования можно сравнивать с результатами экстраполяционных прогнозов [8] или данными мониторинга. Архивные материалы натуальных наблюдений обычно не пригодны для проверки экологических прогнозов большей заблаговременности.

Целесообразность использования сложных четырехмерных термогидродинамических моделей в экологическом моделировании должна быть рассмотрена в каждом конкретном случае. Например, если ошибка субмоделей жизнедеятельности фитопланктона возрастает с 30% до >300% при переходе от рассмотрения осредненных по вертикали характеристик к трехмерной картине [9] и автор считает целесообразным ограничиться рассмотрением плоской задачи, решение соответствующей объемной задачи в блоке "Биотоп" становится излишним. Пропедура перехода к средним значениям переменных вдоль одной из осей и используемые

способы линеаризации уравнений являются, строго говоря, математически некорректными, но позволяют получить практически пригодные решения и использовать эффективные методы линейного и динамического программирования на регулярной сетке координат.

Трудности адекватного учета гидрооптических характеристик в математических моделях морских экосистем вызваны сильным влиянием жизнедеятельности морских организмов на оптические характеристики и, следовательно, на поступление световой энергии. Соответствующие прямые и обратные связи представлены на рисунке. Игнорирование обратных связей может быть одной из причин неудовлетворительной имитации пространственной структуры биологических характеристик, прежде всего концентрации фитопланктона. Первые шаги в направлении замыкания основной петли обратной связи сделаны В.И. Беляевым и Н.В. Кондуфоровой [3]. Авторы среднюю по глубине подводную освещенность и освещенность у дна приближенно рассчитывали с учетом концентрации фитопланктона, зоопланктона и мертвого органического вещества. После получения годового хода биологических параметров более детально вычислялись значения оптических характеристик. Полученные таким образом горизонтальное распределение коэффициентов диффузного отражения (для семи диапазонов видимого участка спектра) и индекса цвета использованы при качественной верификации модели.

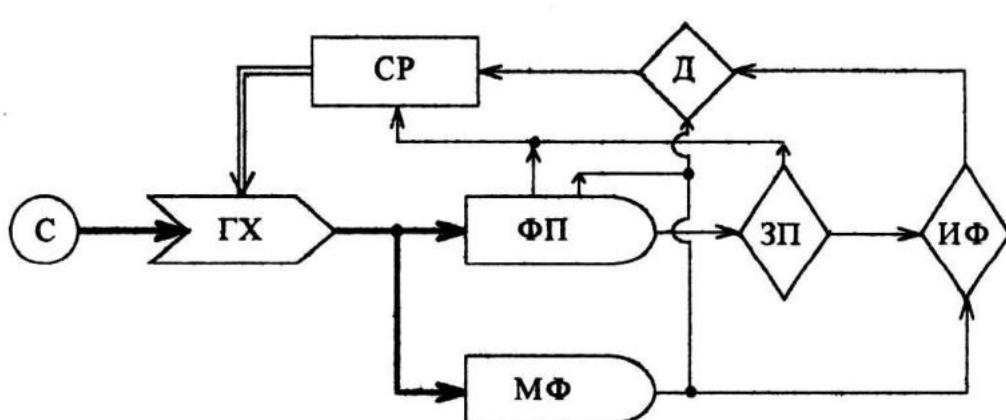


Рисунок. Схема влияния биологических процессов на поступление световой энергии.

—> поступление света, —> потоки вещества,
—> основная ветвь обратной связи.

С - солнце, ГХ - гидрооптические характеристики, ФП - фитопланктон, МФ - макрофиты, ЗП - зоопланктон, ИФ - ихтиофауна, Д - деструкторы, СР - растворенные вещества.

Накопленный за последние годы опыт математического моделирования морских экосистем показывает, что использование сложных четырехмерных субмоделей для более точного описания гидрофизических процессов и взаимодействий между атмосферой и морем настолько усложняет общую задачу, что ее численное решение получить не удается. Вынужденный переход к двумерной пространственной задаче сопровождается ее линсаризацией, что позволяет при учете основных гидрофизических факторов считать аддитивными поля компонент экосистемы.

В заключение дадим некоторые рекомендации по учету гидрофизических характеристик биотопа в математических моделях морских экосистем. Пространственно-временные масштабы и основные параметры субмоделей в блоках "Биотоп" и "Биоценоз" должны определяться задачами моделирования, особенностями моделируемых процессов и быть согласованными между собой. Имитационные гидрофизические субмодели необходимо проверять на непротиворечивость и устойчивость при их работе как изолированно, так и в сборке. Если влиянием биологических процессов на структуру поля плотности и динамику вод можно пренебречь для макро- и мезомасштабных процессов, то прямая и обратная связь между оптическими и биологическими характеристиками должны учитываться при моделировании основных звеньев биопродукционного процесса. Уровень сложности используемых гидрофизических субмоделей выбирается с учетом направленности и реализуемости конкретной математической модели морской экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математические модели в биологической оксанографии. Париж. ЮНЕСКО. 1984.-195 с.
2. Беляев В.И. Моделирование морских систем. Киев, Наук. думка, 1987.-204 с.
3. Беляев В.И. Кондуфорова Н.В. Математическое моделирование экологических систем шельфа. Киев, Наук. думка, 1990.-240 с.
4. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М., Радио и связь, 1987.-120 с.
5. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М., Мир, 1973.-344 с.
6. Латун В.С. Морские прибрежные экотоны Украины. В сб. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, МГИ НАН Украины, 2001.-С.98-110.
7. Виноградов К.А., Розенгарт М.Ш., Толмазин Д.М. Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря. Киев, Наук. думка, 1966.-96 с.
8. Овсянникова О.А. Прогнозирование морских непериодических течений на основе метода линейной экстраполяции случайных процессов. Труды ГОИН, вып. 1965.- С.173-184.
9. Беляев В.И. Кинетическая теория систем, состоящих из макроскопических частиц и её приложение к задачам экологии. Севастополь, МГИ НАН Украины, 1998. -236 с.