

И. П. Лазарчук

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ БИОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ

На примере простой модели экосистемы северо-западного шельфа Черного моря проиллюстрирован двухэтапный метод моделирования процессов в морских экосистемах с применением адаптивных моделей, в котором на первом этапе по современной численной модели рассчитывается динамика водных масс, на втором – по модели экосистемы производится локальная подстройка переменных экосистемы друг другу с учетом имеющихся оценок переноса и диффузии веществ. При таком моделировании рассчитываемые по гидродинамическим моделям перенос и диффузия становятся внешними влияниями по отношению к реакциям, происходящим в локальном объеме среды.

Ключевые слова: адаптивные модели, метод адаптивного баланса влияний, морская экосистема

Адаптивная модель экосистемы северо-западного шельфа Черного моря. Моделирование морских экосистем предполагает совместное описание биологических, гидрохимических, геофизических и гидрофизических процессов в морской среде. В работе показаны возможности двухэтапного построения карт биохимических полей методом локальной адаптации [1] переменных модели экосистемы. На первом этапе выполняются расчеты течений по гидродинамической модели, позволяющие построить оценки адвекции и диффузии в узлах сетки, покрывающей исследуемый район. На втором эти оценки, а также данные спутниковых наблюдений используются в качестве внешних источников влияния в специальной модели экосистемы.

В качестве концептуальной модели экосистемы выбрана простейшая

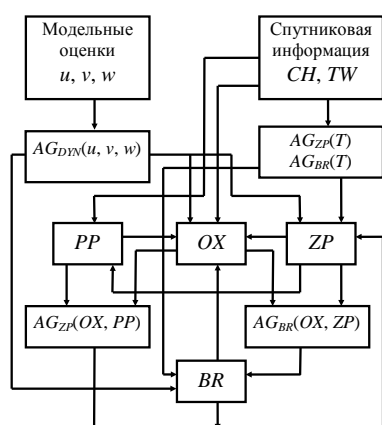


Рис. 1. Концептуальная модель экосистемы СЗШ ЧМ.

схема (рис.1) причинно-следственных связей процессов, происходящих на северо-западном шельфе Черного моря (СЗШ ЧМ), включающая концентрации фитопланктона PP , зоопланктона ZP , биоресурса BR и растворенного кислорода OX . Кроме того, в структуру модели входят агенты ресурсного лимитирования роста концентраций элементов пищевой цепи $AG_{ZP}(OX, PP)$ и $AG_{BR}(OX, ZP)$ и факторы внешнего влияния: оценки переноса и диффузии, полученные из расчетов составляющих скорости течений u, v по гидродинамической модели; данные спутниковых наблюдений концентраций хлорофилла a CH и поверхностной

температуры TW . Поэтому в модель включены агенты учета динамики концентраций кислорода $AG_{DYN}(OX)$, зоопланктона $AG_{DYN}(ZP)$ и биоресурса $AG_{DYN}(BR)$, а также агенты, учитывающие влияние сезонного хода температуры моря на концентрации зоопланктона $AG_{ZP}(TW)$ и биоресурса $AG_{BR}(TW)$.

В соответствии с концептуальной моделью (рис. 1), методом адаптивного баланса влияний (ABC -метод) [1] построена система уравнений модели экосистемы, обладающих свойством динамического приспособления к переменным внешним воздействиям:

$$\begin{aligned} \frac{dPP}{dt} &= 2PP\{5 - [PP - a_{PP/CH}CH + a_{PP/ZP}ZP]\}, \\ \frac{dOX}{dt} &= 2OX\{5 - [OX - AG_{DYN}(OX) + a_{OX/BR}BR + a_{OX/ZP}ZP - a_{OX/PP}PP + a_{OX/TW}TW]\}, \\ \frac{dZP}{dt} &= 2ZP\{5 - [ZP - AG_{DYN}(ZP) + a_{ZP/BR}BR - AG_{ZP}(OX, PP) - AG_{ZP}(TW)]\}, \\ \frac{dBR}{dt} &= 2BR\{5 - [BR - AG_{DYN}(BR) - AG_{BR}(OX, ZP) - AG_{BR}(TW)]\}, \\ AG_{ZP}(OX, PP) &= IF[M_{ZP} = a_{ZP/OX}OX; a_{ZP/OX}OX; 0] + \\ &+ IF[M_{ZP} = a_{ZP/PP}PP; a_{ZP/PP}PP; 0], \\ M_{ZP} &= \arg \min[a_{ZP/OX}OX(t); a_{ZP/PP}PP(t)], \\ AG_{BR}(OX, ZP) &= IF[M_{BR} = a_{BR/OX}OX; a_{BR/OX}OX; 0] + \\ &+ IF[M_{BR} = a_{BR/ZP}ZP; a_{BR/ZP}ZP; 0], \\ M_{BR} &= \arg \min[a_{BR/OX}OX(t); a_{BR/ZP}ZP(t)], \\ AG_{ZP}(TW) &= a_{ZP/TW} \exp[-\alpha_{ZP}(TW - TW_{ZP}^*)^2], \\ AG_{BR}(TW) &= a_{BR/TW} \exp[-\alpha_{BR}(TW - TW_{BR}^*)^2]. \end{aligned} \quad (1)$$

$$AG_{DYN}(\varphi) = a_{adv}\varphi_{adv} + a_{dif}\varphi_{dif}. \quad (2)$$

Для удобства сравнения сценариев процессов переменные модели представлены в безразмерном виде и приведены к общему интервалу изменчивости (0, 10). Важно, что адвекция и диффузия концентрации фитопланктона косвенным образом были учтены в первом уравнении системы (1), поскольку в качестве внешнего источника в нем использованы спутниковые измерения концентрации хлорофилла CH , сформированной под их влиянием. Через систему уравнений модели это влияние распространялось и на другие переменные модели. Так как оно было незначительным, то факторы адвекции и диффузии включены в остальные уравнения модели. Скорости течений, взятые из расчетов по гидродинамической модели, вносят в модель экосистемы дополнительную информацию о динамике среды, поэтому агенты управления $AG_{DYN}(\varphi)$ в системе (1) являлись дополнительными внешними источниками изменения концентраций веществ.

Применение адаптивной модели экосистемы для картирования полей СЗШ ЧМ. Рассмотренная выше адаптивная модель экосистемы была применена к расчету карт полей концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и кислорода для района СЗШ ЧМ. Для инициализации модели использованы данные литературных источников, дающие примерные

оценки средних значений концентраций.

Исходя из данных, характеризующих динамику биомасс фитопланктона и кормового зоопланктона за 1954 – 2007 гг. [2, 3], в качестве оценок средних значений приняты величины концентраций: $C_{PP} = 6 \text{ г/м}^3$ и $C_{ZP} = 0,2 \text{ г/м}^3$. Данные наблюдений о концентрации биоресурса весьма разрознены и приурочены в основном к приустьевым районам Дуная и Днепра. Для приближенной оценки величины C_{BR} были использованы наблюдения биомассы кормового зоопланктона в этих районах [3] и материалах работы [4]. В качестве оценки среднего значения концентрации биоресурса принята величина $C_{BR} = 0,1 \text{ г/м}^3$. В литературных источниках содержится большое количество наблюдений концентрации кислорода для района СЗШ ЧМ [5, 6]. Отмечено, что лето является временем наименьшего абсолютного содержания кислорода на всей акватории района и во всей толще вод, что обусловлено повышением термических условий и скоростей биохимических процессов в качестве оценки среднегодового значения концентрации кислорода принята величина $C_{Ox} = 7 \text{ мл/л}$.

Для картирования полей экосистемы СЗШ ЧМ использованы поля хлорофилла a и поверхностной температуры, построенные по данным спутниковых наблюдений за 2012 г. (рис.2, a , b), и поле горизонтальной скорости течений, построенное по данным гидродинамического моделирования [7] (рис.2, $в$), для каждого узла квадратной сетки с шагом 5 км, покрывающей этот район (4004 узлов). Расчеты полей экосистемы проведены на год (366 суток).

Вычисления переменных экосистемы проведены в два этапа. Первоначально уравнения модели (1) решались в каждом узле сеточной области без учета адвекции и диффузии, в результате чего были рассчитаны сценарии внутригодовой изменчивости всех параметров экосистемы, по которым затем построены карты пространственных распределений концентраций веществ на каждые сутки. Эти данные вместе с расчетами горизонтальных течений были использованы для получения оценок адвекции и диффузии,

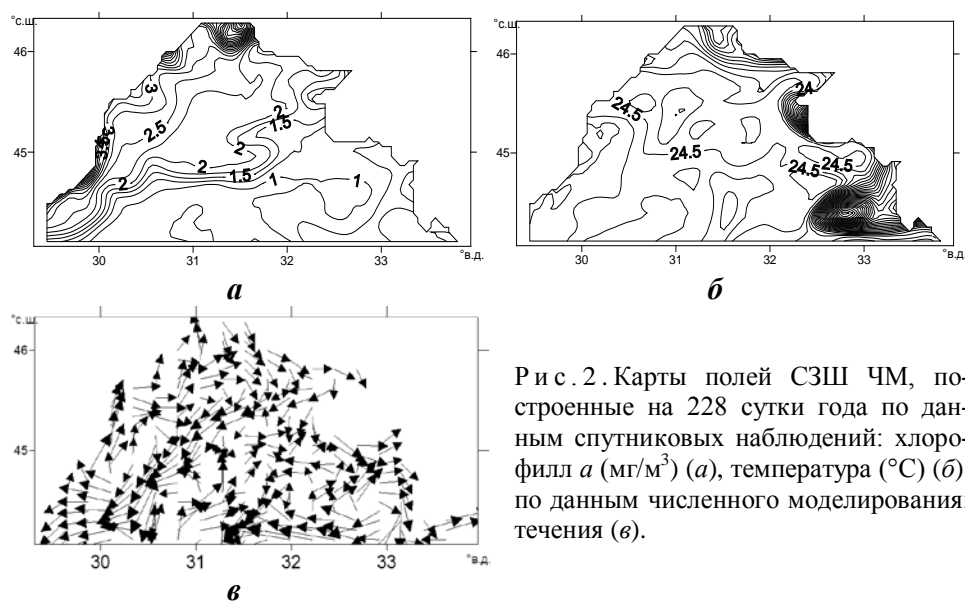


Рис. 2. Карты полей СЗШ ЧМ, построенные на 228 сутки года по данным спутниковых наблюдений: хлорофилл a (мг/м^3) (a), температура ($^{\circ}\text{C}$) (b); по данным численного моделирования: течения ($в$).

вычисленные по стандартным конечно-разностным формулам в каждом узле сеточной области на каждые сутки эксперимента.

На втором этапе с помощью модели (1) выполнена локальная адаптация переменных модели к полученным оценкам адвекции и диффузии, которые вошли в агенты управления (2) в качестве дополнительных источников внешних влияний в уравнениях модели экосистемы СЗШ ЧМ.

На рис.3, *а* приведена карта концентраций фитопланктона, построенная без учета динамики морской среды по временным сценариям, рассчитанным в узлах сеточной области, структура изолиний которой следует структуре изолиний карты концентраций хлорофилла *а* (рис.2, *а*). Карта концентраций кислорода (рис.3, *б*) демонстрирует значительное влияние на него температуры морской поверхности и концентрации фитопланктона. Карта температурного поля (рис.2, *б*), построенная по спутниковым данным, содержит заметную аномалию в районе юго-западного побережья Крыма, которая обусловлена антициклоническим круговоротом. Эта аномалия отчетливо проявилась в поле кислорода. Карты концентраций зоопланктона и биоресурса не приведены.

Карта поля концентраций фитопланктона, рассчитанная с учетом динамики морской среды, приходящаяся на середину августа (228 суток вычислений), приведена на рис.4, *а*. Это поле оказалось более изменчивым по сравнению с полем, полученным в первом эксперименте (рис.3, *а*). Локальные неоднородности поля хлорофилла *а*, существовавшие на карте его концентраций (рис.2, *а*) у северо-западного побережья акватории СЗШ ЧМ, не столь заметны на карте концентраций фитопланктона (рис.3, *а*), построенной без учета динамики вод. С учетом динамики они проявились в явном виде.

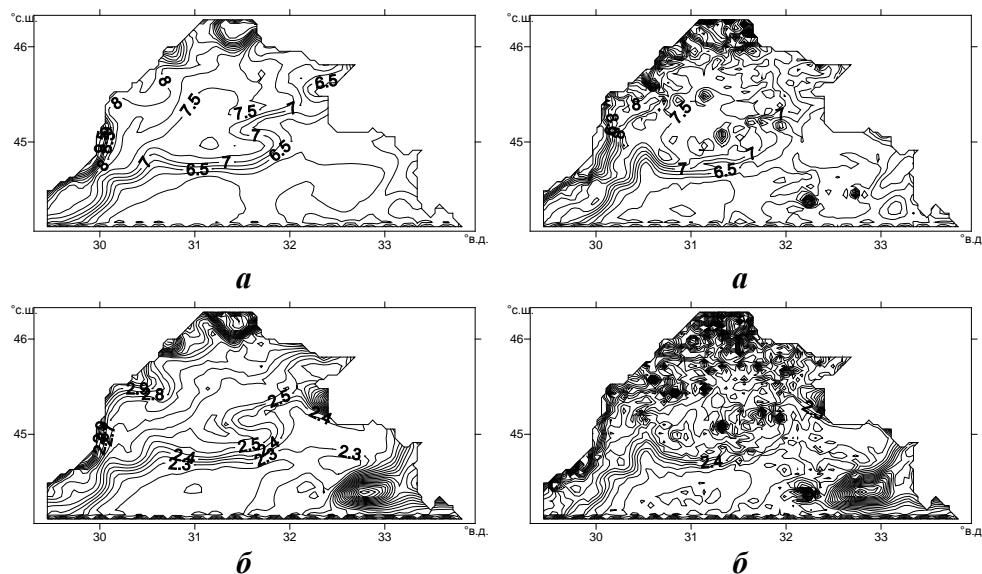


Рис.3. Карты полей экосистемы, рассчитанные без учета динамики морской среды на 228 суток вычислений: фитопланктон (б.р.ед.) (*а*), кислород (б.р.ед.) (*б*).

Рис.4. Карты полей экосистемы, рассчитанные с учетом адвекции и диффузии на 228 суток вычислений: фитопланктон (б.р.ед.) (*а*), кислород (б.р.ед.) (*б*).

Этот вывод распространяется и на другие поля экосистемы, построенные с учетом адвекции и диффузии. Об этом свидетельствуют результаты сравнения соответствующих карт концентраций кислорода (рис.3, б; 4, б), а также остальных компонент экосистемы. Таким образом, динамика морской среды существенно влияет на результаты моделирования полей экосистемы ABC-методом.

Заключение. На примере простой модели экосистемы СЗШ ЧМ проиллюстрирован двухэтапный метод построения полей экосистемы верхнего слоя моря, который позволяет выделить в отдельный этап сложные расчеты процессов переноса и диффузии веществ, выполняемые по гидродинамическим моделям, и использовать их результаты в качестве внешних влияний в адаптивной модели экосистемы. Уравнения метода адаптивного баланса влияний обеспечили подстройку полей концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и кислорода к данным спутниковых наблюдений и к оценкам адвекции и диффузии, рассчитанным по результатам численного моделирования морской среды. Показано, что учет динамики морской среды и агентов ресурсного лимитирования в адаптивной модели экосистемы позволяют детализировать карты биохимических полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
2. Nesterova D., Moncheva S., Mikaelyan A. et al The state of phytoplankton // State of the Environment of the Black Sea (2001– 2006/7).– Istanbul, Turkey, 2008.– P.173-200.
3. Shiganova T., Musaeva E., Arashkevich E. et al The state of zooplankton // State of Environment of the Black Sea (2001 – 2006/7).– Istanbul, Turkey, 2008.– P.201-246.
4. Латун В.С. Влияние рыбного промысла на устойчивость экосистемы Черного моря // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– С.331-353.
5. Емельянов В.А. Митропольский А.Ю., Наседкин Е.И. и др. Геоэкология черноморского шельфа Украины.– Киев: Академперіодика, 2004.– 296 с.
6. Орлова І.Г., Павленко М.Ю., Український В.В. та ін. Гідрологічні та гідрохімічні показники стану північно-західного шельфу Чорного моря: довідковий посібник.– Киев: КНТ, 2008.– 616 с.
7. <http://www.myocean.eu/> (дата посещения: 03.07.2013).

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.

I.P.Lazarchuk

THE USE OF ADAPTIVE ECOSYSTEM MODELS TO MAP BIOCHEMICAL FIELDS OF THE NORTH-WESTERN BLACK SEA SHELF

Applying the simple model of the northwestern Black Sea shelf ecosystem the two-step method of marine ecosystems processes modeling is illustrated. On the first step, the water dynamics is calculated using the up-to-date numerical model. On the second step, on the base of the ecosystem model the local adjustment of ecosystem variables to each other is made taking into account the available estimates of advection and diffusion of substances. In this simulation advection and diffusion calculated by the hydrodynamic model are external forces relative to the reaction in the local volume of environment.

KEY WORDS: *adaptive model, method of adaptive balance of influence, marine ecosystem*