

АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЧЕРНОМОРСКОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

*И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова,
И.П. Лазарчук, Т.А. Исаева*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: osamhi@inbox.ru

Предложена модель интегральных процессов в черноморской экосистеме, уравнения которой стабилизированы обратными связями второго порядка. Ее основу составляет модель, предложенная в работах Огуза с соавторами [1, 2]. Уравнения модели построены методом адаптивного баланса влияний и содержат лимитирующие агенты управления. Показана реакция модели на имитированный годовой ход освещенности и диффузию органического вещества.

Введение. Для описания интегральных процессов в морских экосистемах может быть использован метод адаптивного баланса влияний (АВС-метод) [3]. Метод основан на предположении о том, что любая экосистема в отсутствие внешних воздействий находится в стационарном состоянии, при котором взаимные влияния процессов (значения концентраций компонентов экосистемы) уравновешены друг другом. Внешние влияния отклоняют концентрации живых организмов и веществ в экосистеме от их равновесных значений, переводя экосистему в режим динамического баланса состояний. Удобным способом представления этой системной концепции служат уравнения АВС-метода, решения которых стабилизированы при помощи отрицательных обратных связей второго порядка. В настоящей статье показана возможность создавать адаптивные варианты морских экосистем, разработанных ранее традиционным способом без включения в правые части уравнений балансирующих переменные отрицательных обратных связей и агентов управления. В качестве примера использована модель черноморской экосистемы Огуза, Даклоу, Маланотти-Риззоли и др. [1, 2].

Адаптивный вариант интегральной модели черноморской экосистемы Огуза, Даклоу, Маланотти-Риззоли и др. [1, 2]. Предложенная авторами этих работ модель описывала реакцию гидробионтов, формирующих основную пищевую цепь в Черном море на вторжение хищников из семейства медуз. Схема причинно-следственных связей между компонентами экосистемы приведена на рис. 1.

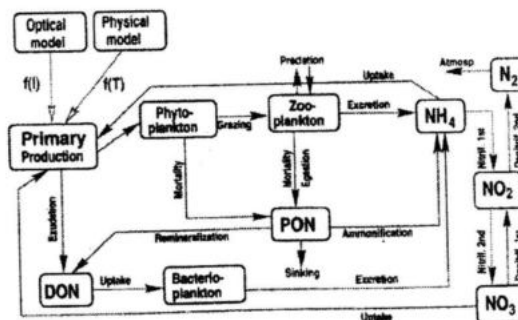


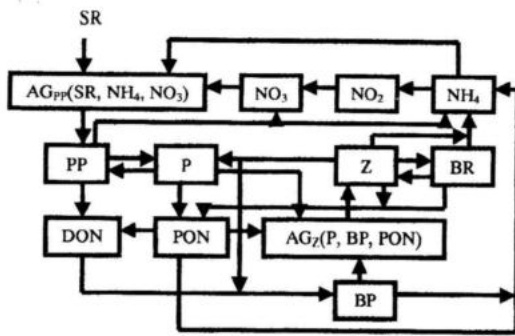
Рис. 1. Схема причинно-следственных связей между компонентами экосистемы [2]

Для построения адаптивного аналога этой модели введем следующие обозначения концентраций живых объектов и химических веществ: *PP* – первичная продукция, *P* – фитопланктон, *Z* – зоопланктон, *BR* – биоресурс, *DON* – растворенное органическое вещество (POB), *PON* – взвешенное органическое вещество, *BP* – бактериопланктон, *NH₄* – аммоний, *NO₂* – нитриты, *NO₃* – нитраты, *SR* – солнечная радиация. В структуру модели включим также два агента ресурсного лимитирования, учитывающие ограничения роста концентраций первичной продукции *PP* и зоопланктона *Z* меняющимися во времени запасами ресурсов их развития. Соответствующая концептуальная модель экосистемы показана на рис. 2.

Для построения адаптивной модели использована система стандартных уравнений АВС-метода [3]

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left[1 - 2 \left(x_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} x_j - f_i \right) \right],$$

где x_i – переменные модели; f_i – внешние влияния, $(i, j = 1, 2, \dots, n)$, $(i \neq j)$.



Р и с. 2. Концептуальная модель интегральных процессов в черноморской экосистеме

Формализованная АВС-модель экосистемы содержала следующие уравнения:

$$\frac{dPP}{dt} = PP\{1 - 2[PP - AG_{PP}(SR, NH_4, NO_3) + a_{PP/P}P - f_{PP}]\},$$

$$\frac{dP}{dt} = P\{1 - 2[P - a_{P/PP}PP + a_{P/Z}Z - f_P]\},$$

$$\frac{dDON}{dt} = DON\{1 - 2[DON - a_{DON/PP}PP + a_{DON/BP}BP - a_{DON/PON}PON - f_{DON}]\},$$

$$\frac{dPON}{dt} = PON\{1 - 2[PON - a_{PON/P}P - a_{PON/Z}Z - a_{PON/BR}BR - f_{PON}]\},$$

$$\frac{dZ}{dt} = Z\{1 - 2[Z - AG_Z(P, BP, PON) + a_{Z/BR}BR - f_Z]\},$$

$$\frac{dBR}{dt} = BR\{1 - 2[BR - a_{BR/Z}Z - f_{BR}]\},$$

$$\frac{dBP}{dt} = BP\{1 - 2[BP - a_{BP/DON}DON + a_{BP/Z}Z - f_{BP}]\},$$

$$\frac{dNH_4}{dt} = NH_4\{1 - 2[NH_4 - a_{NH_4/Z}Z - a_{NH_4/BP}BP - a_{NH_4/PON}PON - a_{NH_4/BR}BR + a_{NH_4/PP}PP - f_{NH_4}]\},$$

$$\frac{dNO_2}{dt} = NO_2\{1 - 2[NO_2 - a_{NO_2/NH_4}NH_4 - f_{NO_2}]\},$$

$$\frac{dNO_3}{dt} = NO_3\{1 - 2[NO_3 - a_{NO_3/NO_2}NO_2 - f_{NO_3}]\},$$

$$AG_{PP}(SR, NH_4, NO_3) = IF[SR = M_{PP}; a_{PP/SR}SR; 0] + IF[NH_4 = M_{PP}; a_{PP/NH_4}NH_4; 0] + IF[NO_3 = M_{PP}; a_{PP/NO_3}NO_3; 0],$$

$$M_{PP} = \min\{SR; NH_4; NO_3\},$$

$$AG_Z(P, BP, PON) = IF[P = M_Z; a_{Z/P}P; 0] + IF[BP = M_Z; a_{Z/BP}BP; 0] + IF[PON = M_Z; a_{Z/PON}PON; 0],$$

$$M_Z = \min\{P; BP; PON\}.$$

Результаты вычислительных экспериментов с адаптивной моделью.

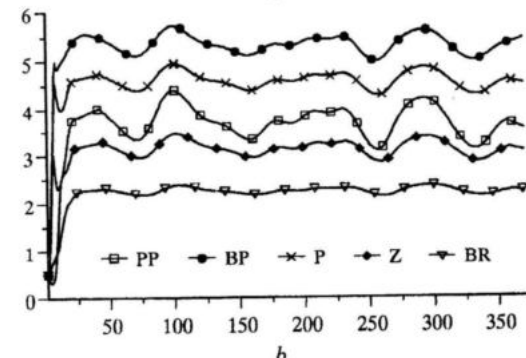
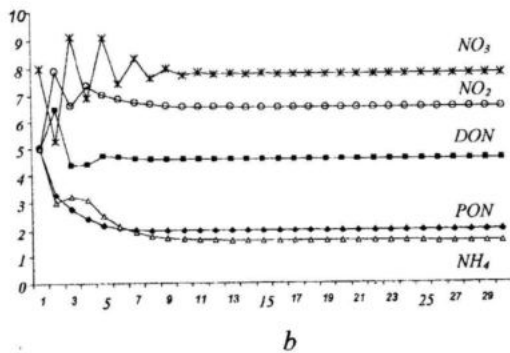
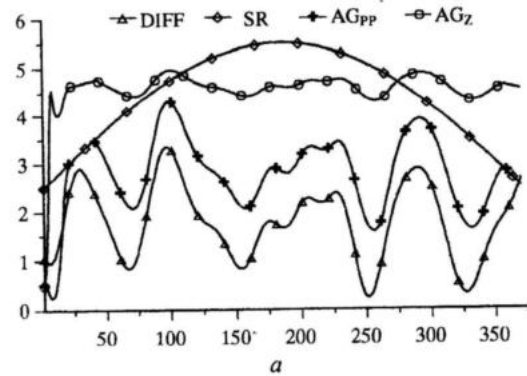
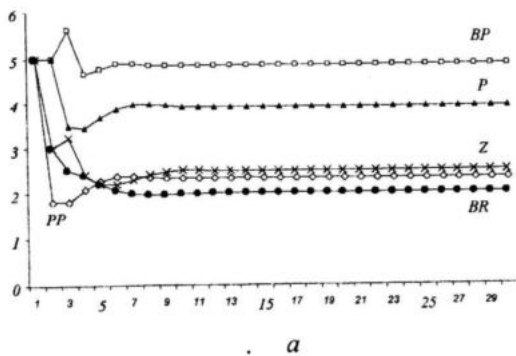
С АВС-моделью черноморской экосистемы были выполнены имитационные эксперименты для оценки чувствительности модели к внешним влияниям. В качестве внешних влияний использованы годовой ход освещенности моря SR и поступление нитратов в форме взвешенного органического вещества PON в исследуемый объем морской среды. Для проведения экспериментов все переменные модели были приведены к безразмерному виду и к общему интервалу изменчивости (0, 10). Стационарное состояние экосистемы было задано путем выбора следующих коэффициентов влияния $a_{MM/NN}$ и установочных параметров f_{MM} в уравнениях модели, приведенных в табл. 1.

Модель была реализована численно на 365 безразмерных шагов по времени (суток). Процесс перехода решений уравнений модели от произвольных начальных условий в стационарное состояние демонстрируют графики переменных модели, показанные на рис. 3. Как следует из рисунка, имела место быстрая сходимость решений к устойчивым равновесным значениям переменных, обусловленная обратными связями второго порядка в уравнениях модели экосистемы.

Для оценки реакции экосистемы на внешние воздействия в следующем эксперименте в уравнение для первичной

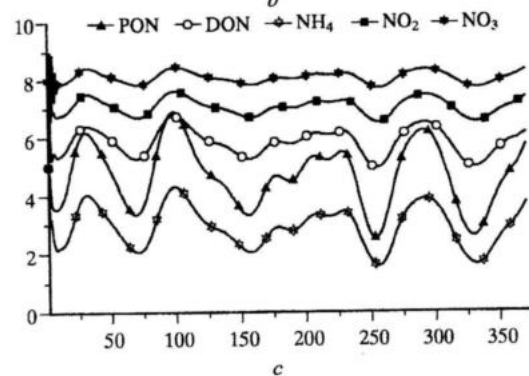
Коэффициенты влияний в модели экосистемы

$a_{MM/NN}$	PP	P	DON	PON	Z	BR	BP	NH ₄	NO ₂	NO ₃	SR
PP	1	0,5	0	0	0	0	0	0,6	0	0,6	0,6
P	0,6	1	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0
DON	0,3	0	1	0,4	0	0	0,4	0	0	0	0
PON	0	0,2	0	1	0,2	0,2	0	0	0	0	0
Z	0	1,0	0	1,0	1	0,2	1,0	0	0	0	0
BR	0	0	0	0	0,4	1	0	0	0	0	0
BP	0	0	0,4	0	0	0	1	0	0	0	0
NH ₄	0,8	0	0	0,8	0,2	0,2	0,2	1	0	0	0
NO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0,4	1	0	0
NO ₃	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0,8	1	0



Р и с. 3. Сценарии установления стационарного состояния адаптивной модели экосистемы

продукции через агент управления $AG_{pp}(SR, NH_4, NO_3)$ была добавлена функция $SR = 3 \sin 0,085\tau + 2,5$, которая имитировала годовой ход освещенности. Кроме того, было имитировано изменение концентрации взвешенного органического вещества в исследуемом объеме морской среды за счет внешнего источника (перенос, диффузия).



Р и с. 4. Сценарии процессов в адаптивной модели экосистемы, вызванные влиянием внешних воздействий

На рис. 4а представлены имитированные сценарии годского хода освещенности +SR и дополнительного источника взвешенного органического вещества +PON. Здесь же показаны сценарии агентов ресурсного лимитирования роста концентраций зоопланктона AG_z , и первичной продукции AG_{pp} ; На рис. 4b показаны изменения концентраций биоресурса BR, зоопланктона Z, первичной продукции PP, фитопланктона P и бактериопланктона BP; а на рис. 4c – изменения концентраций аммония NH_4 , взвешенного органического вещества PON, растворенного органического вещества DON, нитритов NO_2 и нитратов NO_3 .

Заключение. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что адаптивные модели морских экосистем весьма чувствительны к внешним воздействиям и демонстрируют быструю сходимость решений уравнений к состоянию баланса с внешними источниками. Как следует из рассмотрения сценариев процессов развития, изменения в состояниях морской экосистемы происходят в результате совместного действия функций внешних влияний (в нашем примере имитированных солнечной радиации и перемешивания водных масс) и агентов ресурсного лимитирования концентраций первичной продукции и зоопланктона. Адаптивная модель экосистемы устойчиво воспроизводит эти сценарии при выбранных значениях коэффициентов влияний. Таким образом, адаптивные модели экосистем весьма перспективны для использования в имитационных экспериментах по управлению морскими ресурсами.

Следует отметить, однако, что с использованием адаптивных моделей связана проблема определения коэффициентов влияний, которая может быть решена, если существуют архивные данные наблюдений об изменчивости моделируемых процессов. Эти коэффициенты могут быть определены через взаимные корреляционные функции процессов [3, 4] или через функциональные связи между процессами [5, 6]. По смыслу коэффициенты влияний представляют собой удельные скорости изменения концен-

траций компонентов экосистемы по отношению к влияющим функциям. Если аппроксимировать функциональные зависимости между переменными линейными функциями, как это имеет место в случае линейной регрессии, то коэффициенты влияний в уравнениях ABC-моделей экосистем обращаются в константы. Именно это предположение было использовано в настоящем исследовании. Применение адаптивных моделей экосистем в системах контроля окружающей среды предполагает использование данных наблюдений для нахождения коэффициентов влияний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Ducklow H.W., Murray J.W. Interdisciplinary Studies Integrating The Black Sea Biogeochemistry and Circulation Dynamics // *Oceanography*. – 2002. – 15 – №. 3. – P. 4 – 11.
2. Oguz T., Ducklow H.W., Purcell J.E., Malanotte-Rizzoli P., Modeling the response of top-down control exerted by gelatinous carnivores on the Black Sea pelagic food web // *Journal of geophysical research*. – 2001 – 106. – P. 4543 – 4564.
3. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
4. Тимченко И.И., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 520 с.
5. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М. Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 2011. – 1. – С. 48 – 66.
6. Ivavov V.A., Igumnova E.M., and Timchenko I.E. Coastal Zone Resources Management. – Kyiv: Akadempriodika, 2012. – 304 p.