

И.Е.Тимченко, Е.М.Игумнова, И.П.Лазарчук,  
С.М.Солодова

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г Севастополь*

### **ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ БАЛАНСА ВЛИЯНИЙ В АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЯХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ**

Рассмотрены адаптивные модели морских экосистем, имеющие в каждом уравнении отрицательные обратные связи первого или второго порядка между переменными и скоростями их изменения. Показано, что модели второго порядка адекватно выражают стремление живых организмов приспособиться к условиям окружающей среды, благодаря закону сохранения баланса влияний: суммарные значения переменных экосистемы и влияющих на них факторов сохраняются и равны ресурсным емкостям окружающей среды по отношению к этим переменным. Действие закона рассмотрено на примере интегральной модели морской экосистемы второго порядка, находящейся под влиянием динамики морской среды и антропогенным влиянием приморской территории. Построены сценарии экономических процессов производства и сценарии биоразнообразия морской среды, управляемые природоохранными действиями.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *баланс влияний, адаптивные модели экосистем.*

Разработка моделей морских экосистем, основанных на применении отрицательных обратных связей с производством, загрязняющим своими отходами морскую среду, является важным этапом создания информационных технологий природопользования в прибрежной зоне моря [1 – 3]. Подобные модели экосистем, называемые адаптивными, отличаются от традиционных моделей экосистем [4] структурой правых частей своих уравнений, в каждом из которых предусматривается баланс внутрисистемных и внешних влияний. Этот баланс обеспечивается отрицательными обратными связями между переменными системы и скоростями их изменения, которые автоматически подстраивают переменные экосистемы друг к другу и к внешним влияниям.

Важную роль в адаптации процессов играют ресурсные возможности морской среды, поскольку приспособление морских организмов экосистемы к условиям существования ограничено ресурсными емкостями среды (surgent capacities [5]). Это свойство экосистем в адаптивных моделях выражает закон сохранения баланса влияний, который можно сформулировать следующим образом: в процессе реакций приспособления друг другу и к внешним влияниям переменные экосистемы принимают такие значения, которые сохраняют ресурсные емкости окружающей среды по каждой переменной.

Рассмотрим уравнения адаптивной модели морской экосистемы с отрицательными обратными связями первого порядка. Она имеет вид:

$$\frac{du_i}{dt} = -r_i[u_i - (C_i + A_i)] = r_i(C_i + A_i) - r_i u_i, \quad (1)$$

где введены следующие обозначения:  $\{u_i\}$  – множество переменных, представляющих реакции в экосистеме,  $r_i$  – удельные скорости изменения переменных  $u_i$ ,  $C_i$  – средние значения переменных,  $A_i$  – алгебраические суммы внутрисистемных и внешних влияний, к которым в процессе реакций происходит адаптация переменных. Запишем одно из уравнений системы (1) в конечных разностях по схеме Эйлера:

$$u_{k+1} = u_k + r\Delta t[(C + A) - u_k] = u_k(1 - r\Delta t) + r\Delta t(C + A).$$

Анализ этого уравнения показывает, что сумма влияний  $A_i$  в уравнениях (1), не нарушает устойчивость численного решения уравнений адаптивной модели при условии, что  $r_i\Delta t < 2$ .

В адаптивных моделях, второго порядка, построенных АВС-методом [1] применяются уравнения следующего вида:

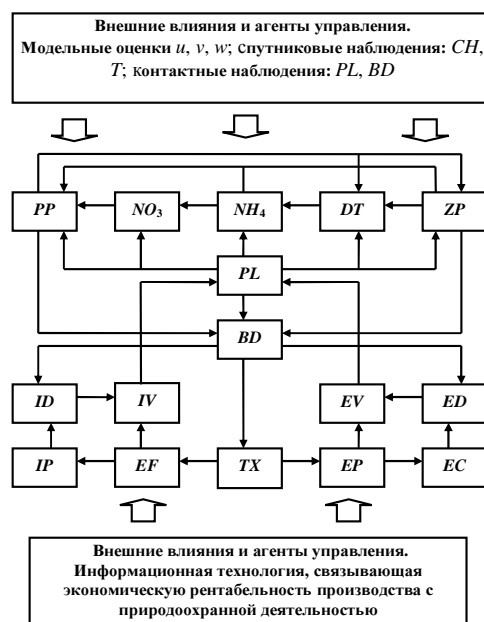
$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i [C_i - (u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j - A_i)]. \quad (2)$$

Из системы уравнений (2) следует, что в процессе адаптации выполняется закон сохранения баланса влияний:

$$u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j - A_i = C_i.$$

Действие закона сохранения баланса влияний рассмотрим на примере интегральной модели природопользования, построенной АВС-методом, которая содержит в качестве компонент процессы изменения концентраций фито- и зоопланктона, нитратов, аммония и детрита, а также обобщенные индексы экологического состояния морской среды – уровень загрязнения и уровень биоразнообразия  $BD$ . Будем считать, что социально-экономическая система приморской территории оказывает внешнее воздействие на морскую экосистему через уровень загрязнения  $PL$ , пропорциональный объему производства товаров и услуг  $IV$ , как показано на рис.1. На основе этой схемы была построена система уравнений адаптивной модели экосистемы второго порядка и проведены имитационные эксперименты по проверке действия закона сохранения баланса влияний.

Основная цель экспериментов состояла в оценке чувствительности модели по отношению к различным внешним влияниям и в возможности установить баланс между эко-



Р и с . 1 . Схема причинно-следственных связей между переменными экосистемы и влияющими на них внешними факторами.

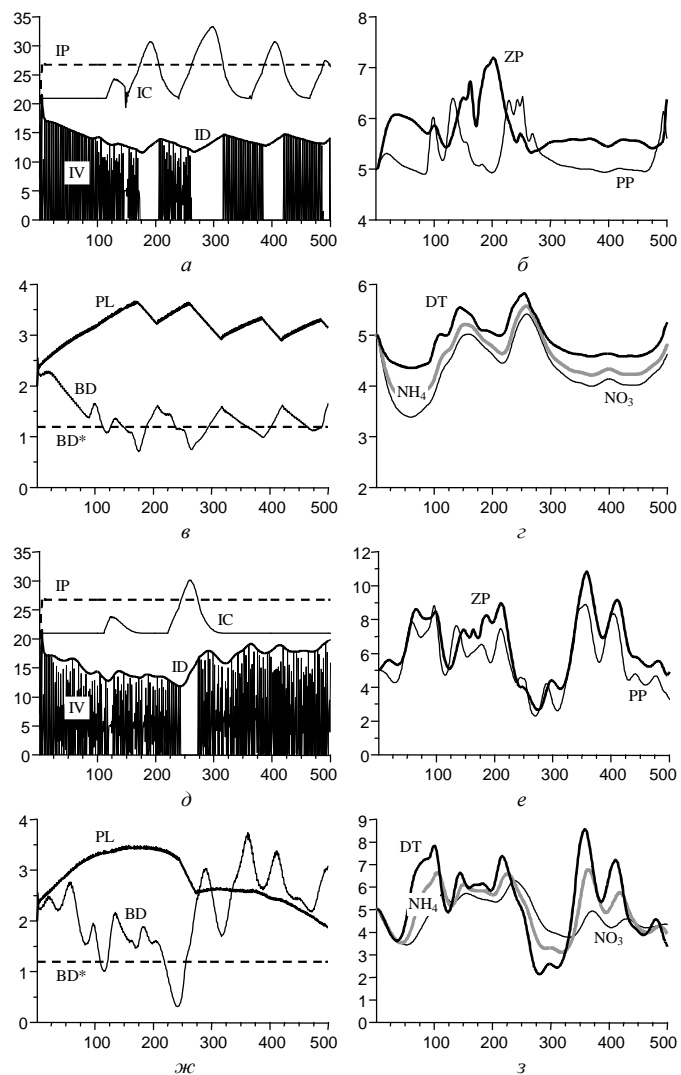


Рис. 2. Результаты адаптации процессов реакции к внешним влияниям на экосистему.

номической рентабельностью производства *EF* и допустимым понижением уровня биоразнообразия морской среды. Необходимые для этого данные были имитированы. На рис.2 показаны сценарии спроса *ID*, стоимости *IP* и себестоимости *IC* продукции при различных вариантах внешних влияний на систему: с учетом и без учета динамики морской среды, в условиях штрафов за загрязнение и при оплате производством расходов на поддержание уровня биоразнообразия.

Так, например, на рис.2, *a* размер экологического штрафа *TX* был выбран таким, чтобы себестоимость производства *IC* становилась выше рыночной стоимости продукции *IP*, как только уровень биоразнообразия *BD* станет ниже предельно допустимого значения *BD\**. В этом случае производство было вынуждено прекращать выпуск продукции *IV*. В эксперименте на рис.2, *д* – *з*

были включены одновременно оба основных фактора внешнего воздействия на экосистему – влияние динамики морской среды и влияние ее загрязнения производством. Кроме того, производство должно было выделять часть своей прибыли на снижение выбросов загрязняющих веществ в море.

По итогам экспериментов был сделан вывод о том, что адаптивные модели второго порядка, построенные методом адаптивного баланса влияний, имеют существенное преимущество перед моделями первого порядка, так как в них действует закон сохранения баланса влияний, который позволяет управлять динамикой производственных процессов, не нарушая допустимые границы изменения уровня биоразнообразия морской среды.

#### 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. *Еремеев В.Н., Тимченко И.Е., Васечкина Е.Ф., Игумнова Е.М., Латун В.С., Ярин В.Д.* Системное моделирование морских эколого-экономических процессов.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.– 428 с.
3. *Ivavov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E.* Coastal Zone Resources Management.– Kyiv: Akadempriodika, 2012.– 304 p.
4. *Fasham J.R., Ducklow H.W., McKelvie S.M.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer // *J. Mar. Res.*– 1990.– 48.– P.591-639.
5. *Murray J.D.* Mathematical Biology. II: Spatial Models and Biomedical Applications.– Springer, 2008.– 736 p.

Материал поступил в редакцию 06.06.2013 г.

**АНОТАЦІЯ** Розглянуті адаптивні моделі морських екосистем, які мають у кожному рівнянні негативні зворотні зв'язки першого або другого порядку між змінними та швидкостями їх зміни. Показано, що моделі другого порядку адекватно відображають прагнення живих організмів пристосуватися до умов навколишнього середовища, завдяки закону збереження балансу впливів: сумарні значення змінних екосистеми та факторів, які на них впливають, зберігаються і дорівнюють ресурсним ємкостям навколишнього середовища по відношенню до цих змінних. Дія закону розглянута на прикладі інтегральної моделі морської екосистеми другого порядку, що знаходиться під впливом динаміки морського середовища та антропогенним впливом приморської території. Побудовані сценарії економічних процесів виробництва та сценарії біорізноманіття морського середовища, що керуються природоохоронними діями.

**ABSTRACT** The adaptive models of marine ecosystems considered with negative feedbacks of first or second order between the variables and their rates of change in each equation. It is shown that the second-order model adequately express the desire of living organisms to adapt to environmental conditions, thanks to the balance of causes conservation law: the sum of values of ecosystem variables and the factors influencing them are equal the current capacities of the environment with respect to these variables. The law considered by the example of the integrated model of the second order marine ecosystem, which is influenced by the dynamics of marine environment and human impact in the coastal area. Scenarios of economic production and marine biodiversity processes were constructed, controlled by environment protection actions.