

И.Е.Тимченко, Е.М.Игумнова

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКОНОМИКА ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЯ**

Концепции экологической экономики применены к проблеме управления ресурсами прибрежной зоны моря для целей устойчивого развития. Показано, что адаптивные модели эколого-экономических систем этой зоны могут служить в качестве инструментов имитационного моделирования сценариев рационального природопользования, когда поддерживается баланс рентабельности производства и экологического состояния природной среды. На примере адаптивной модели системы «берег – море» рассмотрены эколого-экономические аспекты перевода производства на ресурсосберегающие технологии. Сделан вывод о полезности адаптивных моделей для управления развитием прибрежной зоны моря в соответствии с принципами экологической экономики.

**Ключевые слова:** *эколого-экономические системы, адаптивный баланс влияний*

Экологическая экономика исходит из системных концепций целостности природы и общества в вопросах рационального природопользования и постулирует конечный объем природных ресурсов, которые способны предоставить людям природные экосистемы. С позиций экологической экономики прибрежные зоны моря (ПЗМ) представляют собой органичное соединение двух природных систем: экономической системы приморской территории – «берег» и экологической системы прибрежной части моря – «море». Для устойчивого развития ПЗМ критически важно иметь прогностические сценарии последствий любых решений в области природопользования. В данном исследовании рассмотрены перспективы применения метода адаптивного баланса влияний [1] для создания моделей эколого-экономических систем ПЗМ, обеспечивающих информационную поддержку управления ресурсами развития.

**Принципы экологической экономики и устойчивое развитие прибрежной зоны моря.** Традиционная экономика утверждает, что устойчивый экономический рост в условиях рыночных отношений должен привести к ликвидации бедности и обеспечить всеобщую занятость, а научно-технический прогресс способен преодолеть проблему истощения не возобновляемых природных ресурсов и вовремя найти им замену. Однако ведущие экологи-экономисты Н.Daly, J.Farley, A.Voinov и др. [3, 4] признают необходимость перехода от стихийного рыночного доступа к ресурсам к управляемому и рациональному балансу их потребления и воспроизводства. Принципы экологической экономики иллюстрирует диаграмма, приведенная на рис.1.

Исходя из этих принципов, экологическая экономика предлагает разумное сдерживание экономического роста и призывает к сокращению объемов потребления невозобновляемых ресурсов. Благодаря фундаментальной концепции адаптации к условиям окружающей среды процессы в системе «при-



Р и с . 1 . Становление принципов экологической экономики.

рода – общество» стремятся к динамическому равновесию друг с другом, при котором обеспечивается их устойчивое развитие. Этим объясняется перспектива создания адаптивных моделей рационального управления балансом природопользования.

**Адаптивные модели эколого-экономических систем прибрежной зоны моря.** Адаптивная модель представляет собой множество взаимосвязанных процессов  $\{u_i\}$ , удовлетворяющих условию динамического баланса внутрисистемных и внешних влияний [1]. Любые взаимодействия процессов, результатом которых являются изменения значений переменных  $u_i$  в модели системы, можно рассматривать как реакции, в ходе которых из ресурсов окружающей среды, получаются продукты  $u_j$  – моделируемые субстанции системы. В силу ограниченности ресурсов объемы продуктов не могут превышать «ресурсные емкости» окружающей среды, которые мы обозначим  $2C_i$ . Поэтому переменные адаптивной модели  $u_i$  имеют интервалы изменчивости  $(0, 2C_i)$ , а их средние значения равны  $C_i$ .

Представим реакции в системе «берег – море» в виде преобразований ресурсов  $u_j$  в продукты  $u_i$  в присутствии внешних влияний  $A_i$

$$u_i = \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j + A_i + C_i, \quad (1)$$

где  $a_{ij}$  – коэффициенты внутрисистемных влияний. Эти преобразования выражают собой балансы массы веществ, участвующих в реакциях. Система модульных уравнений ABC-метода построена таким образом, чтобы балансовые соотношения (1) выполнялись одновременно для всех переменных модели  $u_i$  [1, 2]:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left[ C_i - \left( u_i - \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} a_{ij} u_j - A_i \right) \right], \quad (2)$$

где  $r_i$  – удельные скорости изменения функций  $u_i$ .

Из системы уравнений (2) следует, что ее стационарное решение удовлетворяет условию сохранения баланса влияний (1): внешние воздействия отклоняют величины  $u_i$  от их стационарных значений  $C_i$ , образуя новые устойчивые состояния динамического баланса влияний.

Общие уравнения *ABC*-метода (2) дополнены логическими условиями (агентами управления), которые учитывали ресурсные ограничения прохождения реакций и предотвращали выход решений уравнений за пределы заданных интервалов изменчивости эколого-экономических процессов

$$u_i = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)]. \quad (3)$$

Коэффициенты влияний  $a_{ij}$  показывали, какое количество ресурса  $u_j$  необходимо для приращения количества продукта  $u_i$  на единицу и в общем случае представляли собой производные  $a_{ij} = \partial u_i / \partial u_j$ .

Вычислительный алгоритм решения системы уравнений (2) был реализован по схеме Эйлера. Так, например, при дополнительном условии  $2C_i r_i \Delta t = 1$ , где  $\Delta t$  – шаг вычислений по времени, конечно-разностный вариант уравнений (2) принял вид

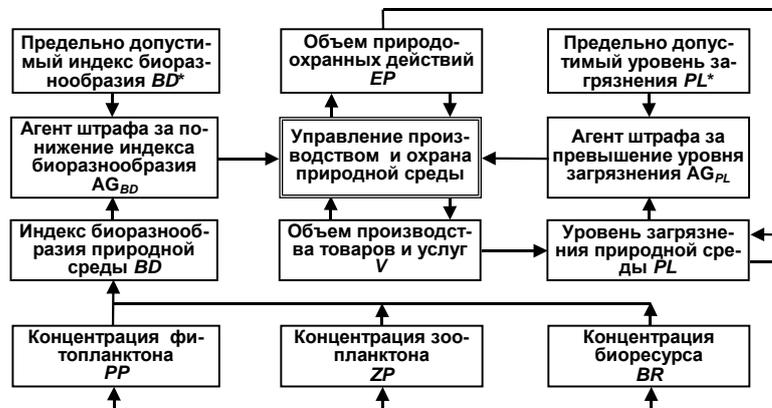
$$u_i^{k+1} = 2u_i^k [1 - 0,1(u_i^k - \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} a_{ij} u_j^k - A_i^k)]. \quad (4)$$

Уравнения (4) представляют сценарии процессов  $u_i$  на интервале безразмерных значений (0, 10). Для возврата к размерным значениям достаточно умножить решения этих уравнений на  $0,2 C_i$ .

**Адаптивная модель эколого-экономической системы «берег – море».** В ряде работ метод адаптивного баланса влияний (*ABC*-метод) был применен в задаче управления интегральными эколого-экономическими процессами с помощью построенных этим методом имитационных моделей [5 – 7]. Цель настоящего исследования заключалась в том, чтобы связать объемы производства эколого-экономической системы «берег – море» с уровнем загрязнения и индексом биоразнообразия морской среды. Система «берег – море» имела концептуальную модель, которая изображена на рис.2, а ее подсистема «море» имела структуру, приведенную на рис.3.

Развитие процессов в объединенной модели «берег – море» происходило следующим образом. Объем производства  $V$  вызывал загрязнение морской среды  $PL$ , которое уменьшало концентрации фитопланктона  $PP$ , зоопланктона  $ZP$  и биоресурса  $BR$ , формирующих величину индекса биоразнообразия  $BD$ . Управление балансом природопользования было основано на слежении за уровнем загрязнения  $PL$  и индексом биоразнообразия  $BD$  морской среды, для чего в модели были использованы их предельно допустимые значения  $PL^*$  и  $BD^*$ . Слежение за уровнем загрязнения осуществлял агент управления  $AG_{PL}$ , а слежение за индексом биоразнообразия – агент  $AG_{BD}$ . Эти агенты влияли на себестоимость производства через природоохранный налог, пропорциональный уровню  $PL$ , и через штрафы за превышение предельно допустимого уровня  $PL^*$ . Кроме того, был введен штраф за понижение индекса биоразнообразия  $BD$  ниже предельно допустимого значения  $BD^*$ . Благодаря штрафным санкциям формировался фонд природоохранных действий, который понижал уровень загрязнения и повышал индекс биоразнообразия морской среды. Таким образом, была замкнута цепь стабилизирующей обратной связи, которая поддерживала на требуемом уровне эколого-экономический баланс природопользования.

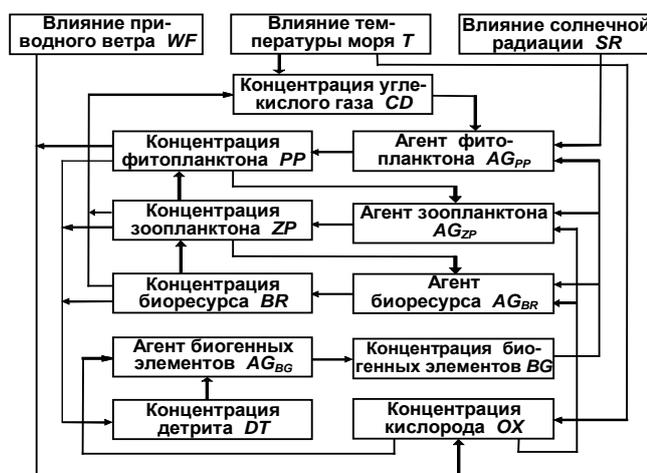
В модели экологической подсистемы «море» состояние пищевой цепи характеризовалось значениями концентраций фитопланктона  $PP$ , зоопланк-



Р и с . 2 . Управление рентабельностью производства и качеством морской среды в модели эколого-экономической системы «берег – море».

тона  $ZP$  и биоресурса  $BR$ , которые зависели от концентраций кислорода  $OX$ , углекислого газа  $CD$  и биогенных элементов  $BG$ . Для замыкания цепочки биохимических реакций в морской среде в модель был включен процесс образования детрита  $DT$  и трансформации его в биогенные вещества  $BG$ . Важными элементами этой модели являлись 4 агента ресурсного лимитирования роста концентраций веществ в морской среде.

Процессы в морской экосистеме находились в состоянии динамического баланса с внешними влияниями, приложенными к экосистеме. Атмосферное воздействие было представлено интенсивностью солнечного излучения  $SR$ , температурой верхнего слоя моря  $T$  и модулем скорости ветра  $WF$ . Считалось, что годовой ход температуры, средней по моделируемому объему морской среды, оказывает влияние на концентрацию фитопланктона, а также на концентрации кислорода и углекислого газа, которые уменьшаются с увеличением температуры. Было принято также, что с увеличением ветрового перемешивания верхнего слоя моря в нем возрастает концентрация кислорода.



Р и с . 3 . Концептуальная модель экологической подсистемы «море».

В зависимости от уровня рентабельности оценивалась возможность удовлетворения спроса на продукцию системы «берег – море» и определялось задание на выпуск объема продукции, обеспеченного имеющимися производственными ресурсами. Для экономической части системы «берег – море» использована модульная адаптивная модель *ABC AGENT* [1, 2, 6].

**Уравнения адаптивной модели экологической подсистемы «море».** Для построения формальной модели подсистемы «море» воспользуемся обозначениями переменных экосистемы и схемой причинно-следственных связей рис.2, применяя уравнения метода адаптивного баланса влияний (2):

$$\begin{aligned} \frac{dPP}{dt} &= 2r_{PP}PP\{C_{PP} - [PP + a_{PP/ZP}ZP - AG_{PP}(BG, SR, CD) - a_{PP/T}T - a_{PP/WF}WF + \\ &+ a_{PP/PL}PL]\}, \\ \frac{dZP}{dt} &= 2r_{ZP}ZP\{C_{ZP} - [ZP + a_{ZP/BR}BR - AG_{ZP}(OX, PP, BG) + a_{ZP/PL}PL]\}, \\ \frac{dBR}{dt} &= 2r_{BR}BR\{C_{BR} - [BR - AG_{BR}(OX, ZP, BG) + a_{BR/PL}PL]\}, \quad (5) \\ \frac{dOX}{dt} &= 2r_{OX}OX\{C_{OX} - [OX + a_{OX/BR}BR + a_{OX/ZP}ZP - a_{OX/PP}PP + a_{OX/BG}BG + \\ &+ a_{OX/T}T - F_{OX}(WF)]\}, \\ \frac{dCD}{dt} &= 2r_{CD}CD\{C_{CD} - [CD - a_{CD/BR}BR - a_{CD/ZP}ZP + a_{CD/PP}PP + a_{CD/T}T]\}, \\ \frac{dBG}{dt} &= 2r_{BG}BG\{C_{BG} - [BG - AG_{BG}(OX, DT) + a_{BG/PP}PP + a_{BG/ZP}ZP + a_{BG/BR}BR]\}, \\ \frac{dDT}{dt} &= 2r_{DT}DT\{C_{DT} - [DT - a_{DT/BR}BR - a_{DT/ZP}ZP - a_{DT/PP}PP + a_{DT/BG}BG + \\ &+ a_{DT/OX}OX]\}. \end{aligned}$$

Для агентов ресурсного лимитирования  $AG_{PP}$ ,  $AG_{ZP}$ ,  $AG_{BR}$  и  $AG_{BG}$  были использованы следующие выражения:

$$\begin{aligned} AG_{PP}(BG, SR, CD) &= IF[M_{PP}(t) = a_{PP/BG}BG(t); a_{PP/BG}BG(t); 0] + \\ &+ IF[M_{PP}(t) = a_{PP/SR}SR(t); a_{PP/SR}SR(t); 0] + \\ &+ IF[M_{PP}(t) = a_{PP/CD}CD(t); a_{PP/CD}CD(t); 0], \quad (6) \end{aligned}$$

где  $M_{PP}(t) = \arg \min[a_{PP/BG}BG(t); a_{PP/SR}SR(t); a_{PP/CD}CD(t)]$ .

**Уравнения экономических процессов системы «берег – море».** При непрерывной поставке и реализации продукции балансовое уравнение для готовой продукции  $H$  можно представить модульным уравнением *ABC*-метода и агентом управления, ограничивающим количество продукции емкостью склада [1]:

$$\frac{dH}{dt} = 2r_H H[C_H - (H - V + S)], \quad (7)$$

$$V - S = IF\{V - S < 0; 0; IF[V - S > 2C_H; 2C_H; V - S]\},$$

где  $V$  – поступление готовой продукции на склад производства,  $S$  – ее реализация,  $r_H$  – отношение удельной скорости изменения  $H$  к величине  $H$ , а величина  $2C_H$  играет роль ресурсной емкости склада. Аналогичным образом были представлены другие уравнения экономической подсистемы:

– уравнения динамики ресурсов  $H_{li}$ :

$$\frac{dH_{li}}{dt} = 2r_{H_{li}} H_{li} [C_{H_{li}} - (H_{li} - V_{li} + S_{li})] \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (8)$$

– уравнение динамики оборотных средств производства  $H_2$ :

$$\frac{dH_2}{dt} = 2r_{H_2} H_2 [C_{H_2} - (H_2 - I - H_3 + S_2 + S_3)], \quad (9)$$

– уравнение динамики инвестиций (кредитования) производства  $H_3$ :

$$\frac{dH_3}{dt} = 2r_{H_3} H_3 [C_{H_3} - (H_3 - V_3 + S_3)]. \quad (10)$$

В уравнении (9) через  $I$  обозначена текущая прибыль экономической системы «берег – море».

Для того чтобы контролировать рентабельность производства, был использован логарифм отношения накопленных доходов  $I_{acc}$ , к накопленным расходам  $E_{acc}$ :

$$EF = \ln \frac{1 + I_{acc}}{e + E_{acc}}, \quad I_{acc} = \int_0^t PS(t) dt, \quad E_{acc} = \int_0^t EV(t) dt. \quad (11)$$

**Управление сценариями рентабельности производства и качества морской среды в модели системы «берег – море».** Концентрация загрязнений в морской среде  $PL$  увеличивалась пропорционально накопленным объемам реализации продукции  $S_{acc}$  и уменьшалась путем естественного самоочищения с некоторым коэффициентом  $\varepsilon$ , а также за счет фонда природоохранных действий  $EP$ . Модульное уравнение для концентрации  $PL$  имело следующий вид:

$$\frac{dPL}{dt} = 2r_{pl} PL [C_{ZP} - (PL + a_{PL/EP} EP + \varepsilon PL - a_{PL/S} S_{acc})]. \quad (12)$$

Объем фонда природоохранных действий  $EP$  формировался путем накопления отчислений  $TX$  из прибыли экономической подсистемы, причем размер экологического штрафа контролировал агент управления  $AG_{TX}(PL, PL^*)$ :

$$\frac{dEP}{dt} = 2r_{EP} EP [C_{EP} - (EP - a_{EP/TX} TX_{acc} + F_{EP})], \quad (13)$$

$$\frac{dTX}{dt} = 2r_{TX} TX \{C_{TX} - [TX - a_{TX/PL} PL - AG_{TX}(PL, PL^*)]\}, \quad (14)$$

где  $AG_{TX}(PL, PL^*) = ЕСЛИ\{PL < PL^*; 0; a_{TX} [1 - \exp(b_{TX} \tau)]\}$ .

Индекс биоразнообразия  $BD$  определяется концентрациями основных групп гидробионтов: фитопланктона  $PP$ , зоопланктона  $ZP$  и биоресурса  $BR$ , которые существенно зависели от уровня загрязнения морской среды:

$$\frac{dBD}{dt} = 2r_{BD} BD [C_{BD} - (BD - a_{BD/PP} PP - a_{BD/ZP} ZP - a_{BD/BR} BR)]. \quad (15)$$

Управление системой «берег – море» осуществлялось через зависимость себестоимости производства от уровня загрязнения  $TX$  и от индекса биоразнообразия  $BD$  морской среды:

$$\frac{dE}{dt} = 2r_E E \{ C_E - [E - \sum_{i=1}^3 \rho_i q_i - a_{E/TX} TX - AG_{BD}(BD, BD^*)] \}, \quad (16)$$

где  $AG_{BD}(BD, BD^*) = ECLI\{BD > BD^*; 0; a_{BD}[1 - \exp(b_{BD}\tau)]\}$ . Увеличение санкций за загрязнение и уменьшение индекса биоразнообразия увеличивало себестоимость и понижало рентабельность производства.

**Эколого-экономические аспекты перевода производства на ресурсосберегающие технологии.** Для перевода производства на экологически чистые технологии в фонд природоохранной деятельности  $EP$  регулярно отчислялась некоторая часть оборотных средств производства (например,  $0,001H_2$ ). Величина фонда вычислялась по уравнению следующего вида:

$$\frac{dEP}{dt} = 2r_{EP} EP \{ C_{EP} - [EP - (a_{EP/TX} TX + a_{EP/H_2} H_2)_{acc}] \}. \quad (17)$$

Сценарии эколого-экономических процессов в системе «берег – море», полученные при имитации перевода производства на экологически чистые технологии, приведены на рис.4 и 5. Как следует из рис.4, *ж*, в начальный период времени эксперимента (до 90-го шага по времени) происходил рост концентрации загрязнений и увеличивалась себестоимость производства (рис.4, *а*) за счет экономических санкций (рис.4, *д*). Средства на внедрение новых технологий в этот период времени еще не было достаточно (рис.4, *в*). Поэтому после 90-го шага произошла остановка производства (рис.4, *а*). Однако с этого времени средства, накопленные в фонде природоохранных действий, начали превышать суммарный объем экономических санкций, так как слагаемое  $a_{EP/H_2} H_2$  в уравнении (17) имело тенденцию устойчивого роста, а слагаемое  $a_{EP/TX} TX$  быстро убывало, следуя кривой уровня загрязнения. Как результат, накопленные средства фонда природоохранных действий демонстрировали резкий рост (рис.4, *в*).

Увеличение средств фонда считалось эквивалентным переводу производства на экологически чистые технологии. Показательным является график суммарной рентабельности производства (рис.4, *е*). В начальный период времени, до перехода к новым технологиям, наблюдалось падение рентабельности. Однако после 90-го шага вычислений по времени график суммарной рентабельности сначала замедлил падение, а затем приобрел тенденцию роста. Эффективность перевода производства на экологически чистые технологии становится очевидной, если сравнить между собой графики накопленных доходов и накопленных расходов (рис.4, *з*). К концу эксперимента накопленные расходы оказались равными  $E_{acc} = 414 \cdot 10^3$  у.е., а накопленные доходы оказались существенно выше:  $I_{acc} = 1,25 \cdot 10^6$  у.е.

Таким образом, проведенный имитационный эксперимент позволил количественно оценить экономическую выгоду от перевода производства на экологически чистые технологии. Наряду с ростом накопленных доходов резко уменьшился уровень загрязнения (рис.4, *ж*), который к концу эксперимента упал до нуля. Одновременно существенно улучшилось экологичес-

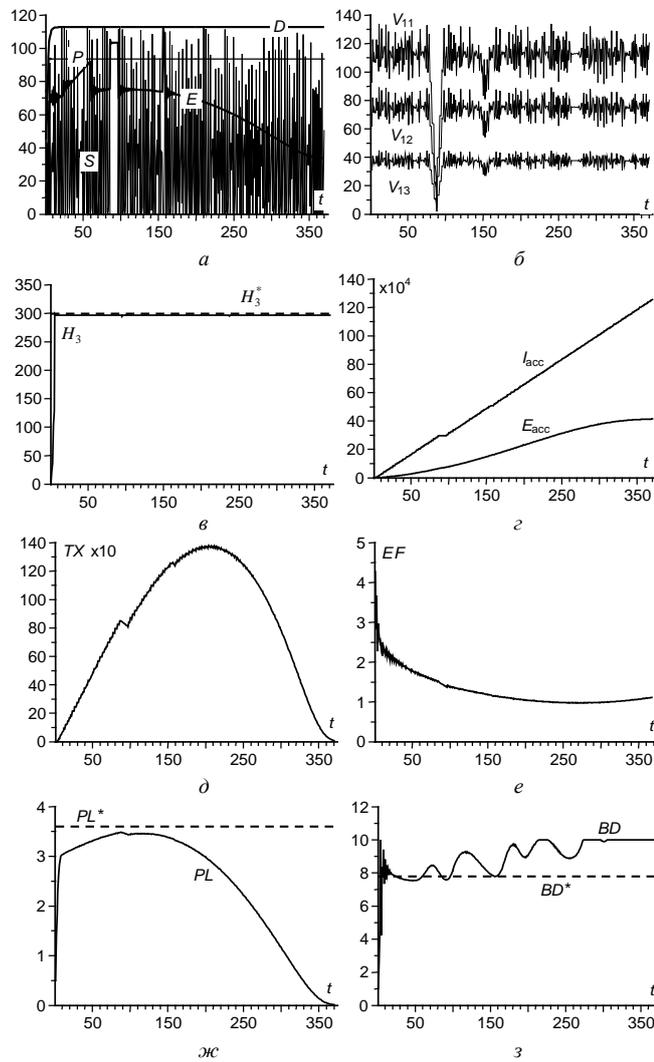


Рис. 4. Сценарии эколого-экономических процессов в системе «берег – море» при переводе производства на экологически чистые технологии.

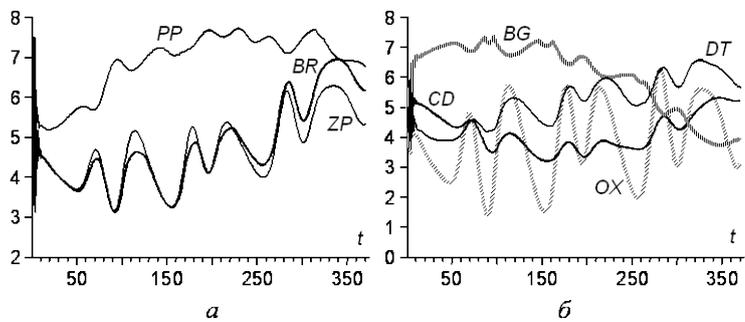


Рис. 5. Сценарии экологических процессов в морской среде при переходе на экологически чистые технологии производства.

кое состояние морской среды. Об этом свидетельствуют сценарии процессов в морской экосистеме, показанные на рис.5. Применение в модели агентов управления – логических операторов позволило контролировать условия баланса экономических и экологических переменных, а результаты имитационных экспериментов подтвердили возможность находить такие размеры экономических санкций за загрязнение окружающей среды, которые обеспечивают рациональный баланс природопользования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития.– Севастополь, 2000.– 225 с.
2. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.* Моделирование процессов устойчивого развития территорий.– Симферополь.: Изд. ТНУ, 2005.– 132 с.
3. *Daly H., Farley J.* Ecological economics: principles and applications. 2nd edition.– Washington: Island Press, 2010.– 544 p.
4. *Voinov A.* System's science and modeling for ecological economics.– Academic Press, 2008.– 430 p.
5. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Набойкин В.Ю., Набойкина А.В., Тимченко И.И.* Экологическая экономика рационального природопользования // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь, 2012.– вып.17.– С.157-161.
6. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.* Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря // Морской гидрофизический журнал.– 2011.– № 1.– С. 48-66.
7. *Ivanov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E.* Coastal zone resources management.– Kyiv: Akadempriodika, 2012.– 304 p.

Материал поступил в редакцию 08.12.2015 г.

I.E.Timchenko, E.M.Igumnova

#### COASTAL ZONE ECOLOGICAL ECONOMICS

Concepts of ecological economics are applied to the problem of coastal resources management aimed on this zone sustainable development. It is shown that adaptive models of ecological-economic systems can serve as a tool for simulation of such management scenarios, which balancing economic efficiency of natural resources use and environmental protection activities. An adaptive system “shore – sea” is considered as an example to study ecological-economic aspect of the transfer of production at new technologies protecting environment from pollution. The conclusion about the usefulness of adaptive models to control coastal zone development is made in accordance with the principles of ecological economics.

KEYWORDS: ecological-economic systems, adaptive balance of causes