

Управление интегральными эколого-экономическими процессами в системе «Берег – море»

© 2015 И.Е. Тимченко, И.К. Иващенко, Е.М. Игумнова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Поступила в редакцию 11.11.2014 г. После доработки 12.01.2015 г.

Предложена модель эколого-экономической системы, связывающая объем производства подсистемы «Берег» с уровнем загрязнения морской среды, контролируемым подсистемой «Море». Модель построена методом адаптивного баланса влияний и содержит агенты управления, которые позволяют устанавливать размеры экономических санкций, налагаемых на производство за ухудшение экологического состояния морской среды. Приведены примеры сценариев, имитирующих условия баланса экономической выгоды от выпуска продукции и необходимых затрат для защиты морской среды от загрязнения. Делается вывод о том, что адаптивные модели причинно-следственных зависимостей между интегральными экономическими и экологическими процессами в прибрежной зоне моря позволяют находить условия, которые обеспечивают рациональный баланс природопользования.

Ключевые слова: эколого-экономическая модель, адаптивный баланс влияний.

Введение. Одной из наиболее важных проблем природопользования в прибрежной зоне моря является устойчивое развитие природно-хозяйственного комплекса «Берег – море». Основным критерием управления развитием комплекса является динамический баланс между экономической целесообразностью потребления природных ресурсов и экологической оправданностью вмешательства в естественное состояние природной среды. Управление ресурсами развития прибрежной зоны заключается в согласовании целей производителей товаров и услуг, стремящихся к максимальной выгоде, и населения зоны, заинтересованного в уменьшении уровня загрязнения прибрежной морской среды и сохранении ее биоразнообразия [1, 2].

Для решения этой проблемы необходимы информационные технологии управления сценариями потребления природных ресурсов и основанные на них методы контроля за экологическим состоянием природной среды. Подобные сценарии можно имитировать с использованием компьютерной модели эколого-экономической системы прибрежной зоны. Это даст возможность прогнозировать такие сценарии природопользования, при которых обеспечиваются как экономическая рентабельность производства товаров и услуг, так и необходимый объем природоохранных мероприятий, компенсирующих загрязнение прибрежной морской среды отходами производства и бытовыми отходами, поступающими в море.

В мировой научной литературе ведутся интенсивные исследования в области экологической экономики. В работах [3, 4] и многих других предприняты попытки сформулировать принципы рационального природопользова-

ния. Наряду с содержательными математическими моделями морских экосистем [5] и экономических систем производства [6], моделирование объединенных эколого-экономических систем развивается в основном по пути формализации причинно-следственных связей методом системной динамики [7, 8]. В силу сложности объединения экологической и экономической подсистем в общую модель моделирование эколого-экономических систем прибрежной зоны моря находится на начальном этапе поиска путей построения моделей.

В ряде исследований по этой проблеме, проводимых в Морском гидрофизическом институте РАН, были предложены адаптивные модели эколого-экономических систем прибрежной зоны моря [9], основанные на системном принципе адаптивного баланса влияний [10]. В адаптивных моделях используются модульная структура и обратные связи, позволяющие управлять сценариями процессов развития. Это дает возможность повысить устойчивость управления ввиду использования в моделях нелинейных агентов управления.

В настоящей работе рассматривается задача управления интегральными эколого-экономическими процессами в прибрежной зоне моря, которые развиваются в модели обобщенной системы «Берег – море». Цель работы заключается в том, чтобы связать в рамках общей системы управления объемы производства экономической подсистемы «Берег» с уровнем загрязнения морской среды, контролируемым подсистемой «Море». Поэтому обе подсистемы рассматриваются в максимально упрощенной форме, когда расположенное на берегу производство характеризуется объемом выпуска некоторого обобщенного продукта, а загрязнение морской среды – некоторым обобщенным индексом уровня загрязнения.

Основные структурные элементы модели системы «Берег – море». В соответствии с принципами системного подхода [10] построение модели эколого-экономической системы прибрежной зоны должно начинаться с определения тех процессов, которые соответствуют сформулированной цели моделирования. В нашем случае это прогнозирование сценариев взаимосвязанных экономических и экологических процессов, на основе которых можно судить об экономической рентабельности производства и экологическом состоянии морской среды. Кроме того, обязательным условием является наличие в модели блока управления сценариями, позволяющего путем имитационных экспериментов находить рациональный режим функционирования системы прибрежной зоны, когда экономическая система работает рентабельно и практически не загрязняет морскую среду отходами своего производства.

В силу сложности подобной постановки задачи на начальном этапе моделирования целесообразно использовать обобщенный совокупный продукт экономической системы прибрежной зоны, который интегрально отражает общий объем производимых товаров и услуг – интегральный объем производства. Рентабельность производства, которая зависит от соотношения доходов и расходов за определенный период времени, может служить критерием эффективности экономической системы зоны.

Интегральными характеристиками экологического состояния морской среды являются уровень загрязнения отходами производства и общий уровень ее биоразнообразия. Каждый из этих двух показателей формируется под влиянием множества разнообразных факторов. Но в целях упрощения в нашем исследовании были приняты следующие зависимости: уровень загрязнения определяется балансом скорости накопления загрязнений и скорости самоочищения морской среды вследствие химико-бактериологических реакций и перемешивания водных масс, а уровень биоразнообразия зависит исключительно от уровня загрязнения.

Исходя из этих соображений, была предложена структура модели интегральных процессов в прибрежной зоне моря, которая состоит из подсистемы «Море», представляющей процессы накопления и трансформации загрязнений в морской среде, и подсистемы «Берег», которая описывает экономические процессы, определяющие рентабельность производства.

Этими соображениями было обусловлено включение в структуру модели следующих интегральных эколого-экономических процессов:

- себестоимость производства E ,
- уровень загрязнения (интегральный индекс) PL ,
- объем производства V ,
- экологический штраф за загрязнение морской среды TX ,
- объем природоохранных действий EP ,
- спрос на продукцию производства (внешнее влияние на систему) D ,
- стоимость продукции производства (внешнее влияние на систему) P .

Эти процессы объединены в систему причинно-следственных связей, которая представлена на рис. 1.

Под действием внешнего влияния (спроса D) система производит продукцию в объемах V , расходуя свои накопленные (аккумулированные) за некоторое время материальные и финансовые средства в размере $E_{acc} = EV_{acc}$ и получая доходы в размере $R_{acc} = PV_{acc}$. В интересах производства необходимо следить за тем, чтобы доходы постоянно превышали расходы. Поэтому в структуру модели включен агент управления AG_1 , который останавливает производство, когда себестоимость превышает рыночную цену производимой продукции.

Экологический блок модели построен следующим образом. Принято, что уровень загрязнения производством окружающей среды возрастает пропорционально объему производства продукции V_{acc} , накопленному за период времени управления системой. Одновременно с тенденцией роста уровня загрязнения в природной среде действует тенденция уменьшения этого уровня. Причиной этой тенденции является естественное самоочищение среды, например вследствие химико-биологических процессов в море и турбулентного перемешивания воздушных и водных масс. Кроме того, уменьшению уровня загрязнения способствует природоохранная деятельность, которая ограничивает поступление загрязняющих веществ путем перевода производства на ресурсосберегающие технологии.

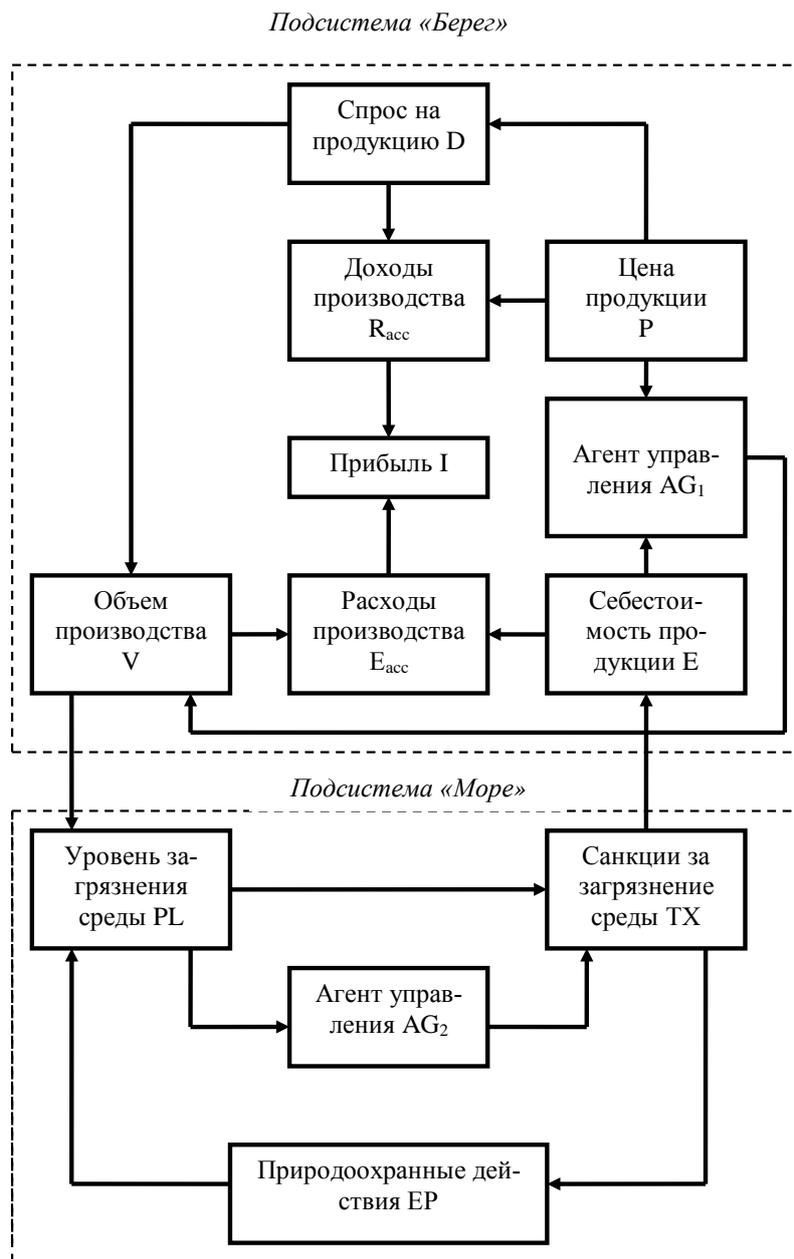


Рис. 1. Концептуальная модель системы «Берег – море»

Для того чтобы учесть в модели природоохранную деятельность, в ее структуру включены экологические налоги, которые приняты пропорциональными текущему объему выпуска продукции. Когда уровень загрязнения окружающей среды превышает предельно допустимое значение PL^* , включается агент управления AG_2 , который добавляет к налогам размер экологического штрафа TX и таким образом обеспечивает его поступление в фонд при-

родоохранных действий EP . Таким образом, с началом производства формируется фонд, который используется для понижения уровня загрязнения природной среды. В модели принято условие, что понижение уровня загрязнения пропорционально величине этого фонда, зависящего от накопленной суммы налогов и экологических штрафов TX_{acc} .

Применение метода адаптивного баланса влияний для построения модели системы «Берег – море». Метод адаптивного баланса влияний (ABC -метод) основан на использовании гипотез об адаптивном балансе влияний и о сохранении ресурсной емкости окружающей среды. Гипотеза об адаптивном балансе влияний выражает стремление системы к состоянию динамического равновесия с окружающей средой. Баланс влияний осуществляется путем непрерывной подстройки внутрисистемных процессов друг к другу, а также к тем изменениям, которые происходят в окружающей среде. В частности, внутрисистемное взаимодействие процессов в экосистемах подчинено эволюционным законам выживания живых организмов, вынужденных приспособляться (адаптироваться) к условиям окружающей среды. Если принять гипотезу адаптивного баланса влияний, то естественно допустить, что существует некоторое общее уравнение относительно функции, представляющей моделируемый процесс, которое выражает стремление этой функции к состоянию динамического равновесия с другими процессами.

Такое уравнение было предложено в ABC -методе, разработанном для построения адаптивных моделей эколого-экономических систем [10]. Для его вывода в правую часть уравнения, выражающего скорость изменения процесса $u(t)$ через его значения u и $-u$, были введены базовые функции влияния $F^{(-)}(u)$ и $F^{(+)}(u)$, которые обеспечивают баланс положительных и отрицательных обратных связей. Тогда уравнение процесса $u(t)$ принимает следующий вид:

$$\frac{du}{dt} = F^{(-)}(u)u - F^{(+)}(u)u. \quad (1)$$

Роль базовых функций заключается в том, чтобы сдерживать как рост, так и убывание функции $u(t)$, направляя решение уравнения к устойчивому стационарному состоянию. Для этого достаточно потребовать, чтобы с ростом u в области ее определения базовая функция $F^{(-)}(u)$ монотонно убывала, а базовая функция $F^{(+)}(u)$ монотонно росла. Тогда для обеспечения общего баланса тенденций роста и убывания $u(t)$ необходимо поставить дополнительное условие нормировки базовых функций влияния

$$F^{(-)}(u) + F^{(+)}(u) = 2C, \quad (2)$$

где C – некоторая константа, смысл которой становится понятным, если принять гипотезу о сохранении ресурсной емкости окружающей среды.

Поясним эту гипотезу на примере морской экосистемы. Процессы, развивающиеся в экосистеме, можно рассматривать как реакции этой системы на внешние воздействия при условии, что внутрисистемные влияния процессов друг на друга сбалансированы. Так как все взаимодействия между химико-биологическими процессами, которые существуют в данном объеме морской среды, происходят при определенных ресурсных ограничениях, рост концентрации любого компонента экосистемы всегда ограничен имеющимися ресурсами развития реакции. Гипотеза о сохранении ресурсной емкости окружающей среды по отношению к данной реакции означает, что для каждого процесса u_i существует некоторая ресурсная емкость морской среды $2C_i$ (*current capacity* [11]), которая определяет общие ресурсные возможности развития процесса.

Удобно отнести величины C_i к серединам интервалов изменчивости процессов. Тогда внутрисистемные и внешние влияния, изменяющие ресурсные возможности развития процесса u_i , проявляются в том, что они отклоняют значения процесса от C_i в пределах его интервала изменчивости $(0, \max u_i = 2C_i)$.

Для системы из n взаимосвязанных процессов удобно принять для базовых функций наиболее простое представление [10]:

$$F^{(+)}\left(u_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}u_j - f_i\right) = u_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}u_j - f_i, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), (i \neq j),$$

где $\sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}u_j$ – алгебраическая сумма внутрисистемных влияний, f_i – внешние влияния, a_{ij} – коэффициенты влияний. Тогда общая система модульных уравнений *ABC*-метода принимает вид

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}u_j - f_i \right] \right\}. \quad (3)$$

Из системы уравнений (3) *ABC*-метода непосредственно следует, что устойчивое стационарное решение системы уравнений $\{u_i^*\}$ соответствует следующему условию:

$$u_i^* - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}u_j^* - f_i = C_i, \quad (4)$$

которое выражает сущность гипотезы о сохранении ресурсной емкости окружающей среды.

Таким образом, в процессе адаптации друг к другу и к внешним влияниям, приложенным к системе, переменные *ABC*-модели принимают такие значения, которые удовлетворяют соотношению (4). Практическое значение этого соотношения заключается в том, что оно накладывает ограничения на выбор коэффициентов влияний a_{ij} в адаптивных моделях сложных систем. Для контроля за выполнением условия (4) в подобных моделях должны применяться логические операторы (агенты) управления.

Построение формальной модели системы «Берег – море» методом адаптивного баланса влияний. Выпишем систему уравнений модели эколого-экономической системы «Берег – море», применяя метод адаптивного баланса влияний. Для этого предварительно представим все моделируемые процессы в безразмерном виде. В работе [10] предложено одновременно с приведением переменных модели к безразмерному виду вводить для них общий интервал изменчивости, например (0, 10). Тогда рассчитываемые по модели сценарии процессов удобно представлять в общих координатных осях, что значительно облегчает их сравнение. Соответствующее линейное преобразование в данном случае будет выглядеть следующим образом:

$$u_i = \frac{u'_i}{\max(u'_i)} 10 = \frac{u'_i}{2\bar{u}'_i} 10 = 5 \frac{u'_i}{\bar{u}'_i}.$$

В этом выражении u'_i – размерные переменные модели, \bar{u}'_i – их известные средние значения, а $\max(u'_i) = 2\bar{u}'_i$ – их максимальные значения. Теперь система уравнений модели, изображенной на рис. 1, может быть представлена в виде модульных уравнений (3) ABC-метода, в которых ресурсные емкости приняты равными 10 безразмерным единицам, а $C_i = 5$:

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= 2r_D D [5 - (D - a_{D/P} P - F_D)], \\ \frac{dP}{dt} &= 2r_P P [5 - (P - F_P)], \\ \frac{dE}{dt} &= 2r_E E [5 - (E - a_{E/TX} TX - F_E)], \\ \frac{dV}{dt} &= 2r_V V [5 - (V - a_{V/D} D - AG_1)], \\ \frac{dPL}{dt} &= 2r_{PL} PL [5 - (PL - a_{PL/V} V_{acc} + a_{PL/EP} EP + F_{PL})], \\ \frac{dTX}{dt} &= 2r_{TX} TX [5 - (TX - a_{TX/PL} PL - AG_2)], \\ \frac{dEP}{dt} &= 2r_{EP} EP [5 - (EP - a_{EP/TX} TX_{acc} + F_{EP})], \\ AG_1 &= IF [P > E; 0; A_1], \\ AG_2 &= IF [PL < PL^*; 0; \theta PL (1 - \exp(-\alpha_{PL} \tau))], \\ U_{acc} &= \int_0^t U(t) dt, \quad U = [V(t); TX(t); PL(t); EP(t); E(t)V(t); P(t)D(t)], \end{aligned} \quad (5)$$

где r_{MN} – отношения удельных скоростей изменения переменных к самим переменным; функции F представляют внешние управления: F_D – динамика спроса на продукцию, F_P – рыночная стоимость продукции, F_E – производственные расходы, F_{PL} – самоочищение морской среды вследствие перемешивания вод и химико-бактериологических реакций, F_{EP} – уменьшение фонда EP_{acc} в процессе природоохранных действий; θ – коэффициент влияния штрафных санкций.

Для проведения вычислительных экспериментов система уравнений (5) была представлена в конечных разностях. Коэффициенты уравнений были подобраны экспериментально таким образом, чтобы значения переменных не превышали предельно допустимую величину $\max u_i = 10$. Шаг вычислений составлял 0,1, а временной интервал моделирования процессов был равен 500 шагам. Параметры r_{MN} , характеризующие относительную изменчивость процессов, были приняты равными единице. В качестве начальных значений для уравнений были взяты средние значения безразмерных переменных $\bar{u}_i = 5$. Для того чтобы контролировать уровень загрязнения окружающей среды отходами производства, был принят допустимый уровень загрязнения $PL^* = 7$ и определен «коридор» значений (6,5; 7,5), в котором величина PL должна удерживаться размерами штрафов за превышение уровня PL^* . Для функций самоочищения морской среды и изменения величины фонда природоохранных действий были приняты линейные аппроксимации: $F_{PL} = \beta PL_{acc}$ и $F_{EP} = \delta EP_{acc}$. Выполнение условия сохранения ресурсной емкости (4) в итерационных процессах решения уравнений (5) контролировали агенты управления вида

$$u_i^{k+1} = IF[u_i^k < 0; 0; IF(u_i^k > 10; 10; u_i^k)].$$

План проведения экспериментов заключался в следующем. Первоначально сценарии процессов должны были быть рассчитаны при постоянных значениях внешних влияний: спроса на продукцию D и рыночной стоимости продукции P . При этом коэффициенты уравнений и параметры модели уточнялись таким образом, чтобы штрафы за загрязнение не стали чрезмерно высокими для производства и не останавливали его из-за отсутствия прибыли. Затем должно быть включено внешнее влияние на производство в виде сценария переменного спроса на его продукцию и выполнена оценка чувствительности модели к внешним влияниям, т. е. ее управляемости.

После проверки адекватности и управляемости сценариев, воспроизводимых моделью в условиях переменного спроса, ставилась задача оценить единственность решений вычислительного алгоритма модели. И, наконец, необходимо было показать, как изменяется динамика прибыли производства и как зависят сценарии уровня загрязнений окружающей среды от размеров штрафных санкций, налагаемых на производство.

Вычислительные эксперименты по модели эколого-экономической системы «Берег – море». В первом вычислительном эксперименте в модель не была включена зависимость спроса на продукцию производства от ее цены P и не учитывались внешние влияния на спрос, цену и себестоимость: $F_D = F_P = F_E = 0$. Коэффициенты в функциях F_{PL} и F_{EP} имели равные значения $\beta = \delta = 0,01$. Результаты расчетов показаны на рис. 2. Рассмотрим сценарии, изображенные на рис. 2, а. Так как себестоимость продукции E в начале эксперимента была меньше ее стоимости P , под влиянием спроса $D = 3,5$ производство начало выпуск продукции. Одновременно с выпуском продукции начался рост загрязнения морской среды, о чем свидетельствует сценарий уровня загрязнения PL на рис. 2, б. Пропорционально уровню загрязнения увеличивался природоохранный налог TX . Когда уровень загрязнения достиг порогового значения $PL^* = 7$, агент управления AG_2 (рис. 2, в) начал дополнительно увеличивать санкции за загрязнение, добавляя к размеру природоохранного налога экологический штраф за превышение порогового значения PL^* . Так как себестоимость производства зависела от размера природоохранного налога, ее величина быстро возрастала, что видно на рис. 2, а. В результате себестоимость начала превосходить стоимость продукции, производство стало нерентабельным, и агент управления AG_1 (рис. 2, в) остановил выпуск продукции. В дальнейшем цикл этих операций продолжался.

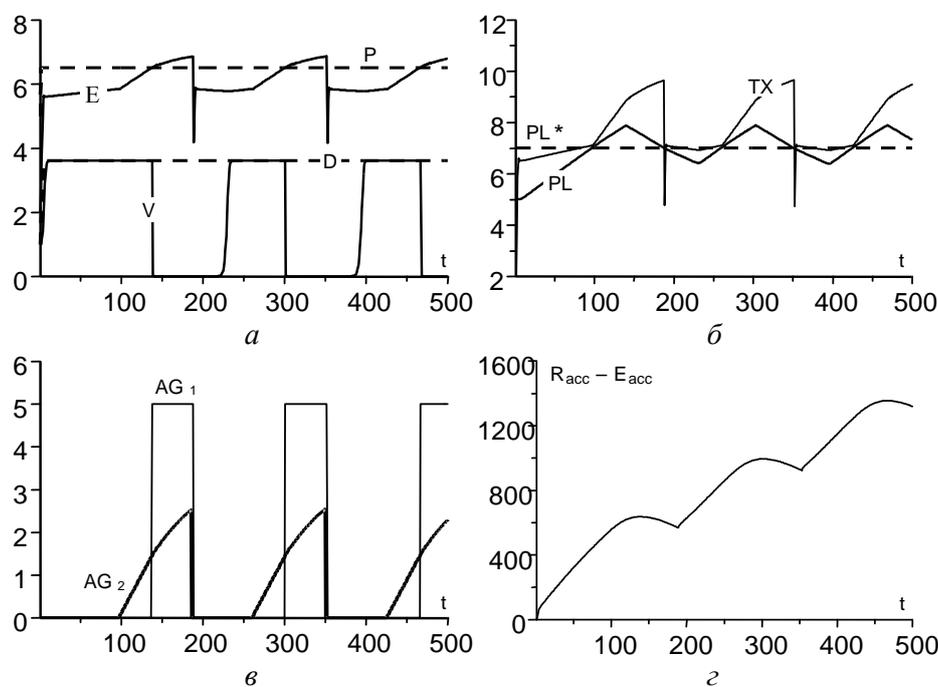


Рис. 2. Сценарии эколого-экономических процессов при постоянном спросе на продукцию системы «Берег – море»: а – остановка производства, когда себестоимость E становится больше цены P , и задержка в возобновлении выпуска продукции ввиду низкого спроса; б – увеличение экологического штрафа TX , когда уровень загрязнения PL становится больше допустимого значения PL^* ; в – функции агента управления выпуском продукции AG_1 и агента управления штрафными санкциями AG_2 ; г – разность между накопленными за время эксперимента доходами R_{acc} и расходами E_{acc}

Функции агентов управления показаны на рис. 2, в. Агент управления AG_1 останавливал производство всякий раз, когда себестоимость производства превышала стоимость продукции. Однако возобновление выпуска продукции происходило с некоторым запаздыванием. Время запаздывания зависело от выбора величины константы A_1 в логическом операторе

$$AG_1 = IF[P > E; 0; A_1]$$

и от величины спроса D . Вычислительные эксперименты показали, что чем больше величина A_1 по сравнению с величиной $a_{V/D}D$, тем больше запаздывание при возобновлении выпуска продукции. Это объясняется свойством использованной итерационной схемы решения уравнения для объема выпуска продукции V : с увеличением разности $A_1 - a_{V/D}D$ растет число итераций, дающих решение этого уравнения. Это обстоятельство было признано отвечающим задаче моделирования, так как на практике возобновление производства продукции может быть связано с реальной задержкой по времени.

На рис. 2, г отобразена динамика накопления прибыли подсистемы «Берег», учитывающая остановки выпуска и реализации продукции из-за штрафных санкций. Отметим, что этот график показывает величину суммарной (аккумулированной) прибыли за все время от начала эксперимента до текущего момента времени. Разность между аккумулированными доходами R_{acc} и аккумулированными расходами E_{acc} приведена в условных единицах. Как следует из этого графика, производство оставалось рентабельным даже в условиях штрафных санкций, удерживавших уровень загрязнения PL в допустимых пределах (см. рис. 2, б).

Во втором вычислительном эксперименте рассматривалось поведение системы «Берег – море», когда к ней приложено внешнее управляющее воздействие F_D в виде меняющегося во времени спроса на продукцию производства. Результаты эксперимента показаны на рис. 3. Имитированный график спроса приведен на рис. 3, а. По сравнению со случаем постоянного спроса сценарии процессов претерпели существенные изменения. В начальный период времени, когда спрос быстро увеличивался, выпуск продукции и рост уровня загрязнения происходили более быстрыми темпами, чем в эксперименте с постоянным спросом. Поэтому размер экологического штрафа и себестоимость производства вышли за верхний предел интервала изменчивости, установленный ранее и равный 10. Агент, контролирующий границы этого интервала, ограничил величины TX и E их предельными значениями.

Первая остановка производства произошла на 110-м шаге вычислений, когда величина спроса составляла 5,5. С этого момента времени уровень загрязнения начал снижаться, как это видно из рис. 3, б. Однако ввиду высокого спроса величина разности $A_1 - a_{V/D}D$ в уравнении для объема выпуска продукции V оказалась недостаточной для того, чтобы производство возобновилось сразу после первой остановки. Поэтому до того момента, когда уровень загрязнения снизился до величины PL^* , происходил частичный выпуск продукции (график V на рис. 3, а). Полностью производство возобновилось на 310-м шаге, когда было достигнуто условие $PL = PL^*$. После этого

повторился цикл роста загрязнения и последующей новой остановки производства на 350-м шаге.

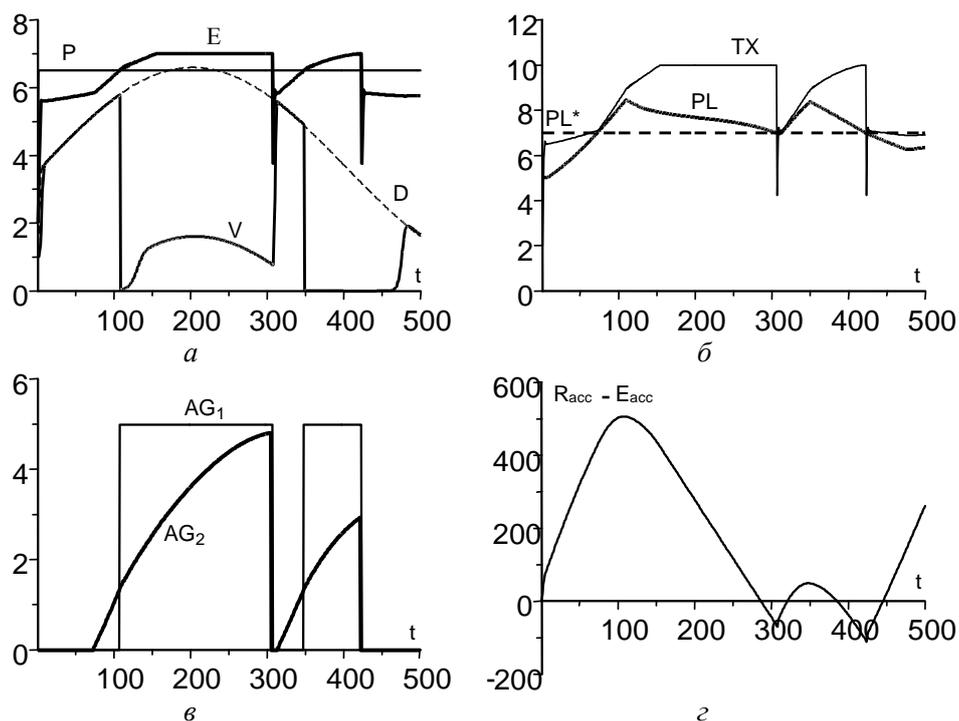


Рис. 3. Сценарии эколого-экономических процессов при переменном спросе на продукцию системы «Берег – море»: *a* – остановка производства, когда себестоимость E становится больше цены P , и задержка возобновления выпуска продукции ввиду изменения величины разности $A_1 - a_{V/D}D$; *б* – динамика экологического штрафа TX и уровня загрязнения PL ; *в* – функции агента управления выпуском продукции AG_1 и агента управления штрафными санкциями AG_2 ; *г* – разность между накопленными за время эксперимента доходами R_{acc} и расходами E_{acc}

Отметим, что вторая остановка произошла во время быстрого падения спроса, когда величина разности $A_1 - a_{V/D}D$ в уравнении для объема выпуска продукции увеличивалась. Поэтому произошла задержка возобновления выпуска продукции на некоторое время: себестоимость опустилась ниже уровня цены на 430-м шаге, а выпуск продукции начался приблизительно на 470-м шаге вычислений (рис. 3, *a*).

Располагая численной моделью системы «Берег – море», можно выполнить проверку существования и единственности решений системы ее уравнений (5). Заметим, что теоретический анализ условий существования и единственности для системы из двух уравнений логистического типа был выполнен во многих исследованиях по математической биологии в связи с изучением задачи «хищник – жертва» [11]. Для систем логистических уравнений более высокого порядка общих результатов, по-видимому, еще не получено [12]. Однако для конкретной численной модели (5) имелась возможность

оценить существование и единственность решений путем геометрических построений. С этой целью для рассмотренных выше случаев постоянного и переменного спроса на продукцию системы были построены графики левых и правых частей конечно-разностных уравнений модели. Семейство кривых, изображающих эти графики, приведено на рис. 4. В каждом случае линия n , изображающая на рис. 4, a , b графики левых частей конечно-разностных уравнений модели, пересекает соответствующие графики правых частей только в одной точке, что свидетельствует о существовании и единственности решения системы уравнений (5).

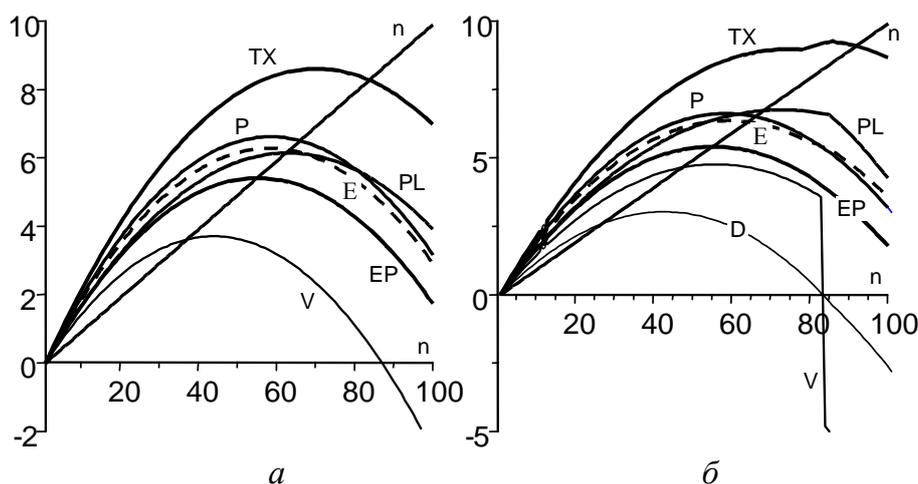


Рис. 4. Проверка существования и единственности решений системы уравнений модели, проиллюстрированная графиками левых (линия n) и правых частей конечно-разностных уравнений (5): a – для постоянного спроса, b – для переменного спроса

Влияние экологических санкций за загрязнение окружающей среды на сценарии экономических процессов. Практическое значение моделей системы «Берег – море» заключается в том, что с их помощью можно получать оценки управляющих воздействий, которые устанавливают требуемый баланс между прибылью производства и уровнем загрязнения им морской среды. Одним из важных факторов управления служит величина экологических санкций (налогов и штрафов) за загрязнение окружающей среды.

Рассмотрим, как зависят сценарии процессов в системе от выбора размеров этих санкций. Их величина определяется значением коэффициента влияния $a_{TX/PL}$ в слагаемом $a_{TX/PL}PL$ в правой части уравнения для TX , а также выбором параметра θ в уравнении для агента управления AG_2 . Для оценки влияния штрафных санкций выполним построение сценариев эколого-экономических процессов при постоянном значении коэффициента природоохранного налога $a_{TX/PL} = 0,3$ и различных значениях θ . Примем, например, что $\theta = 0,5$. Сценарии процессов в системе тогда имеют вид, изображенный

на рис. 5, *a – г*. Результаты расчетов, приведенных ранее на рис. 3, были получены при значении $\theta = 0,3$. Из сравнения этого рисунка с рис. 5 следует вывод о том, что с увеличением коэффициента влияния штрафных санкций θ отклонения уровня загрязнения от допустимого значения $PL^* = 7$ уменьшаются. Однако при этом снижается и уровень накопленной прибыли. Поэтому для нахождения величины штрафных санкций, удовлетворяющей условию эколого-экономического баланса состояния системы «Берег – море», необходимо располагать семейством сценариев процессов, построенных для различных значений параметра θ .

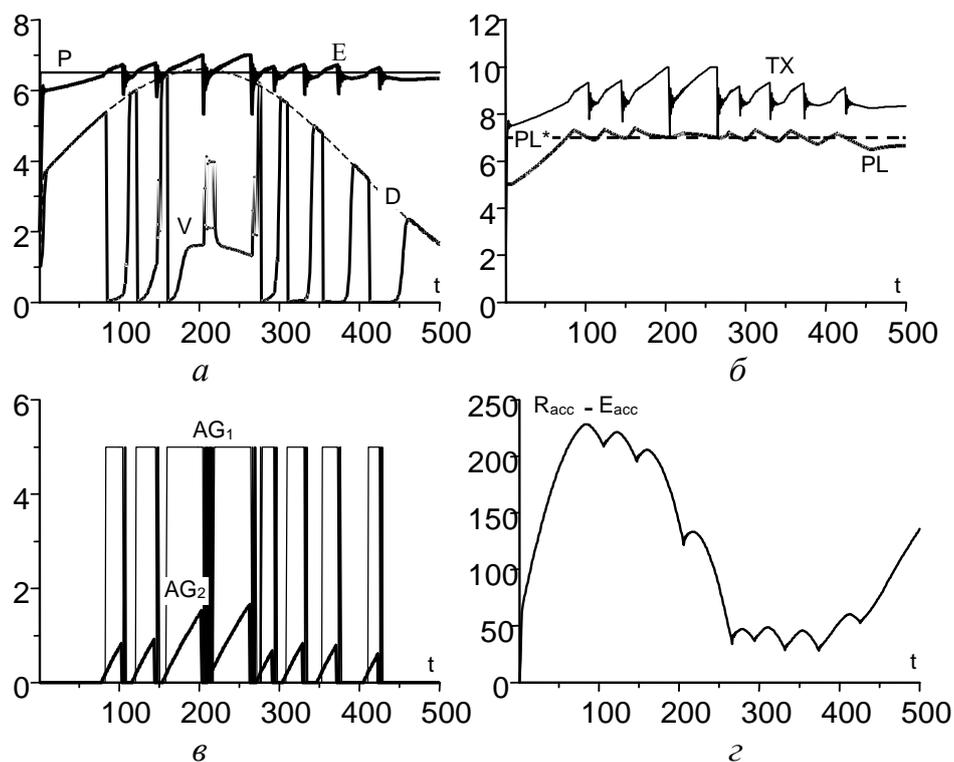
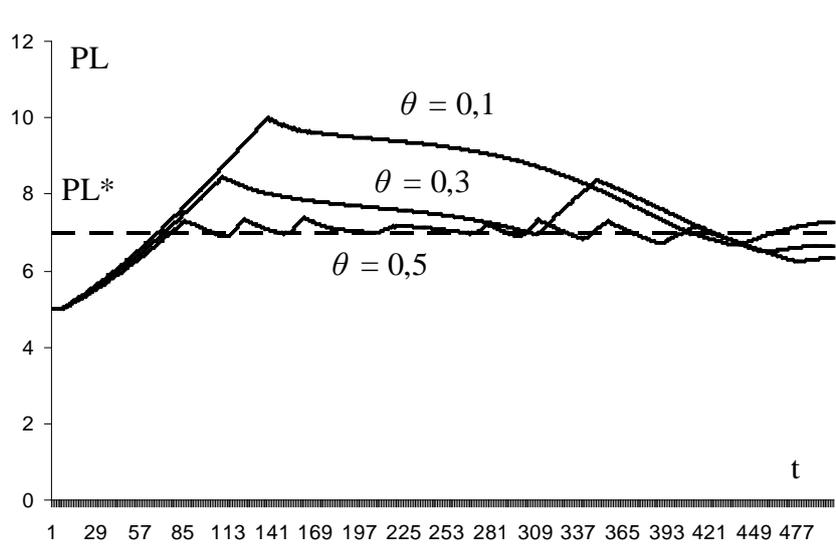
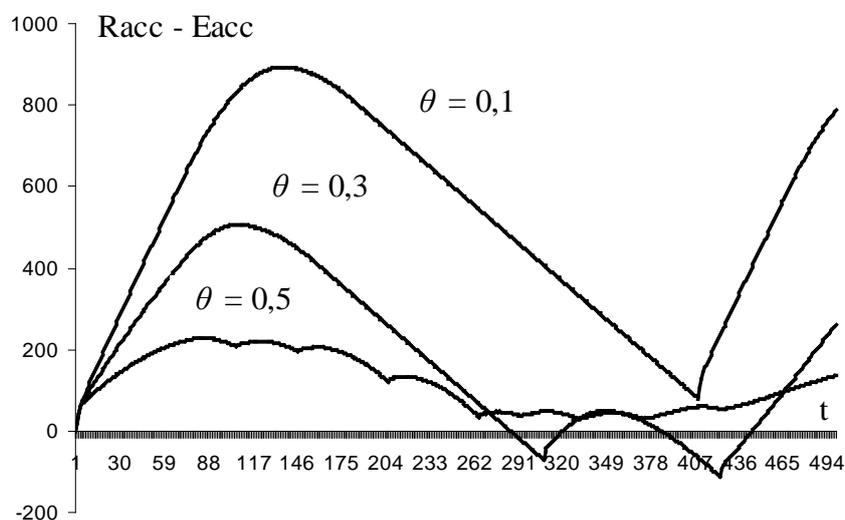


Рис. 5. Сценарии эколого-экономических процессов при переменном спросе на продукцию системы «Берег – море» для случая, когда коэффициент влияния штрафных санкций $\theta = 0,5$: *a* – спрос *D*, себестоимость *E* и выпуск продукции *V*; *б* – экологический штраф *TX* и динамика уровня загрязнения *PL*; *в* – функции агентов управления *AG₁* и *AG₂*; *г* – динамика суммарной прибыли

Пример подобного семейства сценариев приведен на рис. 6. При тех коэффициентах влияния, которые были заданы в имитационных расчетах, наиболее выгодной величиной штрафных санкций оказался штраф, соответствующий значению $\theta = 0,5$. Как следует из рис. 5, *a, б*, при таких штрафных санкциях себестоимость производства возросла в среднем на 10%, уровень загрязнения морской среды находился в допустимых пределах, а суммарная прибыль системы «Берег-море» сохранялась положительной.



a



б

Рис. 6. Сценарии эколого-экономических процессов в системе «Берег – море» при различных величинах коэффициента влияния штрафных санкций за загрязнение среды θ : *a* – динамика уровня загрязнения морской среды; *б* – динамика прибыли производства

Закключение. В результате проведенных экспериментов удалось показать, что адаптивная модель эколого-экономической системы «Берег – море», основанная на известных из опыта причинно-следственных зависимостях между экономическими и экологическими процессами, дает оценки рентабельности производства и экологического состояния окружающей среды. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– имитационная модель системы «Берег – море», построенная методом адаптивного баланса влияний, адекватно описывает известные из опыта закономерности поведения основных экономических переменных – себестоимости и прибыли, а также экологических переменных – уровня загрязнения окружающей среды и величины фонда природоохранной деятельности, формируемого за счет штрафных санкций;

– применение в модели агентов управления (логических операторов) позволяет контролировать условия баланса экономических и экологических переменных;

– система уравнений модели при выбранных коэффициентах и параметрах устойчива и имеет единственное решение;

– результаты имитационных экспериментов подтвердили возможность находить такие размеры экономических санкций за загрязнение окружающей среды, которые обеспечивают рациональный баланс природопользования.

Отметим, что эти результаты получены с применением относительно простой модели эколого-экономической системы. Использование в уравнениях адаптивных моделей модульного принципа построения уравнений позволяет существенно увеличить количество переменных и перейти от описания интегральных процессов к менее осредненным. Следующими шагами в этом направлении могут стать учет ресурсных возможностей производства в подсистеме «Берег» и построение модели формирования индекса биоразнообразия в подсистеме «Море».

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 14-45-01013/14.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.* Моделирование процессов устойчивого развития территорий. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2005. – 132 с.
2. *Ivanov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E.* Coastal Zone Resources Management. – Kyiv: Akadempriodika, 2012. – 304 p.
3. *Daly H., Farley J.* Ecological Economics: Principles and Applications. 2nd edition. – Washington: Island Press, 2010. – 544 p.
4. *Voinov A.* Systems Science and Modeling for Ecological Economics. – Academic Press, 2008. – 430 p.
5. *Oguz T.* Nonlinear response of Black Sea pelagic fish stocks to over-exploitation // Mar. ecol. progr. ser. – 2007. – 345. – P. 211 – 228.

6. *Петров А.А., Поспелов И.Г.* Системный анализ развивающейся экономики: к теории производственных функций. Ч. I – IV // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1979. – № 2 – 5. – С. 492 – 506.
7. *Forrester J.W.* Principles of Systems. – Cambridge, MA: Productivity Press, 1968. – 338 p.
8. *Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J.* Beyond the limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future. – Post Mills, VT: Chelsea Green, 1992. – 342 p.
9. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.* Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 1. – С. 48 – 66.
10. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2000. – 225 с.
11. *Murray J.D.* Mathematical Biology. II: Spatial Models and Biomedical Applications. – Springer, 2008. – 736 p.
12. *Свирижев Ю.М., Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

Management of integral ecological-economic processes in the «Coast-Sea» system

I.E. Timchenko, I.K. Ivashchenko, E.M. Igumnova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

Model of ecological-economic system connecting output of the economic subsystem «Coast» and the degree of marine environment pollution controlled by the subsystem «Sea» is proposed. The model is constructed by the method of adaptive balance of causes and includes the management agents which permit to define the rate of economic sanctions applied to an enterprise for deterioration of the marine environment ecological condition. The examples of scenarios simulating conditions of balance between economic profit of production and the expenses required for protection of marine environment from pollution are represented. The conclusion is drawn that the adaptive models of cause-effect relations between the integral economic and ecological processes in the coastal zone permit to find the conditions that provide rational environment management.

Keywords: ecological-economic model, adaptive balance of causes.