

И.Е.Тимченко, Е.М.Игумнова

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***АДАПТИВНЫЕ МОДЕЛИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЯ**

В контексте системного подхода к управлению ресурсами прибрежной зоны моря рассмотрено применение метода адаптивного баланса влияний для построения интегральных моделей морских экосистем и экономических систем этой зоны. Предложены способы создания адаптивных моделей эколого-экономических систем, позволяющих прогнозировать сценарии рационального природопользования по критериям биоразнообразия и уровня загрязнения природной среды. Приведен пример управления сценариями эколого-экономических процессов при использовании рекреационных ресурсов прибрежной зоны моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *адаптивные модели, эколого-экономические системы.*

Прибрежные зоны моря (*ПЗМ*) представляют собой органичные сочетания двух природных систем: суши и моря, что наделяет их уникальными свойствами и ставит специфические задачи управления устойчивым развитием этих зон. Богатейшие ресурсы прибрежной зоны моря, а также использование морских путей для перевозок и торговли исторически обусловили особую роль *ПЗМ* в развитии человечества. В настоящее время эти зоны сохраняют за собой более высокие темпы развития по сравнению с континентальными районами Земли. Продуктивность прибрежных и шельфовых вод играет значительную роль в продовольственном обеспечении многих стран, так как в них происходит до 90 % глобальных рыбных уловов. *ПЗМ* выполняют важные функции рекреации, способствуют общему экономическому росту и повышению качества жизни для 60 % от общей численности населения мира, которое проживает в пределах 200 км зоны морского побережья [1].

Сложная социальная эколого-экономическая система *ПЗМ* связана двухсторонним взаимодействием с динамическими процессами, происходящими в природной среде. С позиций системного подхода к этой проблеме [2] устойчивое развитие *ПЗМ* есть управляемый процесс движения социальных эколого-экономических систем к краткосрочным и долгосрочным целевым установкам развития, адаптируемым к имеющимся ресурсам и к ограничениям в их использовании и удовлетворяющим критериям экономической эффективности, социальной справедливости, рационального природопользования и гражданского общества.

Системная методология [3, 4] определяет последовательность действий, ведущих к созданию информационных технологий управления ресурсами устойчивого развития *ПЗМ*. В основе технологий лежат компьютерные модели процессов развития, обеспечивающие прогнозы сценариев развития при различных вариантах использования ресурсов. Динамические модели эколого-экономических систем становятся незаменимыми инструментами управления, поскольку они дают возможность предвидеть результаты пла-

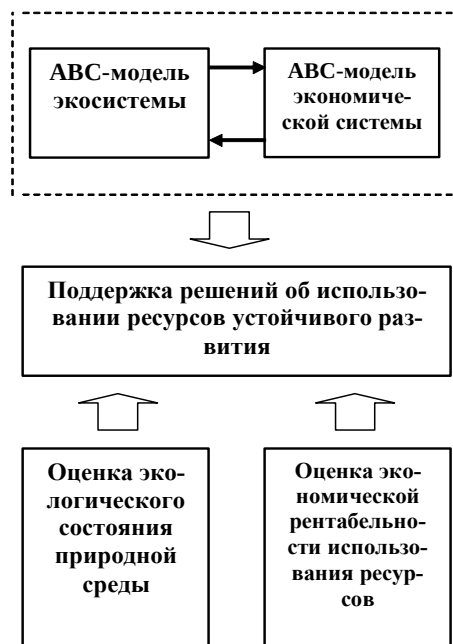


Рис. 1. Основные элементы управления развитием прибрежной зоны моря.

Адаптивные модели эколого-экономических систем *ПЗМ* объединяют в своем составе модели морских экосистем и модели экономических систем суши, построенные методом адаптивного баланса влияний (*ABC*-методом) [3]. Связь между ними изображена на рис. 1, который отображает составные элементы информационной технологии управления ресурсами развития *ПЗМ*.

ABC-метод построения адаптивных эколого-экономических моделей является следствием принятой в системной методологии [4] концепции, которая постулирует стремление сложной системы к динамическому равновесию с переменными внешними силами. Адаптивная модель системы n взаимосвязанных процессов развития x_i имеет следующий вид:

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

$$\frac{da_{ij}}{dt} = a_{ij} \left\{ 1 - 2 \left[a_{ij} - R_{jj}^{-1} \left(R_{ij} - \sum_{k=1}^n a_{i,k} R_{k,j} - \sum_{l=1}^n a_{l,j} G_{l,j} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (k, l \neq i),$$

где $R_{kl} = E \{ x'_k x'_l \}$ и $G_{mn} = E \{ x'_m f'_n \}$ – коэффициенты взаимной корреляции моделируемых процессов, полученные по архивным данным наблюдений; x'_i и f'_i – отклонения процессов развития и внешних влияний на систему от их стационарных значений. В качестве начальных условий могут быть использованы средние значения переменных x_i и коэффициентов a_{ij} , так как структура уравнений модели обеспечивает быструю сходимость итерацион-

нируемых действий. Оценка результативности управления, которая осуществляется системой мониторинга ресурсов и эколого-экономического состояния *ПЗМ* служит основой для адаптации как целевых установок развития, так и самих динамических моделей, дающих прогнозы ожидаемых результатов.

В настоящей работе мы рассмотрим применение адаптивных моделей интегральных эколого-экономических систем природопользования в качестве элементов системы управления развитием, ориентированной на поддержку решений об использовании основных видов ресурсов прибрежной зоны моря: биоресурсов, рекреационных и экологических ресурсов, потребляемых в этой зоне [5].

Адаптивный баланс эколого-экономических процессов развития.



Р и с . 2 . Концептуальная модель простейшей эколого-экономической системы.

ных схем их решения при произвольных начальных условиях [3, 4].

Рассмотрим в качестве примера простейшую адаптивную эколого-экономическую систему, в которой экологическое состояние природной среды интегрально оценивается параметром x_1 , а экономическая рентабельность потребления природных ресурсов – параметром x_2 . Объединение процессов x_1 и x_2 в систему показано на рис.2.

В системе действует отрицательная обратная связь, поскольку принято предположение о том, что повышение экономической рентабельности производства увеличивает потребление природных ресурсов, что негативно сказывается на экологическом состоянии природной среды. В свою очередь, ухудшение экологического состояния тормозит рост экономической рентабельности производства.

Будем считать, что влияние процесса x_2 на процесс x_1 может быть представлено зависимостью $x_1 = a_{12}x_2$, а обратное влияние – зависимостью $x_2 = a_{21}x_1$. Тогда в соответствии с ABC-методом динамическая модель эколого-экономической системы принимает следующий вид:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1 [1 - 2(x_1 + a_{12}x_2 - f_1)], \quad \frac{dx_2}{dt} = x_2 [1 - 2(x_2 - a_{21}x_1 - f_2)]. \quad (3)$$

Объединение двух процессов в систему (3) дает эмерджентный эффект, заключающийся в адаптации процессов друг другу и к внешним воздействиям f_1 и f_2 . Система уравнений (3) устанавливает новые равновесные состояния для адаптированных процессов x_1 и x_2 .

Для иллюстрации адаптации процессов друг к другу построим сценарии x_1 и x_2 при отсутствии внешних влияний, т.е. когда $f_1 = f_2 = 0$. Степени влияния процессов друг на друга определим заданием коэффициентов модели: $a_{12} = -0,8$ и $a_{21} = 0,3$. Сходимость решений системы уравнений (3) к стационарным значениям $x_1^* = 0,725$ и $x_2^* = 0,282$ демонстрируют графики на рис.3

Добавим в правые части уравнений модели функции внешних влияний, прогнозирующих эффективность природоохранных действий f_1 и спрос на природные ресурсы f_2

$$f_1 = 0,5 \sin[0,3t - \cos(0,6t)], \quad f_2 = \cos[0,5t + \sin(0,7t)],$$

с коэффициентами $0,4 f_1$ и $0,25 f_2$. Тогда сценарии взаимной адаптации процессов принимают вид, показанный на рис.4.

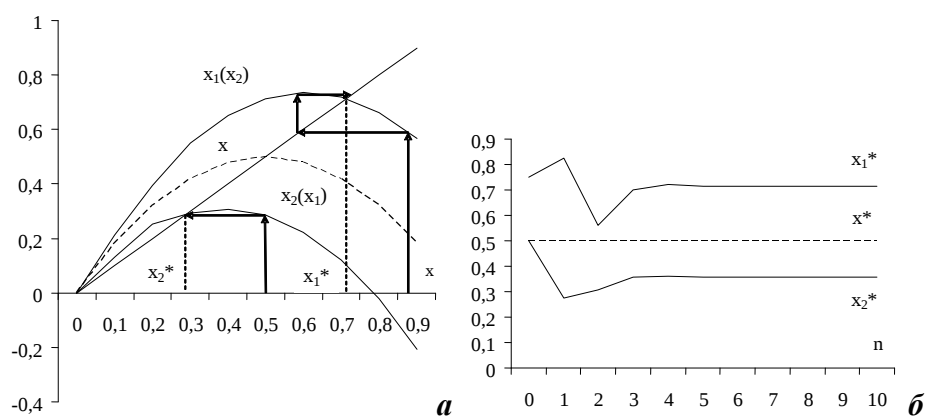


Рис. 3. Адаптация процессов x_1 и x_2 друг другу при коэффициентах влияния $a_{12} = -0,8$ и $a_{21} = 0,3$.

Эти вычислительные эксперименты позволяют сделать два вывода:

1. Уравнения *ABC*-моделей обладают быстрой сходимостью к стационарным решениям и весьма чувствительны к функциям внешних влияний.
2. Сценарии процессов, получающиеся в результате адаптации, существенно отличаются от формирующих их функций внешних влияний.

Построение сценариев процессов в морских экосистемах с учетом ресурсных ограничений развития. Рассмотрим теперь применение уравнений *ABC*-метода для построения моделей морских экосистем в качестве составной части адаптивных эколого-экономических моделей (рис.1). Свойство быстрой сходимости решений подобных уравнений имеет при этом определенное значение, поскольку в моделях экосистем должны быть учтены процессы лимитирования ресурсов развития биологических объектов. С этой целью в уравнения модели включают логические операторы управления (агенты управления [2 – 6]), которые могут повлиять на устойчивость решений. Рассмотрим в качестве примера концептуальную модель морской экосистемы, изображенную на рис.5.

В этой модели приняты следующие обозначения концентраций в морской воде: *OX* –растворенный кислород, *CD* – растворенный углекислый газ, *PP* – фитопланктон, *ZP* – зоопланктон, *BR* – биоресурс, *BG* – биогены, *DT* – детрит. Через *SR* обозначена освещенность поверхности моря, а через *TW* –

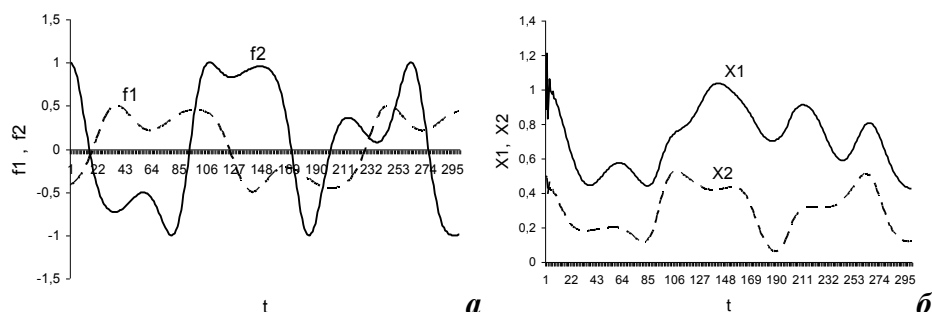
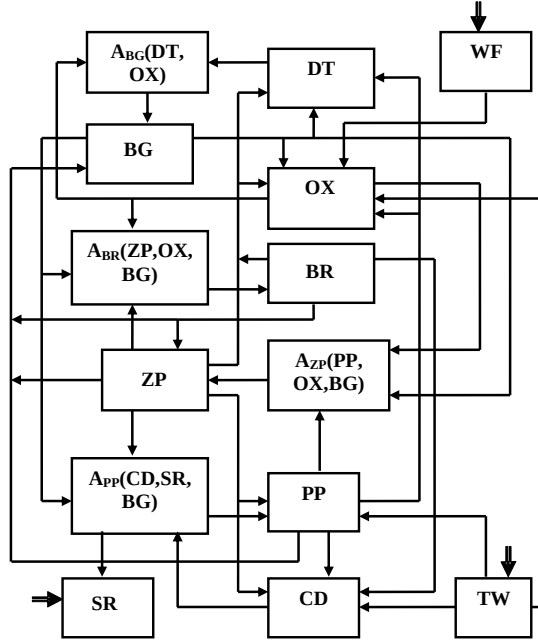


Рис. 4. Одновременная адаптация процессов x_1 и x_2 друг к другу и к внешним влияниям f_1 и f_2 : внешние влияния (а), результаты одновременной адаптации (б).



Р и с . 5 . Концептуальная модель морской экосистемы с агентами лимитирования концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурсов и биогенов.

температура морской воды. Используя *ABC*-метод, получим следующие динамические уравнения модели экосистемы

$$\begin{aligned}
 \frac{dOX}{dt} &= OX \{1 - 2[OX + a_{OX/BR}BR + a_{OX/ZP}ZP - a_{OX/PP}PP + \\
 &\quad a_{OX/BG}BG + a_{OX/BG}TW - F_{OX}(WF)]\}, \\
 \frac{dCD}{dt} &= CD[1 - 2(CD - a_{CD/BR}BR - a_{CD/ZP}ZP + a_{CD/PP}PP + a_{CD/PP}TW)] \\
 \frac{dPP}{dt} &= PP\{1 - 2[PP + a_{PP/ZP}ZP - A_{PP}(BG, SR, CD) - A_{PP}(TW)]\}, \\
 \frac{dZP}{dt} &= ZP\{1 - 2[ZP + a_{ZP/BR}BR - A_{ZP}(OX, PP, BG)]\}, \\
 \frac{dBR}{dt} &= BR\{1 - 2[BR - A_{BR}(OX, ZP, BG)]\}, \\
 \frac{dBG}{dt} &= BG\{1 - 2[BG - A_{BG}(OX, DT) + a_{BG/PP}PP + a_{BG/ZP}ZP + a_{BG/BR}BR]\} \\
 \frac{dDT}{dt} &= DT[1 - 2(DT - a_{DT/BR}BR - a_{DT/ZP}ZP - a_{DT/PP}PP + a_{DT/BG}BG)].
 \end{aligned} \tag{4}$$

Агенты лимитирования, управляющие процессами адаптации переменных экосистемы, могут быть представлены следующими логическими соотношениями

$$\begin{aligned}
A_{BG}(OX, DT) = & IF\{M_{BG}(t) = a_{BG/OX} OX(t); IF\{OX(t) < OX_{BG}^*; \\
& -OX_{BG}[1 - \exp(-\alpha_{BG}\tau)]; OX_{BG}[1 - \exp(-\beta_{BG}\tau)]\}; 0\} + \\
& IF\{M_{BG}(t) = a_{BG/DT} DT(t); IF\{DT(t) < DT_{BG}^*; \\
& -DT_{BG}[1 - \exp(-\alpha_{DT}\tau)]; DT_{BG}[1 - \exp(-\beta_{DT}\tau)]\}; 0\} \\
M_{BG}(t) = & \arg \min[a_{BG/OX} OX(t); a_{BG/DT} DT(t)],
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
A_{pp}(BG, SR, CD) = & IF\{M_{pp}(t) = a_{pp/BG} BG(t); IF\{BG(t) < BG_{pp}^*; \\
& -BG_{pp}[1 - \exp(-\alpha_{pp}\tau)]; BG_{pp}[1 - \exp(-\beta_{pp}\tau)]\}; 0\} + \\
& + IF\{M_{pp}(t) = a_{pp/SR} SR(t); IF\{SR(t) < SR_{pp}^*; \\
& -SR_{pp}[1 - \exp(-\alpha_{SR}\tau)]; SR_{pp}[1 - \exp(-\beta_{SR}\tau)]\}; 0\} + \\
& IF\{M_{pp}(t) = a_{pp/CD} CD(t); IF\{CD(t) < CD_{pp}^*; \\
& -CD_{pp}[1 - \exp(-\alpha_{CD}\tau)]; CD_{pp}[1 - \exp(-\beta_{CD}\tau)]\}; 0\}
\end{aligned} \tag{6}$$

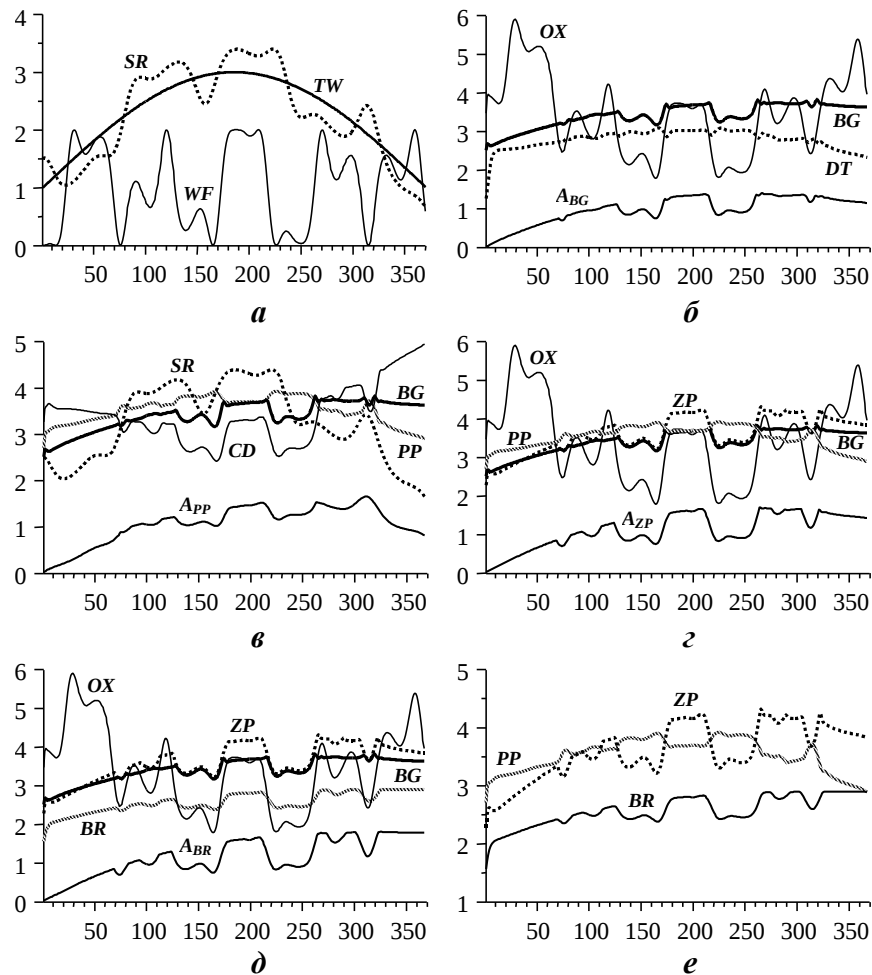
$$\begin{aligned}
M_{pp}(t) = & \arg \min[a_{pp/BG} BG(t); a_{pp/SR} SR(t); a_{pp/CD} CD(t)], \\
A_{zp}(OX, PP, BG) = & IF\{M_{zp}(t) = a_{zp/OX} OX(t); IF\{OX(t) < OX_{zp}^*; \\
& -OX_{zp}[1 - \exp(-\alpha_{zp}\tau)]; OX_{zp}[1 - \exp(-\beta_{zp}\tau)]\}; 0\} + \\
& IF\{M_{zp}(t) = a_{zp/PP} PP(t); IF\{PP(t) < PP_{zp}^*; \\
& -PP_{zp}[1 - \exp(-\alpha_{pp}\tau)]; PP_{zp}[1 - \exp(-\beta_{pp}\tau)]\}; 0\} + \\
& IF\{M_{zp}(t) = a_{zp/BG} BG(t); IF\{BG(t) < BG_{zp}^*; \\
& -BG_{zp}[1 - \exp(-\alpha_{BG}\tau)]; BG_{zp}[1 - \exp(-\beta_{BG}\tau)]\}; 0\}
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
M_{zp}(t) = & \arg \min[a_{zp/OX} OX(t); a_{zp/PP} PP(t); a_{zp/BG} BG(t)], \\
A_{BR}(ZP, OX, BG) = & IF\{M_{BR}(t) = a_{BR/ZP} ZP(t); IF\{ZP(t) < ZP_{BR}^*; \\
& -ZP_{BR}[1 - \exp(-\alpha_{ZP}\tau)]; ZP_{BR}[1 - \exp(-\beta_{ZP}\tau)]\}; 0\} + \\
& IF\{M_{BR}(t) = a_{BR/OX} OX(t); IF\{OX(t) < OX_{BR}^*; \\
& -OX_{BR}[1 - \exp(-\alpha_{OX}\tau)]; OX_{BR}[1 - \exp(-\beta_{OX}\tau)]\}; 0\} + \\
& IF\{M_{BR}(t) = a_{BR/BG} BG(t); IF\{BG(t) < BG_{BR}^*; \\
& -BG_{BR}[1 - \exp(-\alpha_{BG}\tau)]; BG_{BR}[1 - \exp(-\beta_{BG}\tau)]\}; 0\} \\
M_{BR}(t) = & \arg \min[a_{BR/OX} OX(t); a_{BR/ZP} ZP(t); a_{BR/BG} BG(t)],
\end{aligned} \tag{8}$$

$$A_{pp}(TW) = \exp[-\chi_{pp}(T - T_{pp})^2],$$

Описание операций лимитирования и учета зон гомеостазиса биологических объектов морской экосистемы в форме (5) – (8) включает в себя временные задержки на время роста живых организмов. Критические для развития организмов значения параметров экосистемы обозначены: SR^* , CD^* , PP^* , ZP^* , OX^* , BG^* , DT^* . Результаты вычислительных экспериментов с моделью приведены на рис.6.

Для построения сценариев процессов в экосистеме были заданы внешние влияния: годовой ход температуры верхнего слоя моря (кривая TW), освещенности его поверхности (кривая SR) и модуля скорости ветра у поверх-



Р и с . 6 . Сценарии процессов в морской экосистеме, полученные с учетом ресурсных ограничений процессов развития.

ности (кривая *WF*). Их графики показаны на рис.6, *а*. В качестве графика *TW* был имитирован средний многолетний ход температуры, тогда как для графиков освещенности и скорости ветра были использованы случайные вариации этих параметров около среднего многолетнего хода, которые имитировали влияние погодных условий.

Все моделируемые процессы были приведены к единой безразмерной шкале изменчивости [0;10]. Коэффициенты влияния в динамической модели экосистемы (4) выбирались в пределах сегмента значений [0,1; 0,5]. В серии экспериментов, результаты которых приведены на рис.6, *б – е*, проводился анализ влияния условий ресурсного лимитирования живых организмов, а также условий образования биогенов из детрита. Операции лимитирования, выполняемые агентами (5) – (8), демонстрируют графики на рис.6, *б – д*. В частности, на рис.6, *б* отчетливо видно, что сценарий концентрации биогенов формируется графиком агента управления *A_{BG}*, который выбирает минимальные значения из сценариев кислорода *OX* и детрита *DT*. В свою

очередь, как следует из рис.6, д, сценарий концентрации биогенов влияет на график агента A_{BR} , управляющего концентрацией биоресурса. Это заметно, например, в конце графика A_{BR} , когда концентрация биогенов оказалась ниже концентраций кислорода OX и зоопланктона ZP . Общая для большинства сценариев тенденция роста со временем обусловлена заданием большого по величине параметра задержки развития $\beta = 1,1$.

Сопоставляя между собой полученные сценарии процессов в экосистеме, можно сделать вывод о том, что учет ресурсных ограничений и зон гомеостаза кардинально меняет ход этих сценариев. Поэтому для нахождения баланса потребления и воспроизводства морских биоресурсов необходимо использовать агенты лимитирования в моделях экосистем прибрежной зоны моря. Частые переключения значений параметров уравнений модели экосистемы, выполняемые агентами управления, не нарушают сходимости решений этих уравнений в режиме адаптации к переменным внешним влияниям.

Системное моделирование экономических процессов потребления морских ресурсов. Наряду со стандартным представлением динамических уравнений морской экосистемы ABC -метод позволяет построить стандартизированные уравнения экономической модели потребления природных ресурсов $ПЗМ$. Основные процессы, характеризующие динамику экономической системы: выпуск и реализация готовой продукции, получение и возврат кредитов, приобретение и расходование ресурсов производства, также могут быть представлены в форме динамических уравнений ABC -метода с включением логических операторов (агентов) управления в правые части уравнений системы. Разработанная на основе ABC -метода информационная технология управления сценариями экономических процессов, получила название $ABC AGENT$ [3, 4]. Рассмотрим вкратце ее уравнения.

Обозначим через X_1 безразмерную переменную, представляющую спрос D на продукцию экономической системы $ПЗМ$. Тогда уравнение для функции спроса может быть записано в виде

$$\frac{dX_1}{dt} = X_1 \left[1 - 2(X_1 + a_{12}X_2 - a_{1F_1}F_D) \right], \quad (9)$$

где X_2 – безразмерная цена продукции p ; а F_D – внешнее влияние, задающее динамику спроса. Аналогичным путем представим уравнение для цены (X_2)

$$\frac{dX_2}{dt} = X_2 \left[1 - 2(X_2 + a_{23}X_3) \right] \quad (10)$$

и уравнение для безразмерной себестоимости продукции e (X_3)

$$\frac{dX_3}{dt} = X_3 \left[1 - 2 \left(X_3 - \sum_{i=1}^n y_i r_i - Q \right) \right], \quad (11)$$

где r_i – стоимости ресурсов; Q – добавленная стоимость.

Обозначим через H количество готовой к реализации продукции, через S – объем ее реализации за единицу времени (например, за одни сутки), через V – выпуск продукции за это же время. Уравнение динамики объемов готовой продукции принимает вид

$$\frac{dH}{dt} = H [1 - 2(H - V + S)], \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S &= IF(p < e; 0; R), \quad R = IF(D < H; D; H), \\ V &= IF(D < H; 0; M), \quad M = IF(D - H < M; D - H; M), \\ M &= \min(m_1, m_2, \dots, m_n), \quad m_i = H_{1i}/y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), \end{aligned}$$

где H_{1i} – объемы имеющихся ресурсов производства; y_i – количества ресурсов каждого вида, необходимые для производства единичной продукции.

Аналогичным образом могут быть представлены уравнения динамики и логические операторы управления запасами ресурсов производства H_{1i} и его оборотных средств H_2 [3, 4]:

$$\frac{dH_{1i}}{dt} = H_{1i} [1 - 2(H_{1i} - V_{1i} + S_{1i})] \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{где} \quad V_{1i} &= IF\{D - H_{1i} < 0; 0; IF[y_i(D - H) < H_{1i}; 0; U_{1i}]\}, \\ U_{1i} &= IF\{y_i(D - H) - H_{1i} < \rho_i H_2 / r_i; y_i(D - H) - H_{1i}; \\ &\quad IF[\rho_i(H_3^* - H_3) < 0; 0; U_{1i}^*]\}, \\ S_{1i} &= IF\{D - H < 0; 0; IF[y_i(D - H) < H_{1i}; y_i(D - H); H_{1i}]\}; \end{aligned}$$

$$\frac{dH_2}{dt} = H_2 \left[1 - 2 \left(H_2 - pS + \sum_{i=1}^n S_2^i + S_3 + \chi H_2 \right) \right], \quad (13)$$

$$\text{где} \quad S_2^i = IF[r_i y_i(D - H) - H_{1i}^i < \rho_i H_2; r_i y_i(D - H) - H_{1i}^i; \rho_i H_2],$$

$$S_3 = IF[\theta H_3 < H_2; \theta H_3; H_2], \quad \rho_i = \frac{r_i y_i}{r_1 y_1 + \dots + r_n y_n} \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

χ – процент извлекаемых из оборота средств, т.е. чистая прибыль системы;
 θ – процент погашения накопленного кредита.

Обозначим объемы приобретаемых в кредит ресурсов через $V_{11}, \dots, V_{1n}$. Тогда уравнение для накопленного кредита H_3 принимает вид [3, 4]

$$\frac{dH_3}{dt} = H_3 \left[1 - 2 \left(H_3 - \sum_{i=1}^n r_i V_{1i} + S_3 \right) \right], \quad (14)$$

$$\text{где} \quad V_{1i} = IF[(D - H)y_i < H_{1i}; 0; F_i],$$

$$F_i = IF[r_i(y_i D - H_{1i}) < \rho_i H_2; y_i D - H_{1i}; F_i^*], \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Функции U_{1i}^* и F_i^* в уравнениях (12) и (14) представляют собой управления, которые ограничивают объемы ресурсов, приобретаемых в кредит.

Рентабельность производства определяется отношением доходов, получаемых за определенный интервал времени, к суммарным расходам за этот интервал:

$$\varphi = \ln \frac{pS + 1}{10 + \sum_{i=1}^3 S_2^i + S_3 + \chi H_2}. \quad (15)$$

Формула (15) позволяет выполнять операции оценки рентабельности потребления ресурсов *ПЗМ*, отмеченные на общей схеме управления развитием, изображенной на рис.1. Примеры использования *АВС*-модели экономической системы (9) – (15) будут приведены ниже.

Оценка экологического состояния природной среды в прибрежной зоне моря. Для контроля за состоянием природной среды, предусмотренного общей схемой управления на рис.1, могут быть использованы два интегральных критерия: индекс биоразнообразия морской среды и уровень загрязнения ее веществами, вредными для морских организмов. В качестве индекса биоразнообразия будем использовать взвешенную сумму концентраций основных гидробионтов конкретной прибрежной зоны моря Br_i , осредненных по акватории этой зоны:

$$Bd = \sum_{i=1}^N g_i Br_i . \quad (16)$$

Предположим, что известна средняя многолетняя изменчивость этого индекса, формируемая, например, среднемесячными нормами концентраций основных элементов трофической цепи, характерной для данной зоны моря Br_{im} . Текущие значения индекса для каждого конкретного года претерпевают отклонения от средней многолетней изменчивости. В качестве основных факторов, формирующих эти отклонения, выступают внешние влияния на морскую экосистему: погодные условия (вариации температуры воздуха, модуля скорости ветра, освещенности относительно соответствующих средних многолетних значений) и антропогенное воздействие (вынос в море загрязняющих веществ с суши, аварии морских судов и др.).

Концентрация загрязнений Pl играет существенную роль в формировании значения индекса биоразнообразия. Для того чтобы учесть в модели процесс восстановления индекса биоразнообразия до заданного уровня путем природоохранных действий, в уравнение для индекса Bd должен быть включен агент управления $A(Bd, Bd_m)$. Поэтому динамическое уравнение индекса биоразнообразия имеет вид

$$\frac{dBd}{dt} = Bd \left\{ 1 - 2 \left[Bd + a_{Bd/Pl} Pl - A(Bd, Bd_m) \right] \right\}, \quad (17)$$

$$A(Bd, Bd_m) = IF \left[Bd > Bd_m; 0; a_{Br/y_2} y_2 \left(1 - e^{-\alpha_{Bd} \tau} \right) \right].$$

Параметр $a_{Br/y_2} y_2$ определяет степень влияния на индекс биоразнообразия тех средств, которые экономическая система прибрежной зоны выделяет на природоохранные действия, а параметр α_{Bd} задает скорость роста этого индекса.

Средний по рассматриваемой акватории *ПЗМ* уровень загрязнений интегрально может быть представлен как взвешенная сумма концентраций основных видов загрязняющих веществ Pl_i , характерных для этой зоны:

$$Pl = \sum_{i=1}^M h_i Pl_i . \quad (18)$$

Обозначим среднемесячные многолетние значения этого параметра Pl_m . Текущие среднемесячные значения концентрации загрязнений морской среды Pl можно сравнить в уравнении для Pl со средними многолетними нормами

Pl_m , в результате чего агент, который будет обозначен через $A(Pl, Pl_m)$, должен имитировать необходимый объем природоохранных действий.

Примем, что уровень загрязнений пропорционален хозяйственной активности в ПЗМ и, в частности, – объему производимых товаров или услуг. Динамика уровня загрязнений должна учитывать естественное самоочищение морской среды $a_{Pl/S}Pl$, а также влияние природоохранных мероприятий, моделируемое агентом $A(Pl, Pl_m)$. С учетом сделанных предположений динамика уровня загрязнений описывается уравнением

$$\frac{dPl}{dt} = Pl \left\{ 1 - 2 \left[Pl - a_{Pl/S}S + a_{Pl}Pl + A(Pl, Pl_m) \right] \right\}, \quad (19)$$

$$A(Pl, Pl_m) = IF \left[Pl < Pl_m; 0; a_{Pl_m}Pl \left(1 - e^{-\alpha_{Pl_m}\tau} \right) \right].$$

Управление сценариями потребления рекреационных ресурсов в адаптивной модели эколого-экономической системы прибрежной зоны моря. Теперь, располагая всеми элементами схемы поддержки принятия решений по управлению процессами развития, изображенной на рис.1, рассмотрим в качестве примера задачу управления рекреационными ресурсами ПЗМ [5]. Целью управления является нахождение экологически оправданных объемов предоставления рекреационных услуг, при которых уровни загрязнения окружающей природной среды не превосходят предельно допустимых значений. В целях упрощения мы ограничимся только одним экологическим параметром состояния экосистемы ПЗМ – интегральным уровнем загрязнения PL .

Задача управления заключается в том, чтобы экономическая система рекреации выделяла часть своей прибыли на проведение природоохранных действий в таких объемах, которые достаточны для компенсации вредного влияния на природную среду. Концептуальная модель эколого-экономической системы потребления рекреационных ресурсов, реализующая эту идею, показана на рис.7.

Рекреационный потенциал ПЗМ Q определяет ее рекреационную привлекательность RA и одновременно формирует стоимость рекреационной услуги P , под которой будем подразумевать отдых по путевке на определенное время. Спрос на услуги обозначим D . С ростом объема услуг V увели-

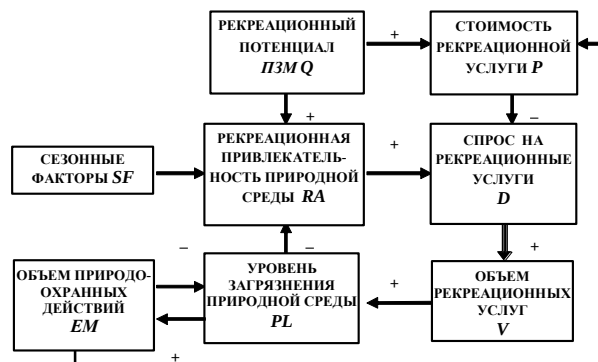


Рис.7. Концептуальная модель баланса объемов потребления рекреационных ресурсов и природоохранных действий.

чивается загрязнение окружающей среды PL , для борьбы с которым необходимы природоохранные действия EM , финансируемые экономической системой из своей прибыли. Зависимость рекреационной привлекательности от погодных факторов задана внешней влияющей функцией SF . Контроль за уровнем загрязнения осуществляет агент $A(PL_c, I_{PL})$.

ABC -модель, соответствующая рис.7, отражает динамический баланс потребления рекреационных ресурсов:

$$\begin{aligned}\frac{dRA}{dt} &= RA[1 - 2(RA + a_{RA/PL} PL - a_{RA/SF} SF)], \\ \frac{dPL}{dt} &= PL[1 - 2(PL + a_{PL/EM} EM - a_{PL/S} S)], \\ \frac{dP}{dt} &= P[1 - 2(P - a_{P/Q} Q - a_{P/EM} EM)], \\ \frac{dEM}{dt} &= EM\{1 - 2[EM - A(PL_c, I_{PL})]\}, \\ \frac{dD}{dt} &= D[1 - 2(D - a_{D/RA} RA + a_{D/P} P)], \\ S &= F(D, H_2, H_3^*, \varphi), \\ A(PL_c, I_{PL}) &= IF[PL < PL_c; 0; a_{PL} I_{PL} (1 - e^{-\alpha_{PL} \tau})].\end{aligned}\tag{20}$$

Для построения модели экономических процессов рекреации была использована адаптивная модель (9) – (15). С помощью модели баланса природопользования (20) были проведены имитационные эксперименты по поддержке решений о выделении средств экономической системы на проведение природоохранных мероприятий. Задача заключалась в том, чтобы найти такой вариант распределения доходов от предоставления рекреационных услуг, при котором уровень загрязнения экосистемы $ПЗМ$ не превышает предельно допустимых значений. Вычислительные эксперименты были проведены на 500 безразмерных шагов по времени (суток), в ходе которых изучалась реакция модели на принятие возможных административных решений.

В проведенных экспериментах стоимость рекреационной услуги сохранялась постоянной. В первом эксперименте, результаты которого приведены на рис.8, экономической системе рекреации была предоставлена возможность изымать из оборота 20 % средств в качестве чистой прибыли.

Система приобретала кредиты на покупку ресурсов, причем скорость погашения накопленного кредита составляла 5 % на каждом шаге. Объем средств I_{PL} , выделяемых на борьбу с загрязнением, был функционально связан с уровнем загрязнений PL и величиной оборотных средств H_2 следующим образом: $I_{PL} = 0,05(PL)H_2$. По мере ухудшения экологической ситуации агент $A(PL_c, I_{PL})$ увеличивал стоимость экологического ресурса. Кроме того, выделение кредитов (лицензий) на потребление ресурсов контролировал агент

$$H_3^* = IF[PL < PL_c; H_3^*; H_3^* e^{-\alpha_{PL} \tau}].$$

В уравнении для рекреационной привлекательности RA была учтена сезонная изменчивость этого фактора. С этой целью в уравнение для RA была

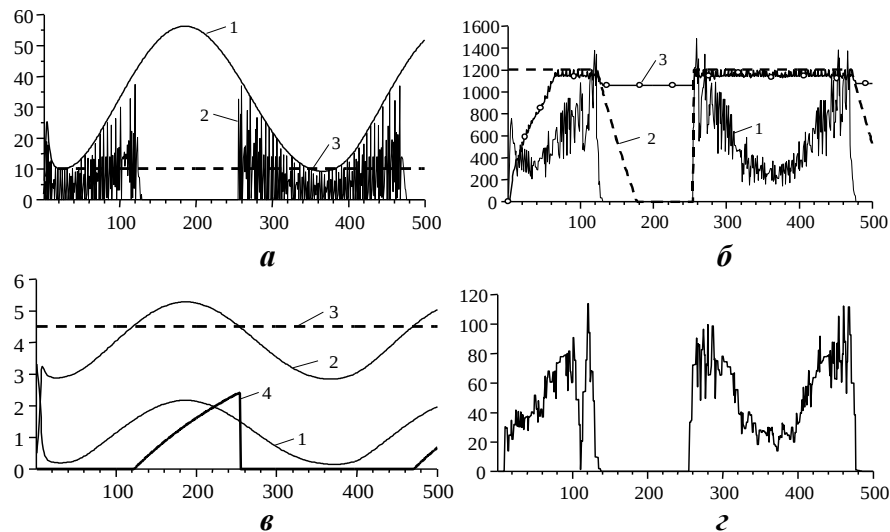


Рис. 8. (а) 1 – спрос D , 2 – реализация рекреационных услуг S , 3 – стоимость рекреационной услуги p ; (б) 1 – оборотные средства H_2 , 2 – предельно допустимый кредит H_3^* , 3 – накопленный кредит H_3 ; (в) 1 – рекреационная привлекательность RA , 2 – уровень загрязнения PL , 3 – предельно допустимый уровень загрязнения PL_c , 4 – необходимый объем природоохранных действий EM ; (г) средняя за 10 суток рентабельность потребления рекреационных ресурсов φ .

добавлена влияющая функция $SF_{RA/SF} = \sin(0,18t + 10,8)$, которая в основном определяла спрос на рекреационные услуги.

Этот спрос, а вместе с ним и загрязнение природной среды, значительно возрастали летом за счет сезонных факторов. По мере приближения уровня загрязнения к предельно допустимому значению (рис.8, в) агенты управления существенно ограничивали кредитование и повышали себестоимость рекреационных услуг. В результате предоставление услуг было приостановлено до того времени (260 шаг), когда уровень загрязнения окружающей среды был снижен до допустимой нормы.

Динамика оборотных средств рекреации представлена на рис.8, б. На этом же рисунке показана предельно допустимая величина кредита, накапливаемого экономической системой: $H_3^* = 1200$. Система рекреации использовала получение кредитов на приобретение ресурсов, начиная с первого шага расчетов, и к 70 шагу величина накопленного кредита достигла своего предельного значения. Средняя за 10 суток рентабельность потребления рекреационных ресурсов φ показана на рис.8, г, из которого следует, что в период времени со 120 по 250 шаг вычислений производство рекреационных услуг становилось нерентабельным в виду высокого уровня загрязнения окружающей среды.

Во втором вычислительном эксперименте была увеличена зависимость рекреационной привлекательности $ПЗМ$, а, следовательно, и спроса на рекреационные услуги, от уровня загрязнения природной среды. Одновременно были усилены экономические санкции за превышение предельно допустимого уровня загрязнения. Сценарии процессов, прогнозируемые по модели, показаны на рис.9.

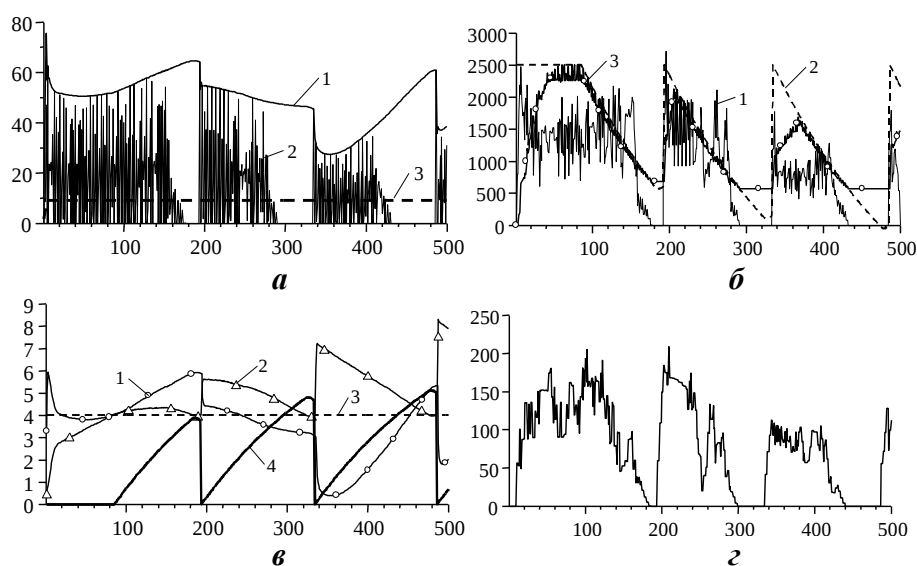


Рис. 9. (а) 1 – спрос D , 2 – реализация рекреационных услуг S , 3 – стоимость рекреационной услуги p , (б) 1 – оборотные средства H_2 , 2 – предельно допустимый кредит H_3^* , 3 – накопленный кредит H_3 , (в) 1 – рекреационная привлекательность RA , 2 – уровень загрязнения PL , 3 – предельно допустимый уровень загрязнения PL_c , (г) Средняя за 10 суток рентабельность потребления рекреационных ресурсов φ .

В этом эксперименте экономическая система должна была дополнительно выделять часть своей чистой прибыли, ранее составлявшей 20 % от оборотных средств, на понижение уровня загрязнения окружающей среды. Выделяемая часть прибыли была связана со значениями функции агента управления, следившего за превышением предельно допустимого уровня загрязнения ($PL_c = 4$). Как следует из рис.9, уровень рекреационной привлекательности (см. рис.9, в, сценарий 2), а следом за ней и спрос на рекреационные услуги (рис.9, а, кривая 1), стали зависеть от в основном не от сезонных факторов, а от уровня загрязнения (рис.9, в, кривая 2). Функция агента управления природоохранной деятельностью (рис.9, в, кривая 4) испытывала значительную изменчивость под влиянием высокого уровня загрязнения. В свою очередь, экономическая система была вынуждена выделять существенную часть своих оборотных средств (рис.9, б, кривая 1) на борьбу с загрязнением. В те периоды времени, когда уровень загрязнения превышал предельно допустимые значения, агент кредитования понижал предельную величину накопленного кредита (рис.9, б, кривая 2). Принятые экономические санкции привели к временному сокращению объемов рекреационных услуг в те периоды времени, когда их предоставление становилось нерентабельным (рис.9, а, г).

Вычислительные эксперименты с адаптивной моделью эколого-экономической системы рекреации (9) – (20) показали высокую чувствительность прогнозируемых сценариев процессов к изменениям параметров агентов управления в уравнениях модели. Таким образом, модель обеспечивала прогнозы таких сценариев распределения средств, получаемых от использо-

вания рекреационных и экологических ресурсов *ПЗМ*, которые одновременно удовлетворяют условиям экономической рентабельности производства рекреационных услуг и критерию уровня загрязнения природной среды.

Заключение. Системная методология управления развитием предлагает общую схему построения информационных технологий компьютерной поддержки административных решений по использованию ресурсов прибрежной зоны моря для достижения целей устойчивого развития. В основе информационной технологии поддержки решений лежат адаптивные модели интегральных эколого-экономических систем. Подобные *АВС*-модели представляют собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений логистического типа, которые содержат логические операторы управления в своих правых частях и обладают быстрой сходимостью к решениям при переменных внешних воздействиях. Полученные нами примеры сценариев процессов в морской экосистеме, формируемые агентами лимитирования ресурсов живых организмов, подтверждают эти свойства. Адаптивная модель экономических процессов, использованная в задаче управления рекреационными ресурсами по критерию уровня загрязнения окружающей среды, позволила связать сценарии рентабельности предоставления рекреационных услуг с уровнем загрязнения природной среды и выделением средств на природоохранные действия. Поэтому рассмотренные в настоящей работе *АВС*-модели эколого-экономических систем могут лежать в основе информационных технологий поддержки административных решений по использованию ресурсов прибрежной зоны моря, сохраняющих рациональный баланс природопользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Handbook for measuring the progress and outcomes of integrated coastal and ocean management* // IOC Manuals and Guides, 46. ICAM Dossier, 2.— Paris: UNESCO, 2006.— 160 p.
2. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М. Системный анализ ресурсных свойств природной среды // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.— вып.14.— С.60-85.
3. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и *АВС*-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.— 527 с.
5. Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е. Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.— 259 с.
6. Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Моделирование эколого-экономических систем.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.— 320 с.

Материал поступил в редакцию 16.10.2010 г.