

## Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря

Рассмотрены интегральные динамические модели эколого-экономических систем прибрежной зоны моря, ориентированные на установление баланса потребления и воспроизводства морских биоресурсов. Для построения моделей использован системный подход, при котором экономические цели потребления биоресурсов ставятся в зависимость от экологического состояния морской среды. Приведены примеры управления балансом эколого-экономических процессов с использованием интегральных критериев биоразнообразия и уровня загрязнения морской среды. Показано, что информационная технология управления сценариями эколого-экономических процессов позволяет оценивать рентабельность производства морепродуктов при условии использования части прибыли для сохранения морских биоресурсов.

**Ключевые слова:** прибрежная зона моря, эколого-экономическая система, интегральная модель.

### Введение

Прибрежная зона моря (ПЗМ) представляет собой сложную социальную эколого-экономическую систему, развитие которой в значительной степени определяется рациональным использованием морских биологических, минеральных и рекреационных ресурсов. Управление устойчивым развитием ПЗМ должно быть основано на последовательном (поэтапном) выборе таких сценариев процессов, характеризующих динамику основных видов ресурсов ПЗМ, которые одновременно удовлетворяют как критериям экономического роста производства товаров и услуг, так и критериям экологического состояния природной среды. Нахождение рационального баланса эколого-экономических процессов развития является чрезвычайно сложной проблемой, требующей системного подхода к ее решению [1 – 4].

В ряде исследований была предложена системная методология управления устойчивым развитием эколого-экономических систем типа море – суша, к которым относятся природно-хозяйственные комплексы ПЗМ [5 – 7]. Главный акцент в упомянутых исследованиях был сделан на простых в реализации методах создания компьютерных моделей эколого-экономических систем ПЗМ, которые позволяют прогнозировать сценарии процессов развития при различных вариантах хозяйственного использования природных ресурсов. Подобные ресурсно-ориентированные сценарии развития должны оказывать поддержку административным органам управления ПЗМ, осуществляющим контроль за использованием морских ресурсов.

В настоящей работе рассматриваются вопросы построения ресурсно-ориентированных сценариев природопользования в прибрежной зоне моря, основанных на балансе потребления и воспроизводства морских биоресурсов. Концепции системного анализа служат для построения интегральной модели

управления природоохранной деятельностью, целью которой является сохранение нормальных условий для воспроизводства биоресурсов [8].

### **Применение системной методологии для моделирования баланса потребления и воспроизводства морских биоресурсов**

Системная методология, структура которой изображена на рис. 1, включает в себя как философию управления развитием (системный подход), так и практические рецепты построения информационных технологий поддержки принимаемых решений (системный анализ). Она базируется на шести принципах. Принцип неопределенности целей учитывает условный характер любых целевых установок развития, формулируемых на первом этапе построения информационной технологии управления, и декларирует необходимость постоянного уточнения целей по мере получения новой информации. Принципы целостности, причинности и подчиненности формулируют второй этап, который заключается в отборе наиболее важных с точки зрения поставленных целей процессов развития, анализе взаимосвязей между ними и построении концептуальной модели системы – диаграммы причинно-следственных связей. Принцип динамического баланса обеспечивает третий этап: перевод концептуальной модели системы в модель динамическую и ввод ее в компьютер для получения прогностических сценариев развития. Принцип информационного единства теории и эксперимента постулирует необходимость включения в компьютерную модель системы данных текущих наблюдений над процессами развития. На нем базируется четвертый этап построения информационной технологии управления, когда компьютерная модель системы адаптируется к данным наблюдений реальных процессов развития и позволяет выбрать наиболее эффективные сценарии управления развитием. Таким образом, системная методология управления организует такое движение к цели, при котором последовательно применяются системные принципы, системное мышление и построенные на их основе технологии системного моделирования и управления.

Системные принципы формулируют аксиоматику построения информационных технологий для постановки и достижения целей развития, отвечающих рациональному использованию имеющихся ресурсов. Последовательное применение системных принципов при построении моделей управляемой системы и принятии решений по использованию ресурсов развития является предметом системного мышления [7].

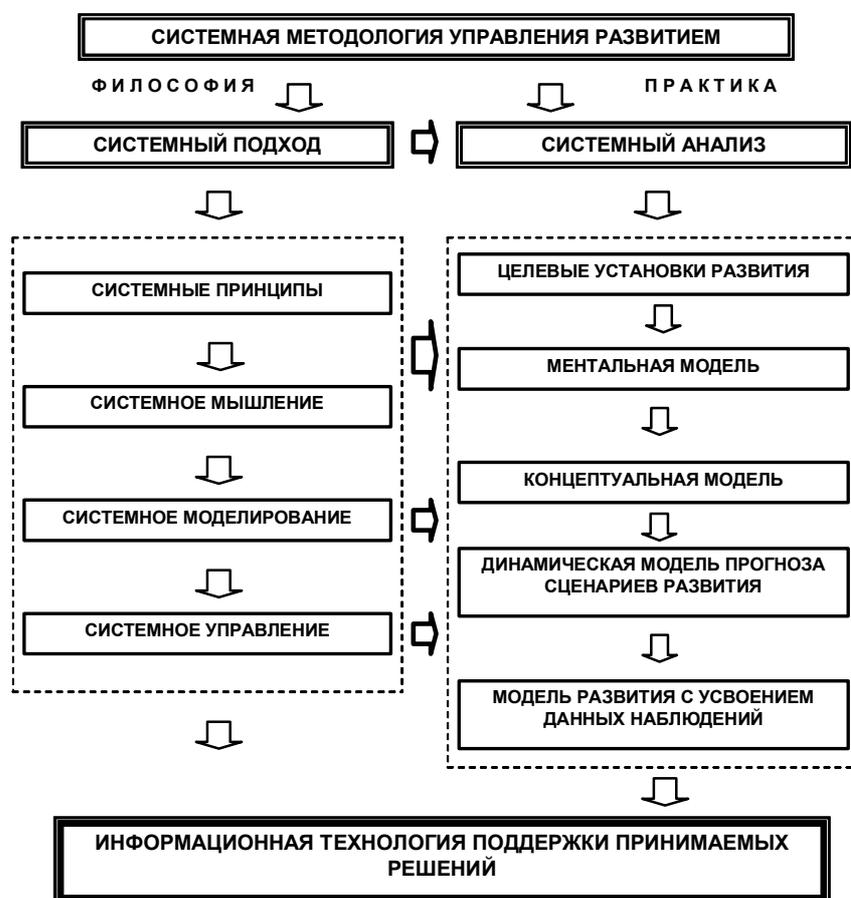
Одним из несомненных достоинств предложенной системной методологии является обоснование относительно простого метода построения динамических моделей сложных систем, получившего название «метод адаптивного баланса влияний» (*ABC*-метод) [6]. В соответствии с принципом динамического баланса, который постулирует стремление сложной системы к динамическому равновесию с переменными внешними силами, при создании метода удалось предложить универсальную *ABC*-модель системы  $n$  взаимосвязанных процессов развития  $x_i$ , которая имеет следующий вид:

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

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

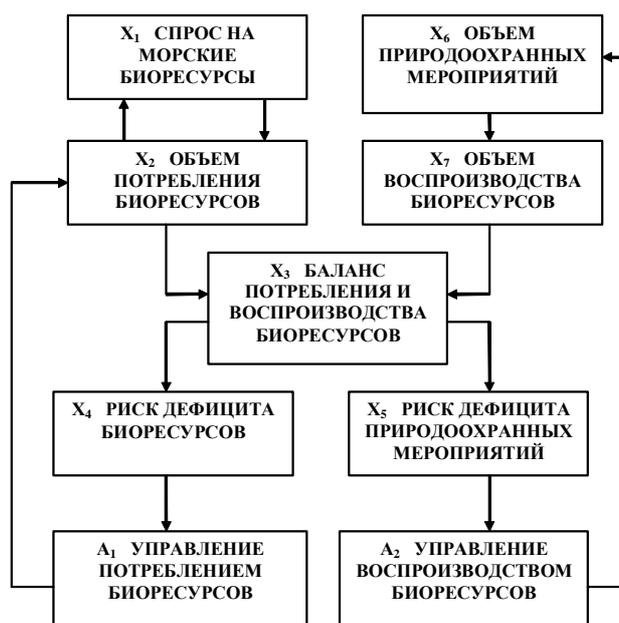
(k, l ≠ i),

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 итерационных схем их решения при произвольных начальных условиях [6, 7].



Р и с. 1. Диаграмма системной методологии управления развитием

В качестве примера использования системной методологии управления рассмотрим задачу нахождения баланса между объемами потребления морских биоресурсов и объемами их воспроизводства в прибрежной зоне моря. Этот баланс, поддерживаемый с помощью природоохранных мероприятий, может быть представлен концептуальной моделью эколого-экономической системы, приведенной на рис. 2. В соответствии с поставленной целью в структуру модели включены следующие переменные:  $x_1$  – спрос на морские биоресурсы,  $x_2$  – объем потребления биоресурсов,  $x_3$  – баланс потребления и воспроизводства биоресурсов, характеризуемый значением концентрации биоресурсов в море,  $x_4$  – риск дефицита концентрации биоресурсов,  $x_5$  – риск дефицита природоохранных мероприятий,  $x_6$  – объем проводимых природоохранных мероприятий,  $x_7$  – объем воспроизводства концентрации биоресурсов.



Р и с. 2. Концептуальная модель эколого-экономической системы прибрежной зоны моря

Баланс потребления и воспроизводства морских биоресурсов характеризуется в этой модели одним интегральным параметром – концентрацией биоресурса  $x_3$ . Процесс  $x_3$  находится под воздействием двух противоположно направленных тенденций. С одной стороны, на него оказывают негативное влияние потребление биоресурсов  $x_2$  в интересах обеспечения экономической системы производства и связанное с ним загрязнение морской среды. С другой стороны, положительные изменения в экологическом состоянии происходят благодаря проведению природоохранных мероприятий, объем которых обозначен как  $x_6$ .

Исходя из концепций системного мышления, для обеспечения баланса этих тенденций в модели эколого-экономической системы должны присутствовать

зовать замкнутые цепочки положительных и отрицательных обратных связей, уравновешивающих друг друга. Это условие достигается, например, включением процессов, характеризующих риск дефицита биоресурсов  $x_4$  и риск дефицита природоохранных мероприятий  $x_5$ . Для управления балансом биоресурсов в цепочки обратных связей включены агенты управления  $A_1$  и  $A_2$ , контролирующие их потребление и воспроизводство.

Используя *ABC*-метод (см. систему уравнений (1)) и схему взаимных влияний в концептуальной модели, получим следующие динамические уравнения для безразмерных процессов формальной эколого-экономической модели:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_1[1 - 2(x_1 - a_{12}x_2 - F_1)], & \frac{dx_2}{dt} &= x_2\{1 - 2[x_2 - a_{21}x_1 - A_1(x_4)]\}, \\ \frac{dx_3}{dt} &= x_3[1 - 2(x_3 + a_{32}x_2 - a_{37}x_7)], & \frac{dx_4}{dt} &= x_4[1 - 2(x_4 + a_{43}x_3)], & (3) \\ \frac{dx_5}{dt} &= x_5[1 - 2(x_5 + a_{53}x_3)], & \frac{dx_6}{dt} &= x_6\{1 - 2[x_6 - A_2(x_5)]\}, \\ & & \frac{dx_7}{dt} &= x_7[1 - 2(x_7 - a_{76}x_6)]; \\ \frac{da_{12}}{dt} &= a_{12}\{1 - 2[a_{12} - R_{22}^{-1}(R_{12} - G_{12})]\}, & \frac{da_{43}}{dt} &= a_{43}[1 - 2(a_{43} + R_{33}^{-1}R_{43})], \\ \frac{da_{21}}{dt} &= a_{21}[1 - 2(a_{21} - R_{11}^{-1}R_{12})], & \frac{da_{53}}{dt} &= a_{53}[1 - 2(a_{53} + R_{33}^{-1}R_{53})], & (4) \\ \frac{da_{32}}{dt} &= a_{32}\{1 - 2[a_{32} - R_{22}^{-1}(a_{37}R_{72} - R_{32})]\}, & \frac{da_{76}}{dt} &= a_{76}[1 - 2(a_{76} - R_{66}^{-1}R_{76})], \\ & & \frac{da_{37}}{dt} &= a_{37}\{1 - 2[a_{37} - R_{77}^{-1}(a_{32}R_{27} + R_{37})]\}. \end{aligned}$$

При наличии временных рядов наблюдений (архивные данные) над процессами, включенными в модель, с применением системы уравнений (4) можно найти объективную оценку всех коэффициентов модели.

Установим предельно допустимую величину риска дефицита морских биоресурсов, понимая под этой величиной такое состояние морской экосистемы, которое может привести к необратимым последствиям в количественном или качественном составе биоресурсов. Интегральной характеристикой этого риска может служить индекс биоразнообразия морской среды, значение которого понижается по мере роста величины риска. Обозначим предельно допустимую величину дефицита через  $x_4^*$ . Агент управления  $A_1$  должен следить за величиной  $x_4$ , чтобы уровень риска дефицита биоресурсов не превышал предельно допустимого значения  $x_4^*$ . При наступлении этого состояния потребление биоресурсов должно быть ограничено. Поэтому, учитывая

свойства уравнений ABC-метода, для агента управления  $A_1$  целесообразно выбрать следующее представление:

$$A_1(x_4, x_4^*) = IF[x_4^* > x_4; a_{24}x_4e^{-\alpha_1\tau_1}; b_{24}(1 - e^{-\alpha_2\tau_2})]. \quad (5)$$

Аналогичные рассуждения позволяют обосновать выбор второго агента управления  $A_2$  в модели. Дефицит природоохранной деятельности проявляется прежде всего в увеличении уровня загрязнения морской среды веществами, негативно влияющими на концентрацию биоресурсов. Поэтому уровень загрязнения может служить интегральной характеристикой дефицита природоохранной деятельности  $x_5$ . Величина  $x_5$  не должна достигать критической величины  $x_5^*$ , выше которой мероприятия по восстановлению концентрации биоресурсов становятся бесполезными. Поэтому формальное представление агента  $A_2$  должно быть следующим:

$$A_2(x_5, x_5^*) = IF[x_5^* < x_5; a_{65}x_5e^{-\alpha_3\tau_4}; b_{65}(1 - e^{-\alpha_4\tau_4})]. \quad (6)$$

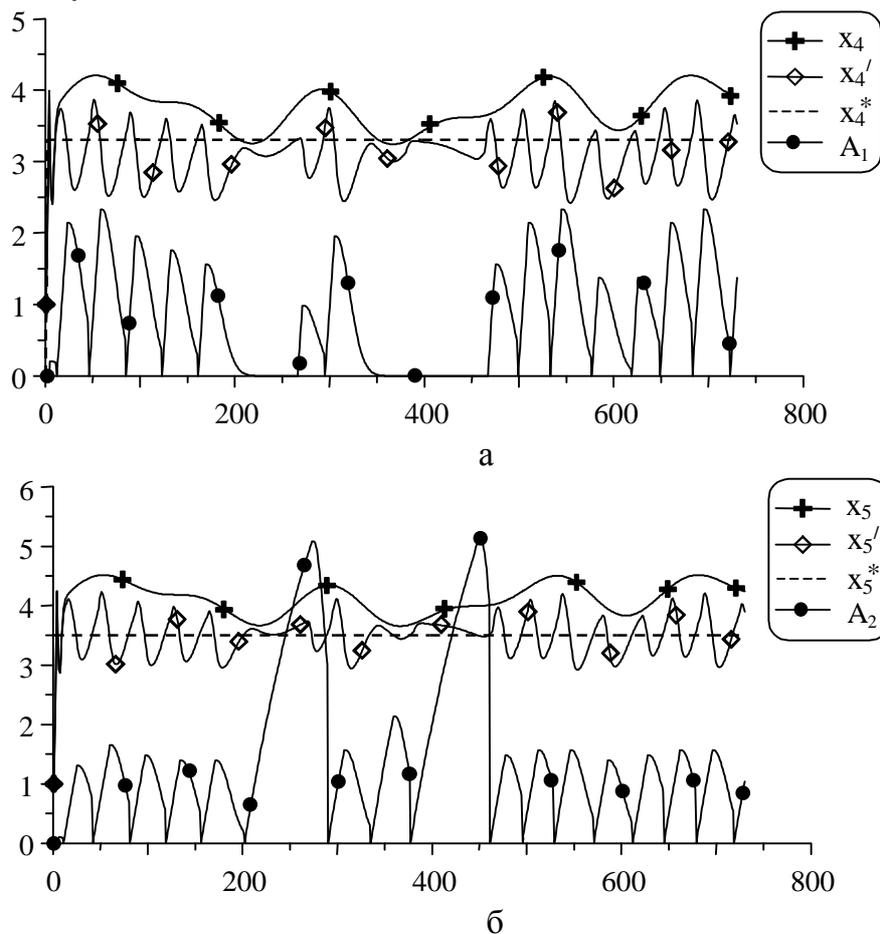
Коэффициенты  $b_{24}$ ,  $b_{65}$ ,  $\alpha_1 - \alpha_4$  позволяют выбирать интенсивности и скорости, с которыми агенты влияют на процессы развития в системе и таким путем обеспечивают управление балансом природопользования.

#### **Имитационные эксперименты с ABC-моделью эколого-экономической системы**

Для получения реакции модели (3), (5), (6) на внешние влияния был имитирован переменный по времени спрос на морской биоресурс и заданы коэффициенты влияния процессов друг на друга. Их величины были подобраны таким образом, чтобы баланс потребления и воспроизводства морских биоресурсов заметно отражался на величинах рисков дефицита биоресурсов и дефицита природоохранных мероприятий. Для удобства сопоставления между собой сценариев процессов была выполнена нормировка их на средние значения процессов, после чего они были приведены к общей шкале изменчивости 0 – 10 безразмерных единиц. Расчеты проведены на 730 сут (шагов по времени). Была поставлена задача: ограничивать потребление биоресурсов, когда риск дефицита ресурсов достигает величины  $x_4^* = 3,3$ . Сценарии процессов в системе, вызванные имитированными случайными колебаниями спроса на биоресурсы, приведены на рис. 3.

Имитированный сценарий риска чрезмерно высокого потребления биоресурсов, вызванный высоким уровнем спроса, превышал пороговое значение риска, равное 3,3. На рис. 3, а показаны сценарии управления потреблением ресурсов, которые генерировал агент  $A_1$ . Управляющие воздействия должны были включаться всякий раз, когда кривая риска пересекала снизу прямую линию  $x_4^* = 3,3$ , и выключаться, когда это пересечение происходило сверху. Как следует из рисунка, управление объемами потребления биоре-

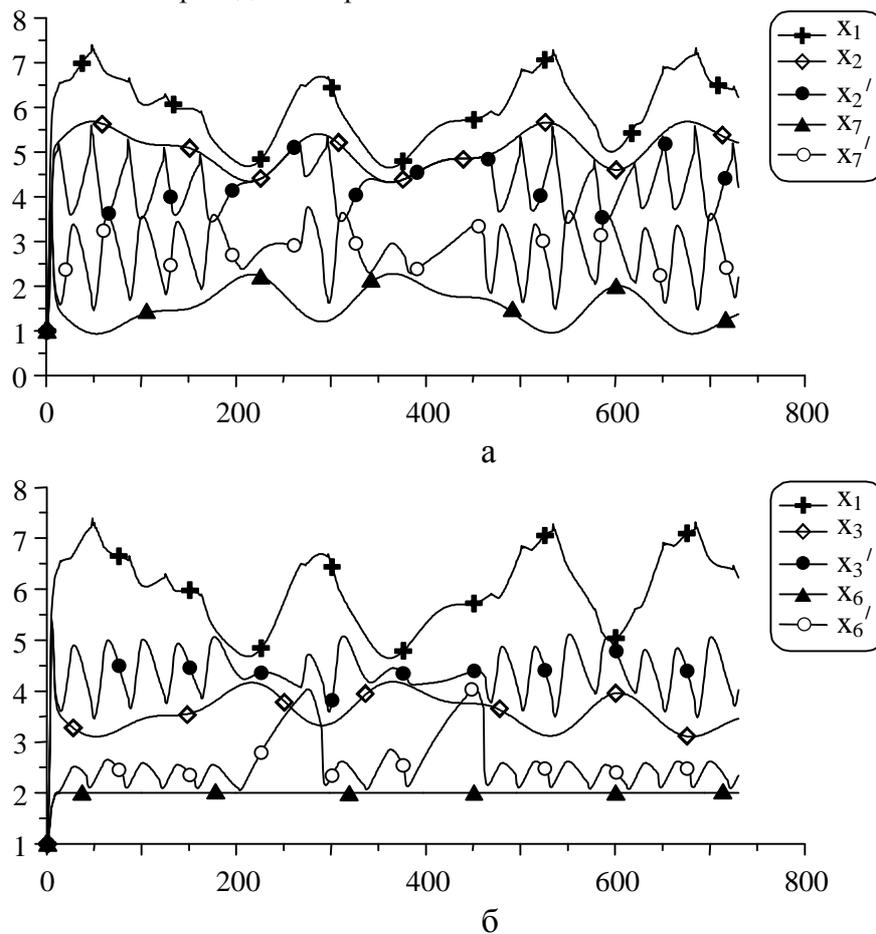
курсов привело к снижению уровня риска их дефицита, среднее значение которого опустилось ниже отметки 3,3.



**Р и с. 3.** Управление рисками дефицита биоресурсов и природоохранных мероприятий в морской экосистеме: *а* – уровень риска дефицита биоресурсов (при норме 3,3) до управления ( $x_4$ ), после управления ( $x_4'$ ), критический уровень риска дефицита биоресурсов ( $x_4^*$ ), функции агента, ограничивающего потребление биоресурсов ( $A_1$ ); *б* – уровень риска дефицита природоохранных мероприятий (при норме 3,5) до управления ( $x_5$ ), после управления ( $x_5'$ ), критический уровень риска дефицита природоохранных мероприятий ( $x_5^*$ ), функции агента, усиливающего объем природоохранных мероприятий ( $A_2$ )

Агент  $A_2$  следил за тем, чтобы угроза дефицита природоохранных мероприятий не превышала величины  $x_5^* = 3,5$ . Сценарий риска дефицита и управляющие воздействия со стороны агента  $A_2$  показаны на рис. 3, *б*. Обращают на себя внимание два периода значительного усиления природоохранной деятельности, прогнозируемые моделью на периоды 200 – 300-е и 390 – 460-е сутки. Более активная реакция на дефицит природоохранных мероприятий позволила уменьшить риск дефицита биоресурсов в эти периоды времени (рис. 3, *а*).

Результаты управления ресурсно-ориентированными сценариями процессов в системе приведены на рис. 4.



**Р и с. 4.** Сценарии процессов в системе управления балансом потребления и воспроизводства морских биоресурсов: *а* – спрос на биоресурсы с учетом управления ( $x_1$ ), объемы потребления без управления ( $x_2$ ), объемы потребления с управлением ( $x_2'$ ), объемы воспроизводства без управления ( $x_7$ ), объемы воспроизводства с управлением ( $x_7'$ ); *б* – спрос на биоресурсы с учетом управления ( $x_1$ ), концентрация биоресурсов без управления ( $x_3$ ), концентрация биоресурсов с управлением ( $x_3'$ ), объемы природоохранной деятельности без управления ( $x_6$ ), объемы природоохранной деятельности с управлением ( $x_6'$ )

Кривая риска дефицита биоресурсов ( $x_4$  на рис. 3, *а*) качественно повторяет кривую спроса на биоресурсы ( $x_1$  на рис. 4, *а*). Сравнивая ее с кривой спроса после проведения операций управления (рис. 4, *а*, *б*), можно видеть, что управление состоянием экосистемы отразилось на значениях спроса, который стал более изменчивым. Сравнение сценариев  $x_2$  и  $x_2'$  на рис. 4, *а* показывает, насколько уменьшился уровень потребления биоресурсов по сравнению с ситуацией, которая имела бы место без управления системой.

Аналогичные выводы следуют из результатов сопоставления уровней воспроизводства биоресурсов в вариантах расчетов без управления (кри-

вая  $x_7$ ) и при его наличии (кривая  $x'_7$ ) (рис. 4, а). Уровень воспроизводства стал существенно выше, хотя и приобрел характер процесса, колеблющегося около некоторого среднего значения. Эти колебания объясняются отклонениями баланса потребления и воспроизводства биоресурсов  $x_3$  в процессе управления состоянием морской экосистемы, учитывающим заданные значения рисков. Несмотря на наличие колебаний кривой баланса, характеризующей состояние экосистемы, она лежит существенно выше того положения, которое соответствует отсутствию управления (см. кривые  $x_3$  и  $x'_3$  на рис. 4, б).

Средний уровень объема природоохранных мероприятий был определен как  $x_6 = 2,0$  (рис. 4, б). Необходимость уменьшения рисков деградации экосистемы привела к тому, что, наряду с ограничением объемов потребления биоресурсов, потребовался дополнительный объем мер, гарантирующих их воспроизводство. График объемов этих мероприятий, прогнозируемых моделью, отражает кривая  $x_6'$  на рис. 4, б. Таким образом, модельные расчеты позволяют дать приближенную оценку тех объемов природоохранных мероприятий и тех периодов времени, при которых природоохранная деятельность должна быть значительно усилена.

### Системное моделирование экономических процессов потребления морских ресурсов

Наряду со стандартным представлением динамических уравнений эколого-экономических процессов системная методология позволяет разработать стандартную модель типовых операций, осуществляемых в любой экономической системе. Основные процессы, характеризующие динамику экономической системы: выпуск и реализация готовой продукции, получение и возврат кредитов, приобретение и расходование ресурсов производства, 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* [6, 7].

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

$$\frac{dX_1}{dt} = X_1[1 - 2(X_1 + a_{12}X_2 - a_{1F_1}F_D)], \quad (7)$$

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

$$\frac{dX_2}{dt} = X_2[1 - 2(X_2 + a_{23}X_3)] \quad (8)$$

и уравнение для безразмерной себестоимости продукции  $e$   $(X_3)$

$$\frac{dX_3}{dt} = X_3[1 - 2(X_3 - \sum_{i=1}^n y_i r_i - Q)], \quad (9)$$

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

$$\frac{dH}{dt} = H[1 - 2(H - V + S)], \quad (10)$$

$$S = IF(p < e; 0; R),$$

$$R = IF(D < H; D; H),$$

$$V = IF(D < H; 0; M),$$

$$M = IF(D - H < M; D - H; M),$$

$$M = \min(m_1, m_2, \dots, m_n),$$

$$m_i = H_{1i} / y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

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 и его оборотных средств  $H_2$  [6, 7]:

$$\frac{dH_{1i}}{dt} = H_{1i}[1 - 2(H_{1i} - V_{1i} + S_{1i})] \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (11)$$

где

$$V_{1i} = IF[D - H_{1i} < 0; 0; IF[y_i(D - H) < H_{1i}; 0; U_{1i}]],$$

$$U_{1i} = IF[y_i(D - H) - H_{1i} < \rho_i H_2 / r_i; y_i(D - H) - H_{1i};$$

$$IF[\rho_i(H_3^* - H_3) < 0; 0; U_{1i}^*]],$$

$$S_{1i} = IF[D - H < 0; 0; IF[y_i(D - H) < H_{1i}; y_i(D - H); H_{1i}]];$$

$$\frac{dH_2}{dt} = H_2 \left[ 1 - 2 \left( H_2 - pS + \sum_{i=1}^n S_2^i + S_3 + \chi H_2 \right) \right], \quad (12)$$

где

$$S_2^i = IF[r_i y_i(D - H) - H_1^i < \rho_i H_2; r_i y_i(D - H) - H_1^i; \rho_i H_2],$$

$$S_3 = IF[\theta H_3 < H_2; \theta H_3; H_2],$$

$$\rho_i = \frac{r_i y_i}{r_1 y_1 + \dots + r_n y_n} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

$\chi$  – процент извлекаемых из оборота средств, т. е. чистая прибыль системы,

$\theta$  – 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 [6, 7]

$$\frac{dH_3}{dt} = H_3[1 - 2(H_3 - \sum_{i=1}^n r_i V_{1i} + S_3)], \quad (13)$$

где

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

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

Функции  $U_{1i}^*$  и  $F_i^*$  в уравнениях (11) и (13) 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:

$$\varphi = \ln \frac{pS + 1}{10 + \sum_{i=1}^3 S_2^i + S_3 + \chi H_2}. \quad (14)$$

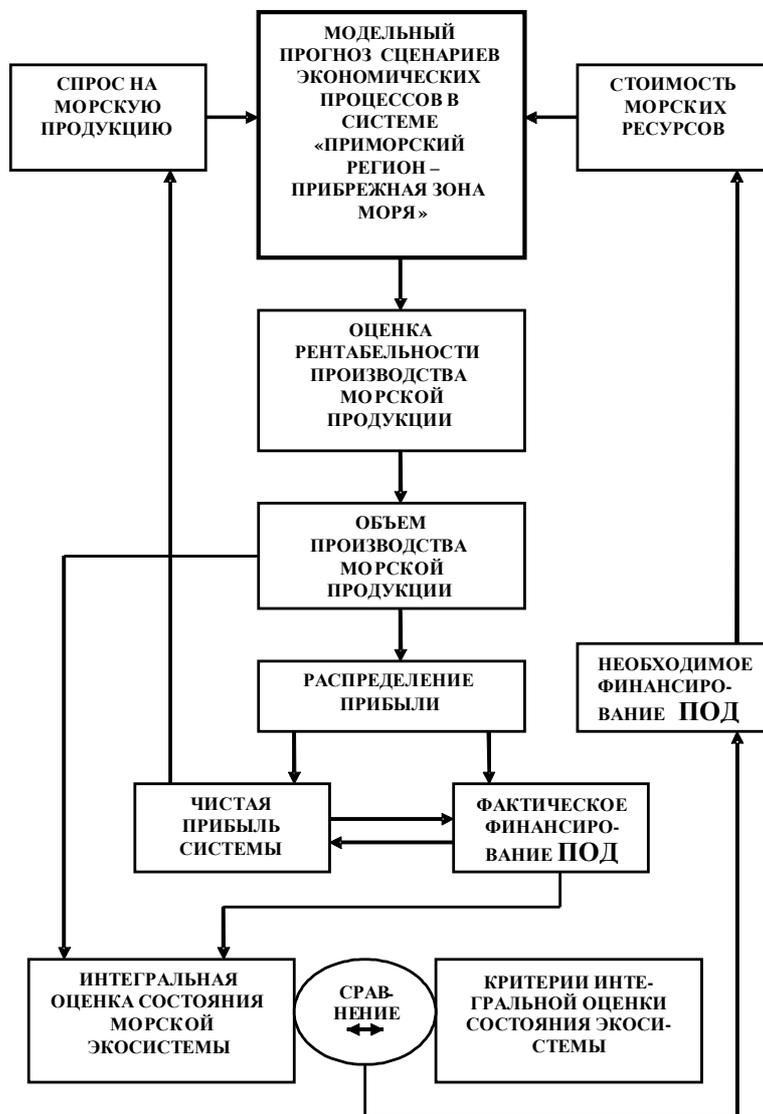
### Управление сценариями развития в эколого-экономической системе природопользования прибрежной зоны моря

Рассмотрим интегральную модель природопользования, построенную с применением технологии *ABC AGENT*. В качестве индикаторов экологического состояния системы будем использовать индекс биоразнообразия природной среды  $Bd$  и уровень ее загрязнения  $Pl$ . Структура модели системного управления природопользованием приведена на рис. 5.

В соответствии с рассмотренной выше технологией текущий спрос на морскую продукцию  $D$  сравнивается в блоке модельных прогнозов сценариев развития с имеющимся запасом готовой продукции экономической системы производства. В том случае, когда цена продукции  $p$  превышает ее себестоимость  $e$ , агент управления дает команду на реализацию продукции  $S$  и ее дополнительный выпуск (в случае необходимости)  $V$ . Сравнение цены и себестоимости дает возможность вести управление всей системой таким образом, чтобы обеспечить прибыль, поддерживая на должном уровне экологическое состояние морской экосистемы.

Этой цели служат размеры инвестиций производственной системы, устанавливаемые для приобретения ресурсов обеспечения производства. В целях упрощения модели ниже мы объединим все виды ресурсов, потребляемых системой, в три основных категории: экономические ресурсы, биологические ресурсы и экологические ресурсы. Экономические ресурсы системы ПЗМ определяют производственную себестоимость выпуска морепродуктов. Биологические ресурсы включают в себя расходы на проведение мониторинга акватории ПЗМ с целью текущей оценки состояния биоресурсов и на природоохранные действия, поддерживающие интегральный уровень биоразнооб-

разия морской среды. Экологические ресурсы связаны с расходами экономической системы на мониторинг уровня загрязнения акватории и на природоохранные действия, понижающие этот уровень до среднего многолетнего значения.



**Р и с. 5.** Схема управления эколого-экономическим балансом природопользования (ПОД – природоохранная деятельность)

Экономическая система инвестирует свои средства в приобретение каждого из видов этих ресурсов, причем размеры инвестиций определяются при помощи агентов управления, которые имитируют реакцию модели на при-

доохранные действия, оплачиваемые из прибыли экономической системы. Агенты управления в структуре модели экономической системы сопоставляют текущие объемы финансовых средств производственной системы (ее оборотных средств  $H_2$ ) с теми, которые необходимы для покрытия расходов на природоохранные цели.

В блоке прогнозирования сценариев развития присутствует агент, который определяет объемы кредитов, необходимых экономической системе для получения недостающего количества финансовых средств. Предполагается, что суммарный объем кредитов  $H_3$ , накопленный системой к данному моменту времени, не должен превышать некоторую предельно допустимую величину  $H_3^*$ . Эта величина может быть использована для управления потреблением морских ресурсов, поскольку она ограничивает экономическую активность системы, устанавливая предельно допустимое кредитование для приобретения ресурсов, необходимых при производстве морских продуктов.

Для контроля за состоянием морской экосистемы мы выбирали 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:

$$Bd = \sum_{i=1}^N g_i Br_i. \quad (15)$$

Предполагается, 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, рассматриваются 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

$$\frac{dBd}{dt} = Bd \{1 - 2[Bd + a_{Bd/Pl} Pl - A(Bd, Bd_m)]\}, \quad (16)$$

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

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  $\alpha_{Bd}$  задает скорость роста этого индекса.

Средний по рассматриваемой акватории ПЗМ уровень загрязнений интегрально представляет взвешенная сумма концентраций основных видов загрязняющих веществ  $Pl_i$ , характерных для этой зоны:

$$Pl = \sum_{i=1}^M h_i Pl_i . \quad (17)$$

Она формирует средний многолетний ход параметра  $Pl_m$ , который целесообразно использовать в качестве интегрального критерия оценки состояния экосистемы по уровню загрязнения. Текущие значения концентрации загрязнений морской среды  $Pl$  сравниваются в модели со средними многолетними нормами  $Pl_m$ , в результате чего агент, который мы обозначим 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 морепродуктов. Динамика уровня загрязнений должна учитывать естественное самоочищение морской среды  $a_{Pl} Pl$ , а также влияние природоохранных мероприятий, моделируемое агентом  $A(Pl, Pl_m)$ . С учетом сделанных предположений динамика уровня загрязнений описывается уравнением

$$\frac{dPl}{dt} = Pl\{1 - 2[Pl - a_{Pl/S} S + a_{Pl} Pl + A(Pl, Pl_m)]\}, \quad (18)$$

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

### **Имитационные эксперименты с информационной технологией ABC AGENT по прогнозированию сценариев эколого-экономических процессов**

При проведении имитационных экспериментов построенная эколого-экономическая модель ПЗМ рассматривалась в качестве инструмента для поиска таких сценариев природопользования, которые отвечают условиям баланса экономической выгоды и нормального (по средним многолетним критериям  $Bd_m$  и  $Pl_m$ ) состояния морской экосистемы. Расчеты проводились на 500 безразмерных шагов по времени (суток). Для наглядного представления сценарии прогнозируемых процессов  $Bd$  и  $Pl$  были приведены к безразмерной шкале изменчивости 0 – 10. Параметры, характеризующие экономические процессы, были также представлены в безразмерной форме путем нормировки на соответствующие масштабирующие коэффициенты. Ниже приводятся результаты двух серий вычислительных экспериментов, в которых были установлены следующие значения параметров:  $y_1 = 1,3$ ;  $y_2 = 3$ ;  $y_3 = 2$ ;  $r_1 = 0,8$ ;  $r_2 = 0,6$ ;  $r_3 = 1,1$ . Среднее значение себестоимости морепродукта составляло 7 условных единиц, а его рыночная цена 9 условных единиц. Процент погашения кредитов  $\theta$  составлял 10% от величины накопленного кредита.

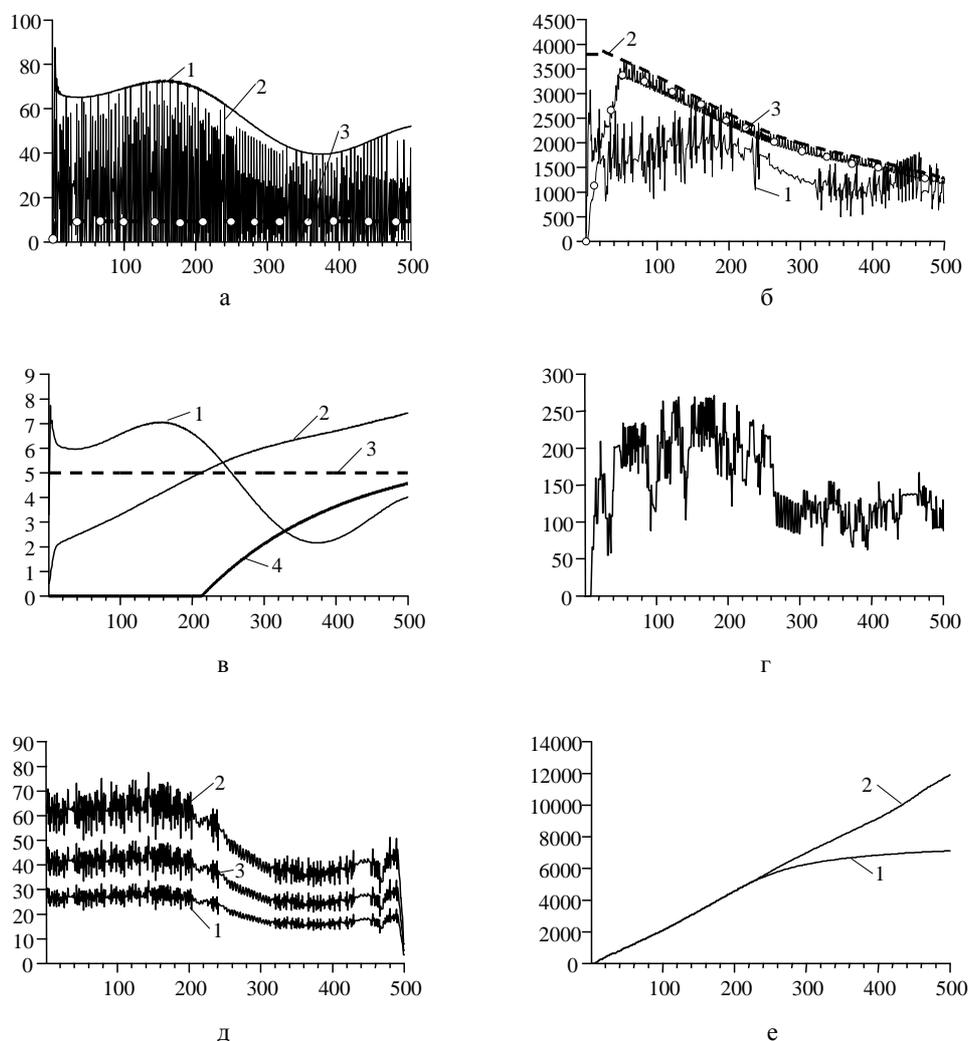
В первой серии экспериментов рассматривалась ситуация, при которой экономическая система могла иметь чистую прибыль в размере 20% от ее оборотных средств и не обязана была тратить ее на природоохранные цели. Единственное условие ограничения хозяйственной активности заключалось в том, что экономическая система не должна была использовать кредиты для расширения объемов потребления морских ресурсов выше некоторого предельного значения  $H_3^*$ . Это предельное значение понижалось по мере роста уровня загрязнения морской среды.

Сценарии процессов, полученные в первой серии экспериментов, показаны на рис. 6. На рис. 6, *a* приведены имитированный спрос на морепродукты и суточные объемы их производства. Из этих графиков следует, что производство и реализация морепродуктов происходили в течение всего времени эксперимента, однако полное удовлетворение спроса достигалось только в отдельные сутки, когда экономическая система располагала всеми видами ресурсов. Согласно сценариям оборотных средств и накопленного кредита (рис. 6, *b*), потребление биоресурсов и производство морепродуктов не было ограничено за счет кредитования экономической системы.

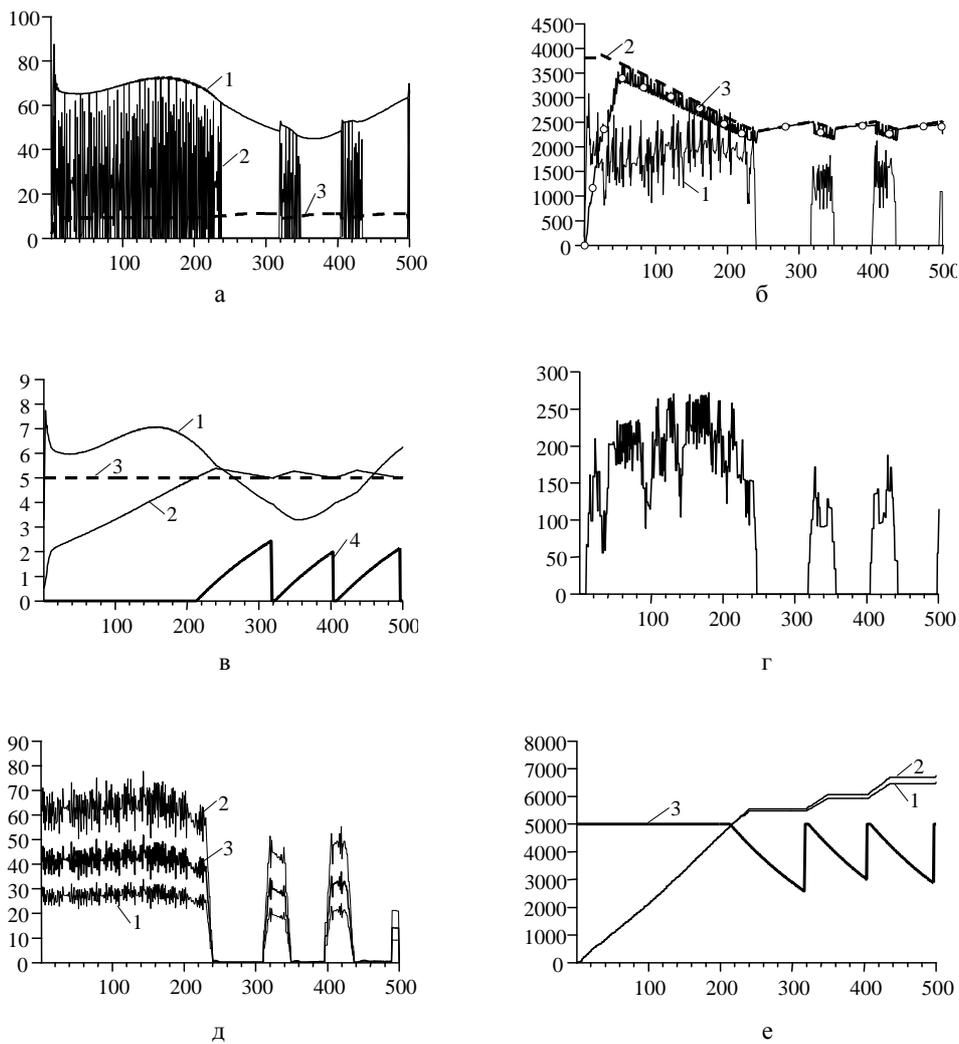
На рис. 6, *в* приведены сценарии интегральных характеристик состояния морской экосистемы. График рассчитанного индекса биоразнообразия по форме повторяет график спроса на биоресурс (рис. 6, *a*), а график уровня загрязнения испытывает устойчивый рост ввиду отсутствия природоохранных действий. Штриховая линия представляет средний многолетний уровень загрязнений, который расчетный сценарий  $PI$  значительно превысил во второй половине времени вычислений. Это привело к понижению индекса биоразнообразия и вызвало реакцию агента природоохранных действий  $A(PI, PI_m)$ , который имитировал необходимые природоохранные действия по загрязнениям (кривая 4 на рис. 6, *в*). Однако по условиям эксперимента эти действия не были выполнены, и экономическая система продолжала извлекать чистую прибыль и инвестировать оборотные средства только в необходимые ей ресурсы производства. Об этом свидетельствуют графики ее рентабельности (рис. 6, *г*) и объемов приобретаемых ресурсов (рис. 6, *д*). На рис. 6, *е* приведены графики фактической чистой прибыли, полученной системой (кривая 2), и той части прибыли, которая должна была сохраниться после финансирования природоохранных действий (кривая 1). Основным выводом, вытекающим из этой серии экспериментов, заключается в том, что ограничение инвестиций на потребление морских ресурсов (например путем лицензирования их объемов) не всегда является достаточным для сохранения экологического состояния морской среды.

Во второй серии экспериментов был использован более радикальный способ управления природопользованием, когда экономическая система ПЗМ должна была тратить часть своей прибыли на проведение природоохранных действий, как только уровень загрязнения морской среды превышал установленное среднее многолетнее значение  $PI_m = 3$ . В этих условиях экономическая активность потребления ресурсов была ограничена и спрос на морепродукцию удовлетворялся только в отдельные периоды времени (сценарии на рис. 7, *a*, *б*). Часть прибыли, выделяемая на борьбу с уровнем загрязнения морской среды, была пропорциональна величине превышения этим уровнем своего среднего многолетнего значения. Как следует из рис. 7, *в*, *е*, агент природоохранной деятельности  $A(PI, PI_m)$  направлял часть прибыли на борьбу с загрязнением всякий раз, когда уровень загрязнения поднимался выше

значения  $Pl_m = 3$ . Параметры, характеризующие природоохранные действия, были выбраны исходя из скорости понижения уровня загрязнения, равной 1% в сутки. Поэтому для удержания сценария уровня загрязнения вблизи среднего многолетнего значения (рис. 7, в) экономическая система периодически несла дополнительные расходы, существенно повышавшие себестоимость производства морепродуктов (рис. 7, е). В эти периоды времени производство морепродуктов прекращалось, так как оно становилось нерентабельным (рис. 7, а, б, г, д).



**Р и с. 6.** Сценарии процессов без учета финансирования природоохранной деятельности из прибыли экономической системы: а – спрос  $D$  (1), предложение морепродуктов экономической системой  $S$  (2), стоимость морепродукта  $P$  (3); б – оборотные средства  $H_2$  (1), предельно допустимые инвестиции  $H_3^*$  (2), накопленный кредит  $H_3$  (3); в – индекс биоразнообразия  $Bd$  (1), уровень загрязнения  $Pl$  (2), средний многолетний уровень загрязнения  $Pl_m$  (3), функция агента ПОД по загрязнениям (4); г – средняя за 10 сут рентабельность производства морепродуктов  $\varphi$ ; д – средние за 10 сут объемы приобретаемых в кредит экономических  $V_{11}$  (1), биологических  $V_{12}$  (2), экологических  $V_{13}$  (3) ресурсов; е – распределение средств, изымаемых из оборота: чистая прибыль с учетом (1) и без учета (2) расходов на природоохранную деятельность



**Р и с. 7.** Сценарии процессов с учетом финансирования природоохранной деятельности из прибыли экономической системы: *a* – спрос  $D$  (1), предложение морепродуктов экономической системой  $S$  (2), стоимость морепродукта  $p$  (3); *б* – оборотные средства  $H_2$  (1), предельно допустимые инвестиции  $H_3^*$  (2), накопленный кредит  $H_3$  (3); *в* – индекс биоразнообразия  $Bd$  (1), уровень загрязнения  $Pl$  (2), предельно допустимый уровень загрязнения  $Pl_c$  (3), функция агента ПОД по загрязнениям (4); *г* – средняя за 10 сут рентабельность производства морепродуктов  $\varphi$ ; *д* – средние за 10 сут объемы приобретаемых в кредит экономических  $V_{11}$  (1), биологических  $V_{12}$  (2), экологических  $V_{13}$  (3) ресурсов; *е* – распределение средств, изымаемых из оборота: накопленная чистая прибыль с учетом (1) и без учета (2) расходов на природоохранную деятельность, функция агента управления средствами на природоохранную деятельность (3)

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что информационная технология управления эколого-экономическими процессами в прибрежной зоне моря позволяет получать наглядное представление о сценариях развития процессов при варьировании большого количества параметров модели, играющих важную роль для принятия административных решений по использованию ресурсов ПЗМ. К их числу относятся оценки необходимых объемов природоохранных действий, поддерживающих нормальное состояние морской экосистемы и обеспечивающих рентабельное производство морепродуктов.

### Заключение

В настоящей работе мы стремились сделать акцент на практической пользе от применения системной методологии в задачах управления сложными природно-хозяйственными объектами. Как следует из приведенной на рис. 1 диаграммы, системная методология должна давать в руки исследователя или администратора инструмент поддержки принятия управленческих решений в форме компьютерной модели, обеспечивающей прогнозы сценариев развития. Следуя основным этапам системного моделирования и управления, мы рассмотрели концептуальные модели эколого-экономических систем природопользования применительно к биоресурсам прибрежной зоны моря. Формализация этих моделей методом адаптивного баланса влияний позволила получить их компьютерные варианты, а применение информационной технологии *ABC AGENT* обеспечило возможность прогнозировать сценарии эколого-экономических процессов в прибрежной зоне моря при большом числе управляющих параметров. Основная польза подобных компьютерных технологий управления заключается в широкой возможности проводить имитационные эксперименты и выбирать из ансамбля возможных сценариев процессов такие, которые удовлетворяют целевым установкам устойчивого развития.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A 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. *Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е.* Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – 258 с.
3. *Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Моделирование эколого-экономических систем. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 320 с.
4. *Fedra K.* Coastal Zone Resource Management: tools for a participatory planning and decision making process // *Delivering Sustainable Coasts: Connecting Science and policy / Proceedings of Littoral 2004, September 2004.* – Aberdeen, Scotland. UK, 2004. – 1. – P. 281 – 286.
5. *Тимченко И.Е.* Системные методы в гидрофизике океана. – Киев: Наук. думка, 1988. – 225 с.
6. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и *ABC*-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.

7. *Тимченко И.И., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Образование и устойчивое развитие. Системная методология. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 527 с.
8. *Timchenko I.E., Igumnova E.M.* Integrated management of ecological-economic sea-land systems // *Phys. Oceanogr.* – 2005. – 15, № 4. – P. 247 – 263.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 28.09.09  
После доработки 01.10.09

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто динамічні моделі інтегральних еколого-економічних систем прибережної зони моря, орієнтовані на встановлення балансу споживання і відтворення морських біоресурсів. Для побудови моделей використано системний підхід, при якому економічні цілі споживання біоресурсів ставляться в залежність від екологічного стану морського середовища. Наведено приклади управління балансом еколого-економічних процесів з використанням інтегральних критеріїв біорізноманітності та рівня забруднення морського середовища. Показано, що інформаційна технологія управління сценаріями еколого-економічних процесів дозволяє оцінювати рентабельність виробництва морепродуктів за умови використання частки прибутку для збереження морських біоресурсів.

**Ключові слова:** прибережна зона моря, еколого-економічна система, інтегральна модель.

**ABSTRACT** Dynamical models of the integral ecological-economical system of the sea coastal zone aimed at achieving a balance between consumption and reproduction of marine bioresources are considered. To construct a model, a systematic approach in which economical aims of bioresources consumption are assumed to be dependent on ecological state of the marine environment, is applied. The examples of managing the balance of ecological-economical processes using the integral criteria of biodiversity and the level of marine environment pollution are given. It is shown that the informational technology of managing the scenarios of ecological-economical processes permits to estimate profitability of sea food production provided a part of profit is used to preserve marine bioresources.

**Keywords:** sea coastal zone, ecological-economical system, integral model.