

Интегрированное управление эколого-экономическими системами море — суша

Предложена информационная технология интегрированного управления системами море — суша, содержащая 17 взаимосвязанных биохимических процессов, и экономическая модель производства, потребляющего биологические, минеральные и экологические ресурсы моря. Обе модели построены с применением метода адаптивного баланса влияний (АВС-метода) и содержат интеллектуальные агенты управления. Технология интегрированного управления включает в себя ресурсную ренту, природоохранный налог и экологический штраф. Рассмотрен пример интегрированного управления при имитированных внешних воздействиях на морскую экосистему и экономическую систему суши.

Введение

Термин «интегрированное управление» (*integrated management*) широко используется в научной литературе по проблемам устойчивого развития социальных эколого-экономических систем [1 — 4]. Интегрированное управление предполагает использование информации об осредненных (агрегированных) процессах развития для принятия решений, ведущих к достижению поставленных общих целевых установок. Сложность и многообразие причинно-следственных связей, определяющих динамику эколого-экономических систем, заставляют прибегать к построению упрощенных моделей управления, в которых реальные процессы интегрированы в соответствии с некоторыми принципами. Эффективность подобного подхода зависит от выбора принципов агрегирования, а также от того, насколько успешно эти принципы реализованы в конкретных моделях.

Природно-хозяйственные комплексы море — суша представляют собой сложные эколого-экономические системы, объединяющие в своем составе морскую среду и территорию суши. Морская среда является источником разнообразных природных ресурсов, которые потребляет население территории в процессе хозяйственной деятельности. Интегрированное управление системой море — суша, нацеленное на решение общих первостепенных задач, должно рассматриваться в качестве необходимого начального этапа управления. Основной принцип интегрированного управления подобной системой заключается в нахождении и поддержании необходимого равновесия между экономической пользой от потребления природных ресурсов морской среды и сохранением ее естественных биологических и физико-химических свойств.

В работах [2, 3] концепция динамического баланса — одна из главных концепций системного анализа — была положена в основу информационной технологии управления эколого-экономическими системами. Были выполне-

ны имитационные эксперименты, показавшие возможность сохранения параметров экологического состояния морской среды на некоторых заданных уровнях путем применения экономических санкций к источникам антропогенного воздействия со стороны суши. Наиболее трудной проблемой интегрированного управления была признана проблема создания динамических моделей эколого-экономических систем, позволяющих адаптировать прогнозируемые сценарии развития существенно отличающихся друг от друга процессов в морской среде и в экономической системе к реальным условиям.

Цель настоящей работы — объединить результаты адаптационного моделирования процессов в морской экосистеме с технологией управления производством, основанной на потреблении морских ресурсов. Кроме экологического мониторинга природной среды, интегрированное управление системой море — суша предполагает осуществление природоохранных действий. Ниже будут рассмотрены три вида экономических санкций за пользование морскими ресурсами: ресурсная рента, природоохранный налог и экологический штраф. Интегрированная модель управления эколого-экономической системой будет использована как инструмент для получения возможных сценариев развития процессов в системе при меняющихся внешних воздействиях: природных (физические и химико-биологические), а также экономических (условия на рынках ресурсов и морепродуктов). Поэтому основная задача работы заключалась в создании имитационной модели, способной воспроизвести условия динамического баланса экологических и экономических процессов в природно-хозяйственном комплексе море — суша.

Концептуальная модель интегрированного управления эколого-экономической системой море — суша

В соответствии с назначением системы в ее структуру в качестве основных блоков должны быть включены динамические модели морской экосистемы и производства, блок имитационного моделирования внешних условий (заменяющий в данном исследовании модели динамики природной среды и экономики региона) и блок интегрированного управления. Общая диаграмма модели управления показана на рис. 1.

Приведенные на диаграмме динамические модели экологической и экономической подсистем обеспечивают прогнозирование экологических и экономических процессов для принятия решений о проведении природоохранных действий и определения целесообразных объемов производства морепродуктов. Наряду с модельными прогнозами в модели управления присутствуют данные мониторинга состояния морской среды и экономического состояния производства. Эти данные обеспечивают текущие диагностические оценки процессов, протекающих в системе, и позволяют сравнивать ее текущие состояния с ожидаемыми по прогнозам состояниями.

Информация об отклонениях наблюдаемых процессов от прогнозируемых сценариев развития служит основой для интегрированного управления всей системой, а также дает возможность подстраивать параметры моделей. В качестве экономических рычагов регулирования объемов потребления морских ресурсов и уровня загрязнения морской среды отходами производ-

нию и накоплению долга конкретного производства по отношению к обществу, которому де-юре принадлежат ресурсы морской среды. Существует предельное значение накопленного долга, при котором общество вынуждено отказываться частному производству в дальнейшем потреблении морских ресурсов.

Динамико-стохастическая модель (DSM) морской экосистемы

Назначением этой модели является слежение за динамикой тех биогеохимических процессов в морской среде, которые признаны наиболее важными с точки зрения интегрированного управления конкретной системой море — суша. В соответствии с принципами динамико-стохастического моделирования [6, 7] прогностические сценарии процессов должны быть адаптированы к наблюдаемым значениям этих же или статистически связанных с ними процессов. В настоящем исследовании мы будем использовать динамические уравнения морской экосистемы, предложенной в работе [5]. Ее концептуальная модель, показанная на рис. 2, была основана на следующих допущениях.

Все живые организмы, населяющие морскую среду, характеризуются тремя общими классами: фитопланктон FP, зоопланктон ZP и биоресурс BR. В качестве процесса FP будем рассматривать изменения биомассы фитопланктона в единице объема, а в качестве процесса ZP — изменения биомассы зоопланктона. Что касается биоресурса BR, то его значения будут представлять биомассу всех остальных живых организмов, включая рыб и другие промысловые объекты, чем и объясняется название «биоресурс».

Среди процессов, которые обеспечивают существование перечисленных классов живых объектов, будут солнечная радиация SR, изменения концентраций биогенных элементов — неорганических форм азота (NO_2 , NO_3 , NH_4) и фосфора PO_4 и углекислый газ CO_2 . Учитывая условия агрегирования компонент модели, будем рассматривать в ней только классическую трофическую цепь: фитопланктон → зоопланктон → биоресурс. Примем также традиционную схему трансформации органического вещества, при которой отмирающие живые организмы являются источниками взвешенного органического азота PON, углерода POC и фосфора PON. Взвешенная фаза частично переходит в растворенную, образуя концентрации растворенных органических азота DON, углерода DOC и фосфора DOP. Затем на завершающей стадии трансформации органического вещества образуются минеральные (неорганические) формы азота NH_4 , NO_2 , NO_3 и фосфора PO_4 .

В качестве внешних природных факторов, влияющих на экосистему, будем учитывать приводный ветер WF, температуру морской воды TW, вертикальные перемещения водных масс VM и пресноводный сток RF, который выносит в море органические вещества и биогенные элементы NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 . Одновременно выносятся загрязняющие вещества, которые влияют на концентрацию PL в морской среде и на соленость морской воды SA.

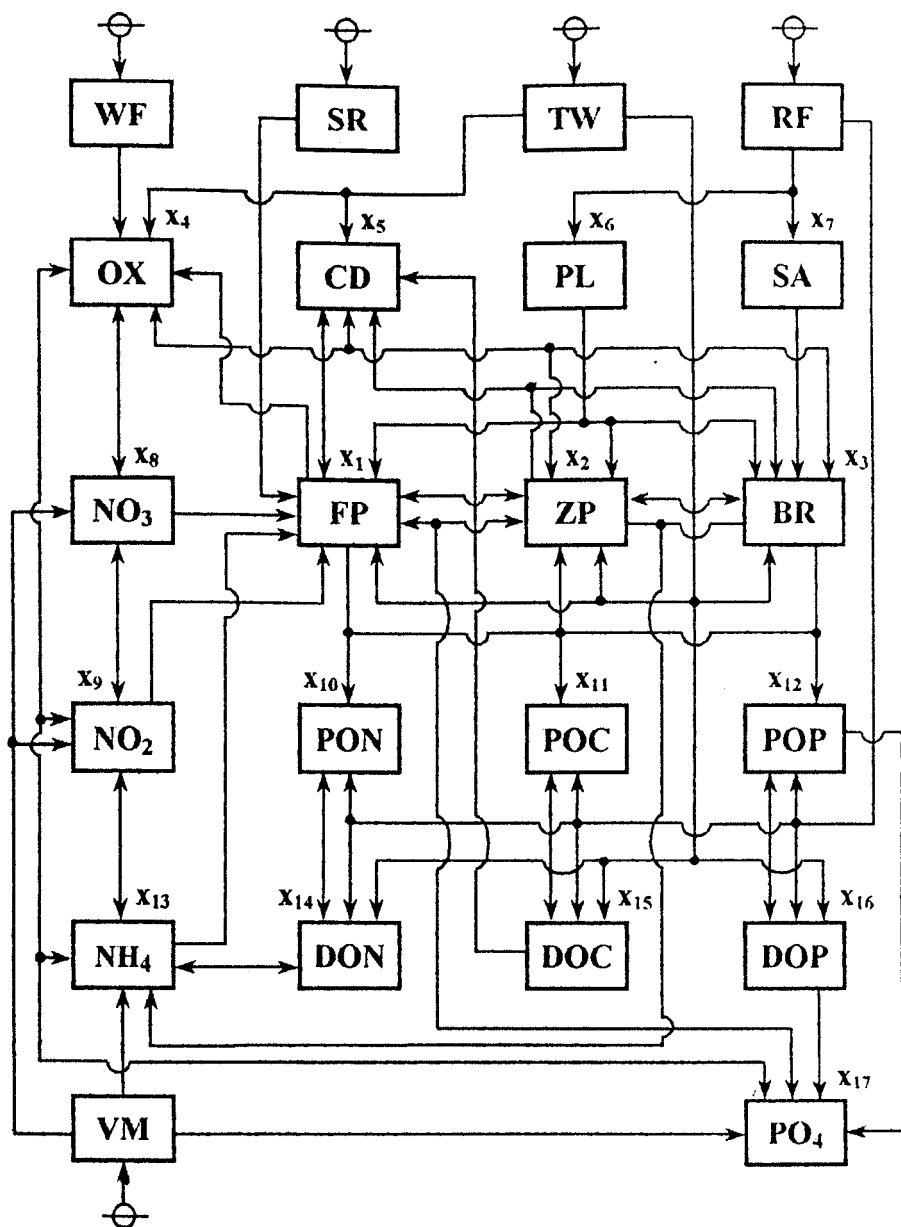


Рис. 2. Концептуальная модель морской экосистемы

Построенная с учетом взаимных влияний концептуальная модель экосистемы (рис. 2) была формализована методом адаптивного баланса влияний (ABC-методом) [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} = & c_1 x_1(t) \{ x_1^* - AD_{15} - AD_{18} - AD_{19} - AD_{1/13} - AD_{1/17} - AD_{1/SR} - \\ & - [x_1(t) - AP(x_5, x_8, x_9, x_{13}, x_{17}, SR, \alpha_{FP}) + a_{12} x_2(t) + a_{16} x_6 - a_{1/TW}(TW(t))] \}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
dx_2/dt &= c_2 x_2(t) \{x_2^* - AD_{21} - AD_{24} - [x_2(t) - AP(x_1, x_4, \alpha_{2P}) + a_{23} x_3(t) - \\
&\quad - a_{2TW}(TW(t)) + a_{26} x_6(t)]\}, \\
dx_3/dt &= c_3 x_3(t) \{x_3^* - AD_{32} - AD_{34} - [x_2(t) - AP(x_2, x_4, \alpha_{BR}) + a_{37} x_7(t) - \\
&\quad - a_{3TW}(TW(t)) + a_{36} x_6(t)]\}, \\
dx_4/dt &= c_4 x_4(t) \{x_4^* - AD_{4/TW} - [x_4(t) - a_{41} x_1(t) + a_{42} x_2(t) + a_{43} x_3(t) + a_{48} x_8(t) + \\
&\quad + a_{49} x_9(t) + a_{45} x_5 + a_{4/13} x_{13} + a_{4/17} x_{17} - a_{4/WF}(WF(t)) + a_{4TW}(TW(t))]\}, \\
dx_5/dt &= c_5 x_5(t) \{x_5^* - [x_5(t) - AP(x_4, x_{15}) + a_{51} x_1(t) - a_{52} x_2(t) - a_{53} x_3(t) - \\
&\quad - a_{5TW}(TW(t))]\}, \\
dx_6/dt &= c_6 x_6(t) \{x_6^* - [x_6(t) - a_{6RF}(RF(t))]\}, \\
dx_7/dt &= c_7 x_7(t) \{x_7^* - [x_7(t) - a_{7RF}(RF(t))]\}, \quad (1) \\
dx_8/dt &= c_8 x_8(t) \{x_8^* - [x_8(t) - AP(x_4, x_9) + a_{81} x_1(t) - a_{8VM}(VM(t))]\}, \\
dx_9/dt &= c_9 x_9(t) \{x_9^* - [x_9(t) - AP(x_4, x_{13}) + a_{91} x_1(t) - a_{9VM}(VM(t))]\}, \\
dx_{10}/dt &= c_{10} x_{10}(t) \{x_{10}^* - [x_{10}(t) - a_{10/1} x_1(t) - a_{10/2} x_2(t) - a_{10/3} x_3(t) + \\
&\quad + a_{10/14} x_{14}(t) - a_{10RF}(RF(t))]\}, \\
dx_{11}/dt &= c_{11} x_{11}(t) \{x_{11}^* - [x_{11}(t) - a_{11/1} x_1(t) - a_{11/2} x_2(t) - a_{11/3} x_3(t) + \\
&\quad + a_{11/15} x_{15}(t) - a_{11RF}(RF(t))]\}, \\
dx_{12}/dt &= c_{12} x_{12}(t) \{x_{12}^* - [x_{12}(t) - a_{12/1} x_1(t) - a_{12/2} x_2(t) - a_{12/3} x_3(t) + \\
&\quad + a_{12/16} x_{16}(t) - a_{12RF}(RF(t))]\}, \\
dx_{13}/dt &= c_{13} x_{13}(t) \{x_{13}^* - [x_{13}(t) - AP(x_4, x_{14}) + a_{13/1} x_1(t) - \\
&\quad - a_{13/2} x_2 - a_{13/3} x_3 - a_{13VM}(VM(t))]\}, \\
dx_{14}/dt &= c_{14} x_{14}(t) \{x_{14}^* - [x_{14}(t) - a_{14/10} x_{10}(t) - a_{14RF}(RF(t)) - a_{14TW}(TW(t))]\}, \\
dx_{15}/dt &= c_{15} x_{15}(t) \{x_{15}^* - [x_{15}(t) - a_{15/11} x_{11}(t) - a_{15RF}(RF(t)) - a_{15TW}(TW(t))]\}, \\
dx_{16}/dt &= c_{16} x_{16}(t) \{x_{16}^* - [x_{16}(t) - a_{16/12} x_{12}(t) - a_{16RF}(RF(t)) - a_{16TW}(TW(t))]\}, \\
dx_{17}/dt &= c_{17} x_{17}(t) \{x_{17}^* - [x_{17}(t) - AP(x_4, x_{16}) - AP(x_4, x_{17}) - a_{17VM}(VM(t))]\}.
\end{aligned}$$

В этих уравнениях для компонент вектора состояния экосистемы были использованы следующие обозначения: $x_1(t)$ — концентрация фитопланктона FP; $x_2(t)$ — концентрация зоопланктона ZP; $x_3(t)$ — концентрация биоресурса BR; $x_4(t)$ — содержание растворенного кислорода OX; $x_5(t)$ — содержание углекислого газа CD; $x_6(t)$ — концентрация загрязняющих веществ PI; $x_7(t)$ — соленость морской воды SA; $x_8(t)$ — содержание неорганического азота в форме NO_3 ; $x_9(t)$ — содержание неорганического азота в форме NO_2 ; $x_{10}(t)$ — содержание взвешенного органического азота PON; $x_{11}(t)$ — содержание взвешенного органического углерода POC; $x_{12}(t)$ — содержание взвешенного органического фосфора POP; $x_{13}(t)$ — содержание аммонийного азота NH_4 ; $x_{14}(t)$ — концентрация растворенного органического азота DON; $x_{15}(t)$ — кон-

центрация растворенного органического углерода DOC; $x_{16}(t)$ — концентрация растворенного органического фосфора DOP; $x_{17}(t)$ — содержание неорганического фосфора в форме PO_4 ; x_{1-17} — средние значения процессов [5].

Присутствующие в правых частях уравнений (1) слагаемые вида AD представляют собой первую группу интеллектуальных агентов управления. Они имеют следующие выражения:

$$\begin{aligned} AD_{15} &= IF\{x_5(t) > x_5^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{15}t)]\}, \\ AD_{18} &= IF\{x_8(t) > x_8^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{18}t)]\}, \\ AD_{19} &= IF\{x_9(t) > x_9^0; 0; -x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{19}t)]\}, \\ AD_{1/13} &= IF\{x_{13}(t) > x_{13}^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{1/13}t)]\}, \\ AD_{1/17} &= IF\{x_{17}(t) > x_{17}^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{1/17}t)]\}, \\ AD_{1/SR} &= IF\{SR(t) > SR^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{1/SR}t)]\}, \\ AD_{21} &= IF\{x_1(t) > x_1^0; 0; x_2^*[1 - \exp(-\alpha_{21}t)]\}, \\ AD_{24} &= IF\{x_4(t) > x_4^0; 0; x_2^*[1 - \exp(-\alpha_{24}t)]\}, \\ AD_{32} &= IF\{x_2(t) > x_2^0; 0; x_3^*[1 - \exp(-\alpha_{32}t)]\}, \\ AD_{34} &= IF\{x_4(t) > x_4^0; 0; x_3^*[1 - \exp(-\alpha_{34}t)]\}, \\ AD_{4/TW} &= IF\{TW(t) < TW^0; 0; x_4^*[1 - \exp(-\alpha_{4/TW}(t))]\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Интеллектуальные агенты (2) контролируют поведение экосистемы вблизи границ ее гомеостазиса: когда концентрации жизненно важных веществ достигают своих предельно допустимых значений, начинаются процессы деградации экосистемы, которые сопровождаются быстрым уменьшением биомасс FP, ZP и BR.

В условиях (2) границы гомеостазиса экосистемы определены допустимыми значениями фитопланктона x_1^0 , зоопланктона x_2^0 , кислорода x_4^0 , форм азота: x_8^0 , x_9^0 и x_{13}^0 , а также солнечной радиации SR^0 . Аналогичные условия легко могут быть установлены по углероду и фосфору. Скорости деградации экосистемы регулируются выбором параметров α_{ij} .

Вторая группа интеллектуальных агентов, имеющая в модели (1) обозначения вида AP, контролирует зависимости биомасс FP, ZP и BR от наличия необходимых им видов ресурсов. Они контролируют лимитирующие факторы роста соответствующих биомасс:

$$\begin{aligned} AP(a_{54}x_4, a_{5/15}x_{15}) &= \min\{x_4, x_{15}\}[a_{54} \text{ or } a_{5/15}], \\ AP(a_{84}x_4, a_{8/15}x_9) &= \min\{x_4, x_9\}[a_{84} \text{ or } a_{8/15}], \\ AP(a_{94}x_4, a_{9/13}x_{13}) &= \min\{x_4, x_{13}\}[a_{94} \text{ or } a_{9/13}], \\ AP(a_{13/4}x_4, a_{13/14}x_{14}) &= \min\{x_4, x_{14}\}[a_{13/4} \text{ or } a_{13/14}], \\ AP(a_{17/4}x_4, a_{17/16}x_{16}) &= \min\{x_4, x_{16}\}[a_{17/4} \text{ or } a_{17/16}], \\ AP(a_{17/4}x_4, a_{17/12}x_{12}) &= \min\{x_4, x_{12}\}[a_{17/4} \text{ or } a_{17/12}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Третья группа агентов не только отслеживает лимитирующие факторы роста, но также учитывает инерционность процессов роста биомассы FP, ZP и BR с соответствующими постоянными времени α_{FP} , α_{ZP} и α_{BR} :

$$\begin{aligned}
 AP(x_5, x_8, x_9, x_{13}, x_{17}, SR, \alpha_{FP}) &= IF\{M(t) - M(t - \tau) < 0; a_{1M} x_{1M}, \\
 &a_{1M}[M(t) + [M(t - \tau) - M(t)] \exp(-\alpha_{FP}t)]\}, \\
 M(t) &= \min\{x_5(t), x_8(t), x_9(t), x_{13}(t), x_{17}(t), SR(t)\}, \\
 AP(x_1, x_4, \alpha_{ZP}) &= IF\{M(t) - M(t - \tau) < 0; a_{2M} x_{2M}, \\
 &a_{2M}[M(t) + [M(t - \tau) - M(t)] \exp(-\alpha_{ZP}t)]\}, \\
 M(t) &= \min\{x_1(t), x_4(t)\}, \\
 AP(x_2, x_4, \alpha_{BR}) &= IF\{M(t) - M(t - \tau) < 0; a_{3M} x_{3M}, \\
 &a_{3M}[M(t) + [M(t - \tau) - M(t)] \exp(-\alpha_{BR}t)]\}, \\
 M(t) &= \min\{x_2(t), x_4(t)\}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Построенная динамическая модель экосистемы позволяет получить прогностические сценарии развития процессов в море при условии, что входящие в нее параметры каким-либо образом заданы. Общим способом оценки коэффициентов ABC-моделей сложных систем является преобразование их в динамико-стохастические модели (DSM ABC) [7]. Статистический анализ корреляционных зависимостей между моделируемыми процессами даст возможность усваивать в модели (1) информацию об изменчивости реальных процессов за некоторый интервал времени, предшествующий моменту усвоения данных.

Предположим, что существует архив данных наблюдений за процессами x_i , представленными в системе уравнений (1), и за внешними воздействиями на нее WF, SR, TW, RF и VM. Будем считать, что этих данных достаточно для оценки по ним матрицы D — коэффициентов авто- и взаимной корреляции процессов x_i . Обозначим через $D_{ps} = M\{x_p x_s\} / (D_{pp} D_{ss})^{-1/2}$ элементы этой корреляционной матрицы:

$$\begin{pmatrix}
 1 & D_{12} & D_{13} & \dots & D_{1n} \\
 D_{21} & 1 & D_{23} & \dots & D_{2n} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 D_{n1} & D_{n3} & D_{n4} & \dots & 1
 \end{pmatrix}$$

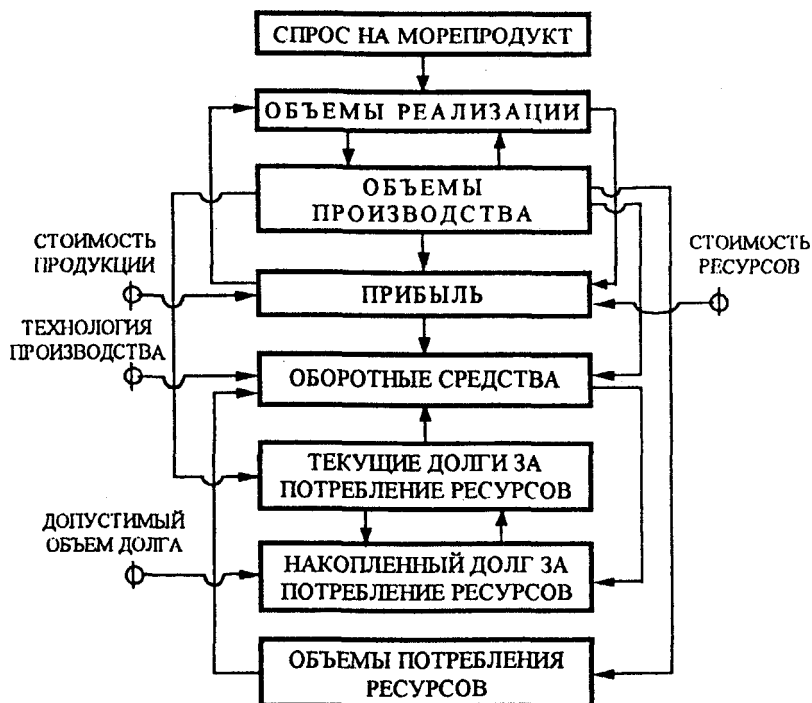
Тогда уравнения ABC-модели коэффициентов влияний a_{ps} принимают следующий вид [2]:

$$\begin{aligned}
 da_{ps}/dt + a_{ps} &= D_{ps} - a_{p1} D_{s1} - a_{p2} D_{s2} - \dots - a_{pn} D_{sn}; \\
 (p, s &= 1, 2, \dots, n; \quad p \neq s).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Система (5) содержит $n(n-1)$ дифференциальных уравнений. Она даст возможность определить все неизвестные коэффициенты влияния в динамической модели (1). Заметим, что *ABC*-модель (5) обеспечивает текущую идентификацию (пересчет) коэффициентов путем реранализа наблюдаемых процессов и внешних воздействий, что позволяет управлять параметрами интегральной модели управления (рис. 1).

Динамическая модель производства

В качестве индустриального объекта суши, потребляющего морские ресурсы, будем рассматривать предприятие, производящее морепродукт. В работе [4] показано, что любая экономическая система содержит в своей основе типовую схему получения и расходования оборотных средств, которая моделируется с использованием логических операций управления, осуществляемых агентами. Была предложена технология управления производством, получившая название *ABC AGENT*. На рис. 3 представлена концептуальная модель производства. Оборотные средства, поступающие от реализации морепродукта, пополняются в случае необходимости кредитами, которые могут накапливаться и в случае неблагоприятной конъюнктуры получения прибыли образуют накопленный предприятием долг.



Р и с. 3. Концептуальная модель производства морепродуктов

Предположим, что в единице производимого морепродукта содержится y_1 необходимого биоресурса (промысловые объекты морской фауны), y_2 минерального ресурса (естественный химический состав морской среды) и y_3 экологического ресурса (ассимиляционная емкость природной среды, уменьшающаяся при попадании в нее отходов производства и загрязнений). Будем использовать стандартные уравнения динамического баланса, которые отражают поступление и расходование готовой продукции H , ресурсов производства H_1^i ($i = 1, 2, 3$), финансовых ресурсов (оборотных средств) H_2 и накопленного долга за потребление ресурсов H_3 . Тогда для количественной оценки объема произведенного морепродукта имеем

$$H_k = H_j + V_k - S_k, \quad (6)$$

где H_k — количество продукции в текущий момент времени k ; H_j — ее количество в предыдущий момент времени j ; V_k — поступление и S_k — расходование продукции за период времени от момента j до момента k . Введем цену морепродукта (товара) x_2 , его себестоимость x_4 и норму прибыли $N_k = x_{2k} - x_{4k}$. Реализация товара становится невыгодной, когда $N_k < 0$. Поэтому уравнения реализации должны иметь вид

$$S_k = \text{IF } [N_k < 0; 0; R],$$

$$R_k = \text{IF } [D_k < H_j; D_k; H_j],$$

где D_k — текущий спрос на морепродукт. Очевидно, что выпуск товара будет ограничен тем видом ресурсов, поставки которого оказываются минимальными. Если M_j — минимальный объем ресурсов, имеющийся у производства, то объем выпуска продукции будет определен следующими логическими уравнениями:

$$V_k = \text{IF } [D_k < H_j; 0; M_{1k}],$$

$$M_{1k} = \text{IF } [D_k - H_j < M_j; D_k - H_j; M_j],$$

$$M_j = \min (m_{1j}^1; m_{1j}^2; m_{1j}^3),$$

$$m_{1j}^i = H_{1j}^i / y_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

Для прибыли I_{0k} , доходов P_k и расходов E_k тогда имеем:

$$I_k = \text{IF } [(P_k - E_k) < 0; 0; P_k - E_k],$$

$$P_k = x_{2k} S_k,$$

$$E_k = x_{4k} V_k.$$

Будем считать, что имеющиеся у предприятия оборотные средства H_2 распределяются на приобретение ресурсов в той же пропорции, в которой каждый из трех видов ресурсов участвует в производстве морепродукта. Обозначим p^i цены на ресурсы и введем коэффициенты пропорциональности

$$\rho_{ik} = p_{ik}^1 y_1 + p_{ik}^2 y_2 + p_{ik}^3 y_3]^{-1}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (7)$$

Тогда на приобретение i -го ресурса предприятие располагает $\rho_{ik} H_{2k}$ частью своих оборотных средств. Если этой суммы недостаточно, предприятие имеет возможность взять ресурсы в кредит при том условии, что его долги H_{3k} (накопленный к текущему времени кредит) не превышают некоторой установленной заранее нормы H_{3k}^* . Таким образом, динамика оборотных средств предприятия определяется следующим пассивным балансом:

$$H_{2k} = H_{2j} + I_{0k} - S_{3k},$$

в котором функция S_{3k} имеет смысл расходов на погашение накопленного кредита. Если установить процент погашения θ , то уравнение для S_{3k} принимает форму

$$S_{3k} = \text{IF} [H_{3j} \theta < H_{2j}; \quad H_{3j} \theta, H_{2j}].$$

Обозначим объемы приобретаемых в кредит ресурсов V_{1k}^1 , V_{1k}^2 и V_{1k}^3 . Тогда общая стоимость текущего кредита составит

$$V_{3k} = p_{1k}^1 V_{1k}^1 + p_{1k}^2 V_{1k}^2 + p_{1k}^3 V_{1k}^3.$$

Величина накопленного кредита будет выражена балансовым соотношением

$$H_{3k} = H_{3j} + V_{3k} - S_{3k}.$$

Представим запасы ресурсов, которыми располагает производство, балансовыми соотношениями

$$H_{1k}^i = H_{1j}^i + V_{1k}^i - S_{1k}^i \quad (i = 1, 2, 3).$$

Расходование каждого вида ресурсов пропорционально объему выпуска продукции

$$S_{1k}^i = V_k y_i.$$

В том случае, когда запас ресурса достаточен для выпуска требуемого объема продукции, закупка ресурса не производится. В противном случае закупается некоторое количество ресурса F_{1k}^i :

$$V_{1k}^i = \text{IF} [(D_k - H_j) y_i < H_{1j}^i; 0; F_{1k}^i].$$

Функция F_{1k}^i ограничивает приобретение ресурсов теми объемами оборотных средств, которыми располагает предприятие. Если количество свободных оборотных средств, выделяемых на оплату потребления i -го вида ресурса,

составляет $\rho_i H_{2j}$, а стоимость недостающего количества ресурса равна $p_{ij}^i (y_i D_k - H_{1j}^i)$, то уравнение для этой функции принимает вид

$$F_{1k}^i = IF [p_{ij}^i (y_i D_k - H_{1j}^i) < \rho_i H_{2j}; y_i D_k - H_{1j}^i; R_{1k}^i]. \quad (8)$$

В последнее выражение введена функция R_{1k}^i , которая призвана контролировать ситуацию с долгом, уже накопленным предприятием к моменту времени k . Эта функция ограничивает приобретение ресурса по мере того, как величина накопленного кредита приближается к заранее установленной норме $\rho_i H_3^*$.

Таким образом, баланс ресурсов становится адаптивным, поскольку устанавливается обратная связь, стабилизирующая расходы на приобретение ресурсов. В настоящем исследовании мы будем рассматривать только ту составляющую накопленного предприятием кредита, которая связана с его долгами за потребление морских ресурсов.

Основными переменными рынка морепродуктов должны быть спрос на товар z_1 , стоимость товара z_2 , его качество z_3 и себестоимость производства z_4 . В уже использованной выше функции спроса D_k было учтено ограничение спроса z_1 по качеству товара z_3 : спрос на товар прекращается, когда его качество становится ниже некоторого предела z_3^0 :

$$D_k = IF [z_{3k} > z_3^0; z_{1k}; 0].$$

ABC-уравнения модели представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} z_{1k} &= 2 z_{1j} \{1 - c_1 (z_{1j} + a_{12} z_{2j} - a_3 [1 - \exp \alpha_3 z_{3j}])\}, \\ z_{2k} &= 2 z_{2j} \{1 - c_2 (z_{2j} - a_{24} z_{4j} - a_{23} z_{3j})\}, \\ z_{3k} &= 2 z_{3j} \{1 - c_3 (z_{3j} - a_{3\mu} \mu_j)\}, \\ z_{4k} &= 2 z_{4j} \{1 - c_4 (z_{4j} - a_{4\eta} \eta_j)\}. \end{aligned} \quad (9)$$

В этих уравнениях использованы главные причинно-следственные зависимости между параметрами, характеризующими ситуацию на рынке морепродуктов. В уравнение для спроса введена нелинейная зависимость от качества товара, на которое влияет интегральный параметр μ_0 качества ресурсов q^i :

$$\mu_{0j} = \rho_1 q_{ij}^1 + \rho_2 q_{ij}^2 + \rho_3 q_{ij}^3.$$

Аналогичным образом себестоимость производства зависит от интегрального параметра стоимости ресурсов. В приведенной форме этот параметр может быть выражен следующим соотношением:

$$\eta_j = p_{1j}^1 y_1 + p_{2j}^2 y_2 + p_{3j}^3 y_3.$$

Таким образом, интегрированное управление экономической системой суши может осуществляться путем регулирования допустимой величины ее долга за пользование морскими ресурсами H_3^* , накопленного за некоторое время.

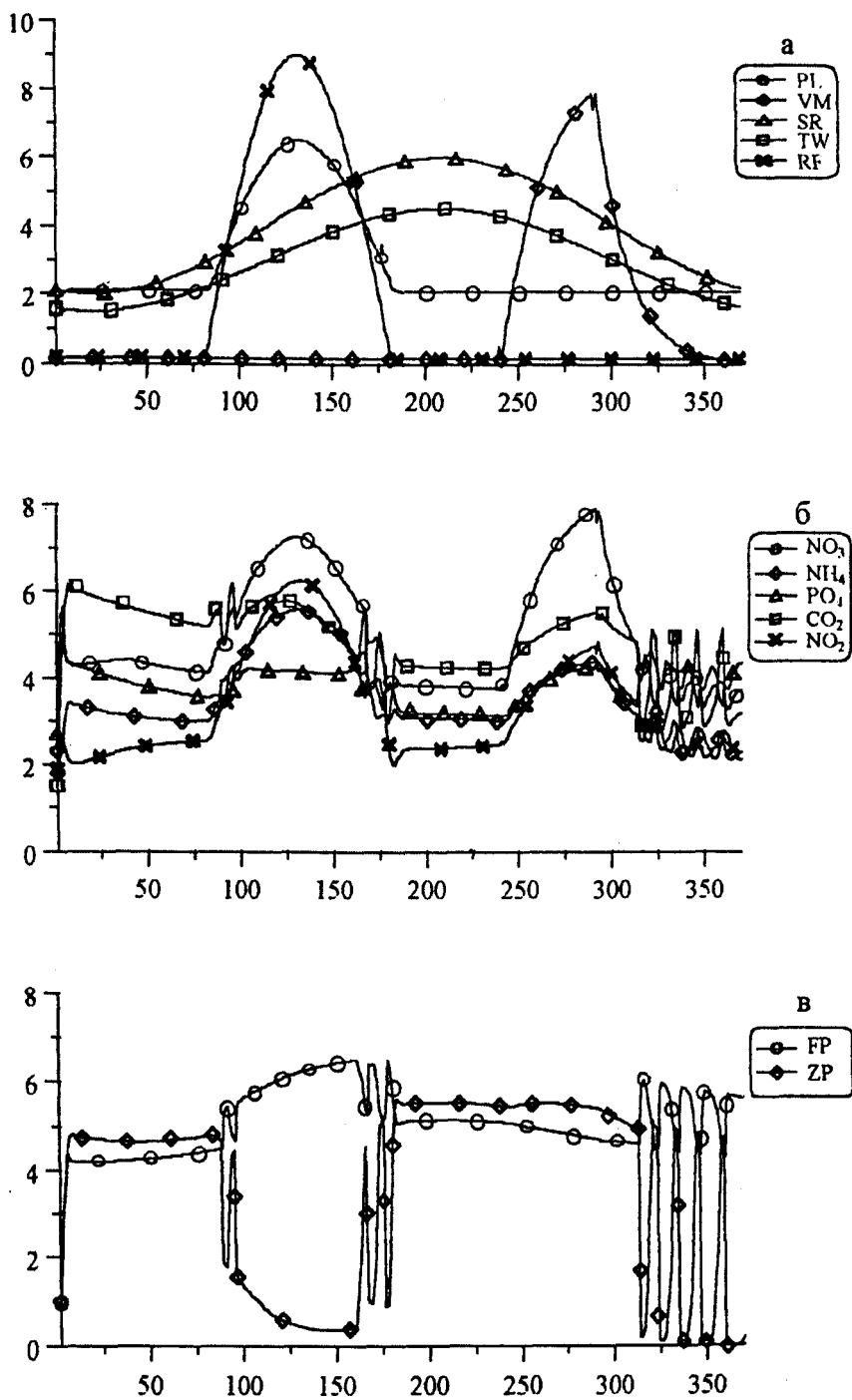
Имитационные эксперименты с моделью эколого-экономической системы море — суша

В ходе проведенных вычислительных экспериментов проверялась способность информационной технологии (1) — (9) прогнозировать сценарии развития экологических и экономических процессов в зависимости от имитируемых внешних воздействий — природных и экономических факторов. В качестве примера рассмотрим результаты одного из подобных экспериментов, в котором морская экосистема была подвергнута годовому циклу солнечной радиации SR и температуры TW. Кроме того, были заданы специальные сценарии пресноводного стока со стороны суши RF, выноса в море концентрации вредных для морской экосистемы загрязнений PL и вертикального подъема глубинных вод VM, вызванного динамическими факторами взаимодействия моря и атмосферы. Все процессы были приведены к безразмерному виду путем линейного преобразования переменных [2, 5], а их изменчивость рассматривалась в масштабе единой шкалы [0,10]. Имитированные внешние воздействия изображены на рис. 4, а. Шаг вычислений по времени равнялся суткам и был принят за единицу времени. Расчеты проводились на 370 безразмерных шагов по времени.

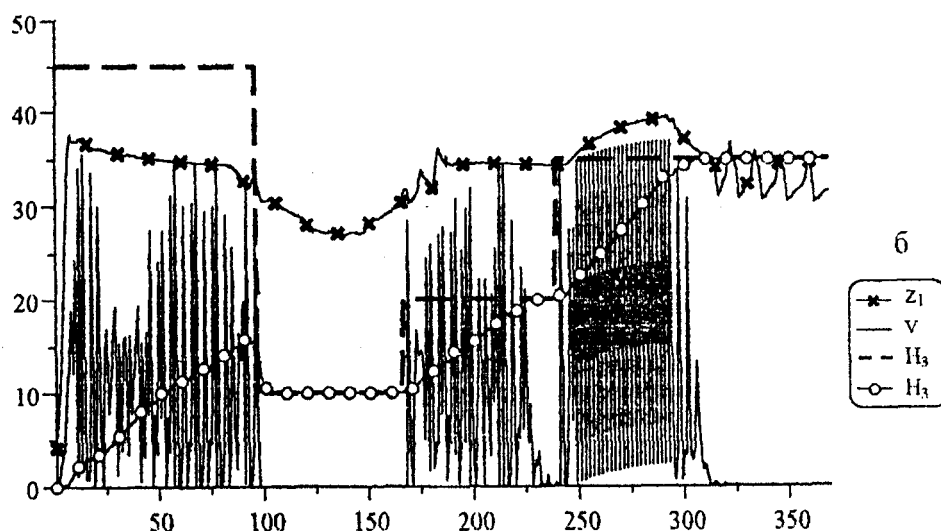
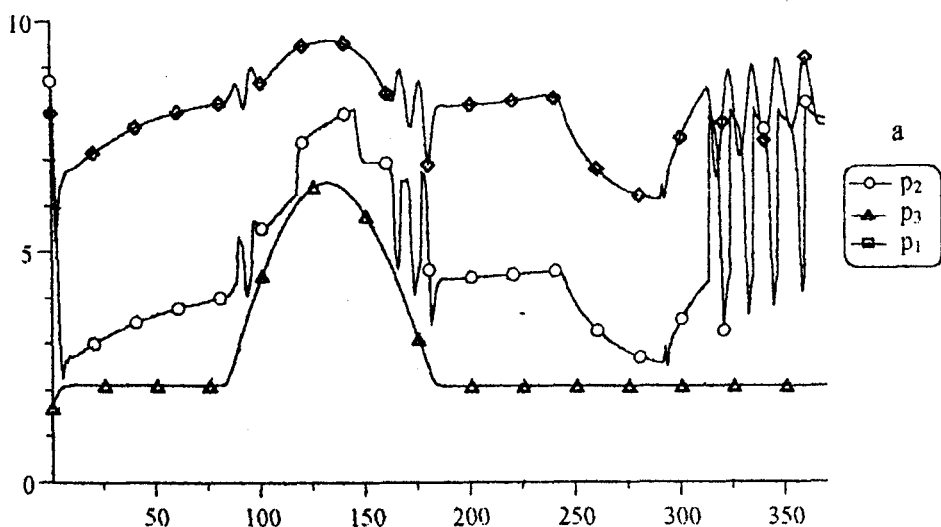
Реакция химических компонент вектора состояния экосистемы приведена на рис. 4, б. Практически все они отреагировали на поступление с пресноводным стоком загрязнений (химических соединений и органики) ростом своих концентраций. Аналогичная реакция приурочена ко времени подъема глубинных вод. Вместе с тем на графиках химических соединений заметны небольшие колебания, которые объясняются нелинейными процессами приспособления живых организмов к новым условиям существования.

Повышенное содержание органики привело к резкому увеличению расходования кислорода на окисление. Поэтому изменение концентрации зоопланктона оказалось под действием двух противоположных факторов: роста концентрации фитопланктона и падения содержания кислорода. В результате динамика развития зоопланктона определялась одним из двух лимитирующих факторов, которые, чередуясь между собой, привели к колебаниям концентраций ZP. Эти колебания особенно заметны на графике ZP, изображенном на рис. 4, в. В свою очередь, колебания зоопланктона отразились на сценариях развития биоресурса BR и всех других связанных с ним сценариях.

Перейдем к рассмотрению реакции экономической системы суши на сценарии развития процессов в море. В целях упрощения расчетов в качестве сценария стоимости биоресурса была принята зависимость, противоположная его концентрации в море, т. е. величина $p^1 = 10 - x_3$, а в качестве стоимости минеральных ресурсов — аналогичная величина $p^2 = 10 - x_4$, связанная с концентрацией кислорода. Стоимость экологического ресурса была принята пропорциональной концентрации загрязняющих веществ в море $p^3 = x_6$. Сценарии стоимости морских ресурсов приведены на рис. 5, а. Как следует из рисунка, вынос органики и загрязняющих веществ со стоком с суши существенно повысил стоимости всех трех видов ресурсов в период между 70 и 170 сутками вычислений. В то же время вертикальный подъем вод понизил стоимости биологических и минеральных ресурсов в период между 240 и 290 сутками.

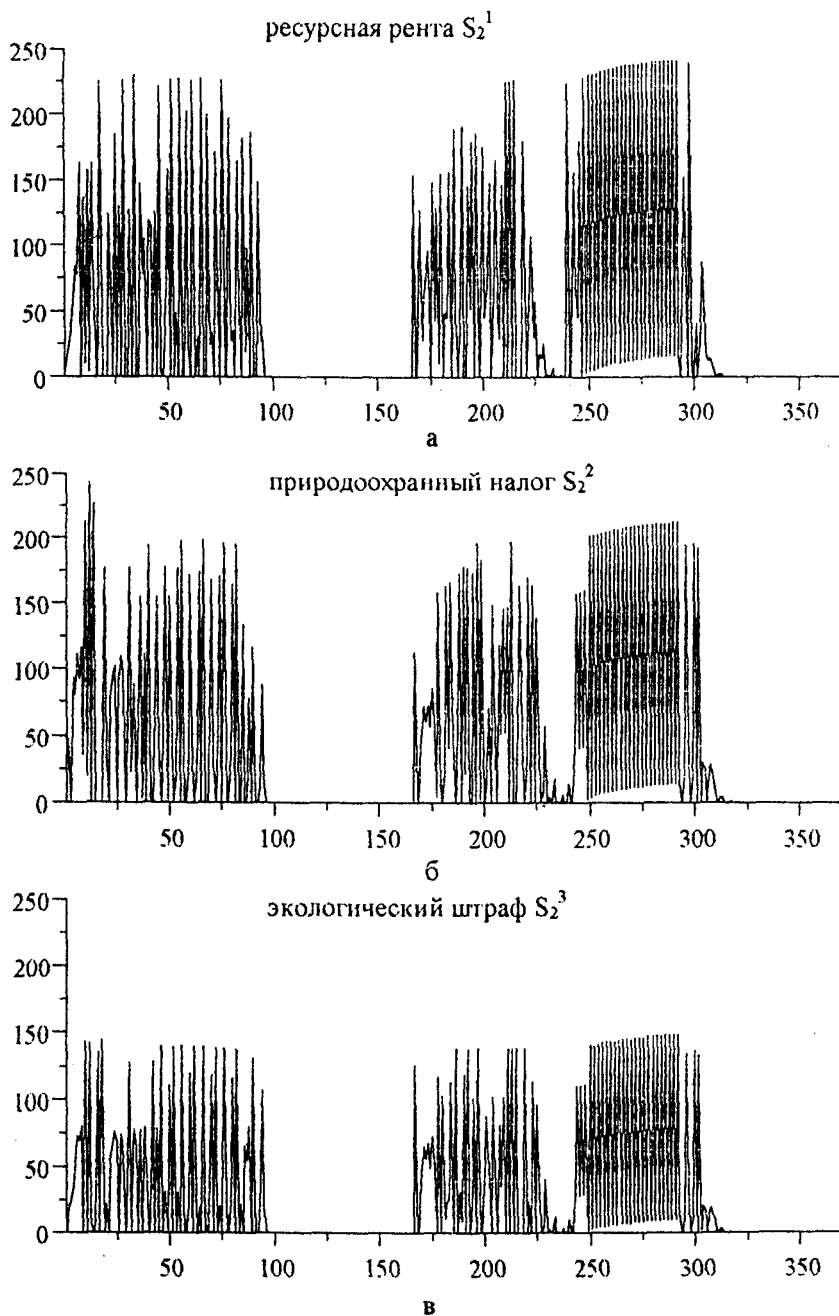


Р и с. 4. Реакция морской экосистемы на имитированное внешнее воздействие



Р и с. 5. Интегрированное управление системой море — суша: а — динамика стоимости потребляемых ресурсов морской среды; б — управление выпуском морепродуктов путем изменения допустимого объема накопленного долга H_3 .

Как и следовало ожидать, динамика стоимости ресурсов отразилась на кривой спроса на морепродукт, изображенной на рис. 5, б. Повышение стоимости ресурсов сопровождалось ростом себестоимости производства и, как следствие, увеличением цены морепродукта, определяющей спрос. В свою очередь, понижение спроса привело к уменьшению доходов предприятия и к сокращению его возможностей своевременно рассчитываться за потребляемые им морские ресурсы.



Р и с. 6. Реальные объемы экономической компенсации подсистемы суши за пользование ресурсами морской среды — ежедневные отчисления из прибыли

На рис. 5, 6 частыми вертикальными линиями обозначена динамика выпуска морепродукта за каждые сутки. В начальный период эксперимента выпуск продукции, как правило, не достигал величины спроса, поскольку предприятие не имело достаточно средств для приобретения ресурсов в нужном ему объеме. Оно было вынуждено вести потребление ресурсов в кредит, что сопровождалось ростом накопленного долга H_3 .

Орган интегрированного управления системой море — суша, ориентируясь на информацию об экологическом состоянии морской среды, установил в начальный период времени (1 — 100 сут) предельно допустимую величину накопленного предприятием долга в размере $H_3^* = 45$ безразмерных единиц (б. е.). В этих условиях предприятие имело возможность продолжать накапливать долги за потребление ресурсов. Однако по мере ухудшения экологической ситуации, произошедшей в период времени с 70 по 170-е сутки, допустимая величина накопленного долга была снижена до 10 б. е. Предприятие лишилось возможности потреблять ресурсы и было вынуждено прекратить производство морепродукта.

После 170 сут вычислений потолок допустимой величины накопленного долга был дважды повышен: до 20 и до 35 б. е. Оба раза экономическая ситуация позволила предприятию возобновить производство за счет дальнейшего потребления ресурсов в долг. Однако накопленный долг снова достигал предельных значений и производство прекращалось в период с 235 по 250-е сутки, а также после 310 суток.

Следует заметить, что накопление долгов за потребление ресурсов не означает, что предприятие никак не оплачивало их стоимость. В соответствии с распределением оборотных средств на приобретение ресурсов (см. формулу (7)) в периоды выпуска продукции происходили ежедневные компенсационные отчисления ресурсной ренты, природоохранного налога и экологического штрафа, как показано на рис. 6, а — в. Однако динамика расчетов за ресурсы отставала от объемов их потребления в силу недостаточной рентабельности производства.

Рассмотренный пример показывает широкие возможности исследования процессов развития в сложных системах методами имитационного моделирования. Модульный принцип построения систем динамических уравнений, применяемый в методе адаптивного баланса влияний, позволяет легко добавлять новые процессы в модель интегрированного управления сложной системой (1) — (9).

Заключение

Несмотря на чисто имитационный характер рассмотренной выше модели эколого-экономической системы, в настоящей работе были получены некоторые общие выводы, относящиеся к проблеме интегрированного управления природно-хозяйственными комплексами море — суша. Сформулируем их кратко.

1: В основе интегрированного управления системами море — суша должна лежать системная концепция динамического баланса тех экологических и экономических процессов, которые существенны для поставленных целевых установок устойчивого развития конкретной системы.

2. Для количественного анализа возможных сценариев развития необходимо разрабатывать имитационные модели интегрированного управления. Примененный в настоящей работе метод адаптивного баланса влияний (ABC-метод) представляет хорошую основу для построения подобных моделей.

3. Статистический анализ корреляционных связей между моделируемыми процессами развития позволяет объективно идентифицировать коэффициенты динамических моделей интегрированного управления. Текущий реанализ сценариев развития открывает путь к использованию моделей с управляемыми коэффициентами влияния, т. е. динамико-стохастических ABC-моделей.

4. Применение интеллектуальных агентов в моделях интегрированного управления дает возможность представить в них локально принимаемые решения, что чрезвычайно важно с точки зрения приближения модельных сценариев развития к реальности.

5. Используемая в данной работе информационная технология ABC AGENT [3] отвечает основным задачам интегрированного управления и может быть успешно применена на практике для рационального потребления морских ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rotmans J. IMAGE: An Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect. — Amsterdam, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. — 1989.
2. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. — 225 с.
3. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Солодова С.М. Управление природными ресурсами. Имитационная технология ABC AGENT. — Севастополь, 2001. — 95 с. — (Препринт / ИАН Украины. МГИ).
4. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Тимченко И.И. Динамика эколого-экономических систем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ ИАНУ, 2001. — С. 62 – 77.
5. Тимченко И.Е., Совега Е.Е., Изумнова Е.М., Солодова С.М. Интеллектуальные агенты управления в моделях морских экосистем // Морской гидрофизический журнал. — 2003. — № 5. — С. 63 – 78.
6. Тимченко И.Е. Системные методы в гидрофизике океана. — Киев: Наук. думка, 1988. — 240 с.
7. Timchenko I.E. Stochastic modeling of ocean dynamics / Harwood Acad. Publ. — Chur — London — Paris — New-York. — 1984. — 240 p.

Морской гидрофизический институт НАН¹ Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 26.11.03
После доработки 03.02.04

ABSTRACT Information technology of the integrated management of «sea — land» systems is proposed. It contains 17 coupled biochemical processes and the economic model of industry consuming marine biological, mineral and ecological resources. Both models are constructed using the method of adaptive balance of causes (ABC) and intelligent agents. The integrated management technology includes the resource rent, the environmental protection tax and the ecological fine. The example of the integrated management under the simulated external effects on the marine ecosystem and the land economic system is considered.