



УДК 551.463

**В. Н. Еремеев<sup>1</sup>**, докт. физ.-мат. наук, акад. НАН України, ген. директор ОЦ НАН України,

**Е. М. Игумнова<sup>2</sup>**, инж., **И. Е. Тимченко<sup>2</sup>**, докт. физ.-мат. наук, зав. отд.

<sup>1</sup>Океанологический центр Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины,  
Севастополь, Украина

### ПРИБРЕЖНАЯ ЗОНА МОРЯ КАК ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Разработана общая структура информационно-технологического блока системы управления ресурсами прибрежной зоны моря, которая включает динамико-стохастическую модель морской экосистемы и экономическую модель прибрежной зоны. Для построения подобных моделей применен метод адаптивного баланса влияний (АВС-метод). Рассмотрен пример прогнозирования сценариев развития с усвоением данных наблюдений в простой эколого-экономической системе. Создана и испытана АВС-модель морской экосистемы и экономическая модель потребления морских ресурсов, содержащая логические операторы (агенты) управления. На основе этих моделей выполнены имитационные эксперименты по управлению процессами потребления ресурсов в прибрежной эколого-экономической системе.

**Ключевые слова:** баланс влияний, эколого-экономическая система, информационная технология управления

Зоны сопряжения суши и моря (мы будем называть их «прибрежными зонами моря» или ПЗМ, имея в виду уже укоренившийся в литературе термин «coastal management» [10, 11, 12]), представляют собой, с социальной точки зрения, сложные многоуровневые эколого-экономические системы. Для устойчивого развития прилегающего к ним региона суши необходимы информационные технологии и системы управления, ориентированные на достижение поставленных целей развития, которые в совокупности обеспечивают выбор наиболее рационального варианта использования ресурсов ПЗМ. Методической основой создания подобных технологий является системный подход [1]. Системное управление состоит из последовательности операций, реализующих выбранный модельный сценарий достижения целей, в ходе которых производится его адаптация к реально происходящим процессам и корректируется модель управления.

Системный подход позволяет предложить нетрадиционные методы построения моделей эколого-экономических систем ПЗМ. Эти методы ориентированы на изучение, формализацию и использование причинно-следственных связей между наблюдаемыми процессами и усвоение базисных данных и массивов специализированных наблюдений в динамических моделях [2]. В настоящей работе мы рассмотрим общую структуру информационной технологии управления процессами развития в ПЗМ, а также проблемы практического моделирования экосистем морской среды и экономических систем суши. В основу эколого-экономического моделирования ПЗМ будет положена идея баланса между экономическими потребностями использования ресурсов шельфовой зоны моря и сохранением экологического равновесия в экосистемах ПЗМ. Нахождение и поддержание этого баланса является важной и весьма сложной проблемой

устойчивого развития ПЗМ [3].

**Постановка задачи управления ресурсами прибрежной зоны моря.** Управление ресурсами ПЗМ является составной частью общей проблемы устойчивого развития для прилегающего к морю региона суши. Развитие региона сопровождается естественной и антропогенной эволюцией природных процессов и человеческого общества, потребляющего как ресурсы территории, прилегающей к морю, так и ресурсы шельфовой зоны. Целевые установки развития для региона суши обычно определяют характер и уровень потребления морских ресурсов. Экологические целевые установки устойчивого развития региона ПЗМ заключаются в сохранении биоразнообразия морских организмов, восстановлении запасов промысловых и культивируемых биообъектов, а также в обеспечении адекватной нагрузке ассимиляционной емкости акватории ПЗМ по отношению к сбрасываемым в нее отходам хозяйственной деятельности, представляющим угрозу биоразнообразию и биопродуктивности [5, 13]. Экономические цели развития состоят в рентабельном потреблении биологических, минеральных и рекреационных ресурсов ПЗМ с учетом экологических ограничений. Должна быть создана научно обоснованная система природной ренты за осуществление промысла и проведение других хозяйственных операций в ПЗМ, а также за использование его ассимиляционной емкости. Необходимо разработать систему экономических санкций за нарушение установленных норм потребления био-, минеральных и иных ресурсов и за загрязнение акватории ПЗМ.

Важную роль, безусловно, играют и социально значимые установки развития. К ним относится формирование в общественном сознании необходимости бережного отношения к ресурсам ПЗМ как общенародному достоянию, а также разработка и принятие нормативно-правовой базы, регламентирующей хозяйственное (государственное и частное) потребление ресурсов ПЗМ. Одной из социальных целей для приморских земель является

развитие рекреационного потенциала региона путем улучшения качества прибрежной морской среды. Контроль за реально происходящими процессами в регионе ПЗМ предполагает создание базисных мониторинговых систем, систем диагноза и прогноза биопродуктивности, минеральных ресурсов и ассимиляционной емкости отдельных районов ПЗМ.

Рассмотрим системную методологию управляемого развития на примере Северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ ЧМ) [3]. Диаграмма (рис.1) отображает этапы последовательного построения информационных технологий, обеспечивающих контроль состояния и использования ресурсов СЗШ ЧМ. Стрелки, направленные сверху вниз, идентифицируют иерархические уровни подчиненности систем, их моделей и информационных технологий управления.

На верхнем уровне расположена концептуальная модель социальной эколого-экономической системы (СЭЭС) "Юг Украины - СЗШ ЧМ". Процессы в этой системе представляют собой управляющие воздействия (внешние влияния) для агрегированной модели эколого-экономической системы всего СЗШ ЧМ, которая находится на среднем уровне иерархии. Система обеспечивает долгосрочные (L) сценарии динамики ресурсов и их потребления.

На нижнем уровне расположены модели и технологии контроля локальных динамических процессов (S-сценарии) в экосистемах отдельных районов СЗШ ЧМ, находящиеся под воздействием региональных L-сценариев развития. Таким путем реализуется системный принцип иерархической подчиненности процессов в сложных системах [8].

Стрелки, направленные слева направо, изображают движение (переход) от концептуальных моделей к соответствующим информационным технологиям управления. Концептуальные модели означают ментальные формулировки концепции развития систем данного уровня. Они строятся путем сбора и изучения экспертных сведений об имеющихся ресурсах

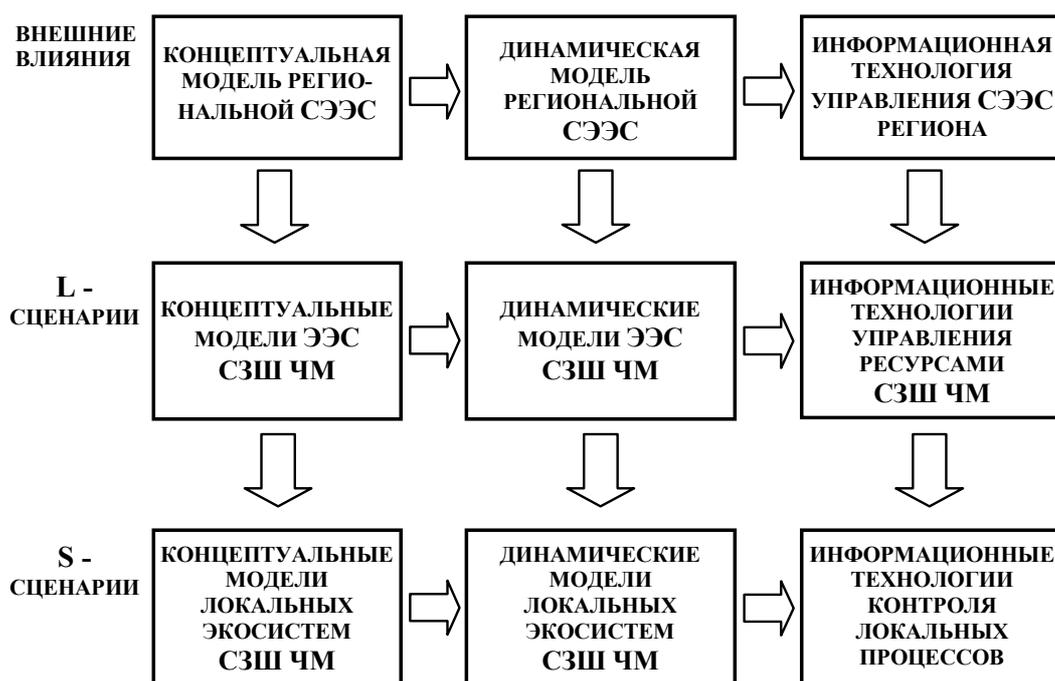


Рис. 1. Иерархия моделей и информационных технологий управления для региона северо-западного шельфа Черного моря

Fig. 1. Hierarchy of models and informational technologies for the North-Western Shelf region of the Black Sea

ПЗМ, возможностях и перспективах их использования. Концептуальные модели должны быть формализованы и введены в компьютер, с помощью которого можно многократно увеличить эффективность построения схем управления развитием. Этой стадии движения слева направо на диаграмме рис.1 соответствует этап построения динамических моделей. Крайний справа столбец блоков диаграммы представляет основные инструменты управления развитием СЗШ ЧСМ – информационные технологии управления различных уровней.

Системный анализ проблемы позволяет определить основные блоки подобных технологий управления [3]. Общая структура информационной технологии управления изображена на рис. 2. Технология управления призвана прогнозировать и контролировать показатели качества природной среды региона СЗШ ЧМ и управлять объемами потребления биологических, минеральных и экологических (ассимиляционная емкость) ресурсов. Общая модель управления содержит в своем составе модели

изменчивости гидродинамических и биогеохимических процессов, а также модели изменчивости экологического состояния и биопродуктивности промысловых районов. Они должны обеспечивать прогностические сценарии развития, являющиеся ответными реакциями на различные варианты внешних влияний, идущих со стороны природных и социальных эколого-экономических систем, расположенных на высшем уровне в иерархии систем. Управление экономической рентабельностью потребления ресурсов СЗШ ЧМ осуществляется через механизмы ресурсной ренты и штрафных санкций.

**Общие уравнения для прогнозирования сценариев развития.** Проблема контроля состояния морской среды в прибрежной зоне должна решаться средствами оперативной океанографии путем комбинированного использования динамических моделей природной среды и данных наблюдений. Применяются хорошо разработанные методы четырехмерного анализа полей морской среды [7]. Одним из наиболее перспективных подходов является

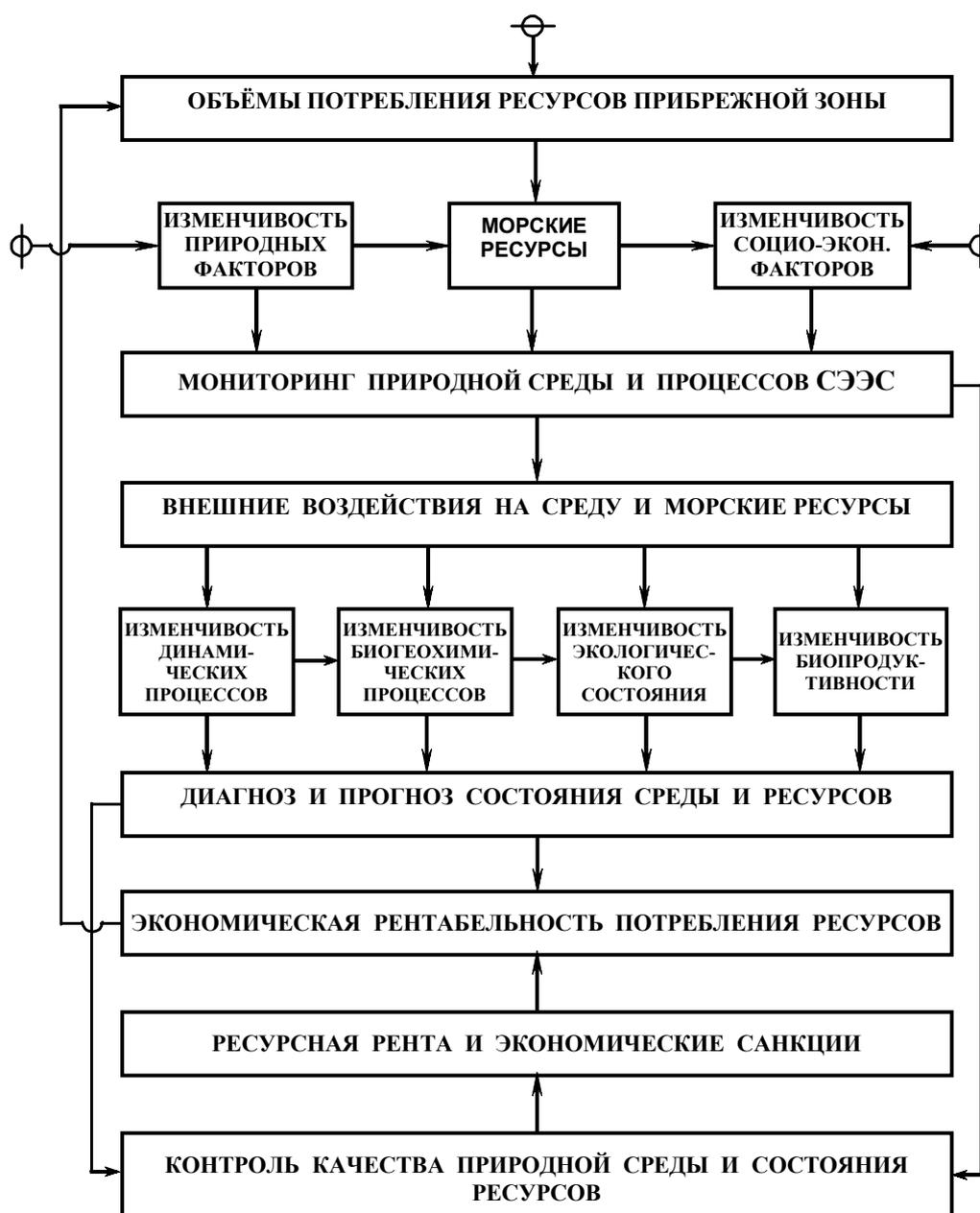


Рис.2. Общая структура информационной технологии управления ресурсами прибрежной зоны моря  
 Fig. 2. General structure of an informational technology for coastal management

метод динамико-стохастического моделирования [14]. Этот подход может быть распространен и на взаимосвязанные процессы (сценарии), которые развиваются в эколого-экономических системах ПЗМ. Этой цели служит метод адаптивного баланса влияний (АВС-метод), основанный на причинно-следственных связях между моделируемыми процессами [8]. Рассмотрим его суть.

Пусть имеются  $n$  переменных:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , которые характеризуют сценарии в эколого-экономической системе ПЗМ. Обозначим через  $a_{ij}x_j$  то влияние, которое оказывает процесс  $x_j$  на процесс  $x_i$ . Примем, что положительным влияние будет тогда, когда тенденции изменения  $x_j$  и  $x_i$  совпадают по знакам. Динамические уравнения АВС-модели, выражающие собой адаптивный баланс влияний внутри

системы, имеют вид

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

(i ≠ j) (1)

Причинно-следственные отношения между процессами предполагают наличие корреляционных связей между ними. Обозначим  $\{R_{ij}\}$  матрицу коэффициентов взаимной корреляции процессов. ABC-метод моделирования позволяет построить эволюционные уравнения для определения коэффициентов влияния  $a_{ij}$  через элементы корреляционной матрицы

$$\frac{da_{ij}}{dt} = R_{ij} - \sum_{k=1}^n a_{ik} R_{ik} - a_{ij}; \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n),$$

(i ≠ j ≠ k) (2)

При динамико-стохастическом подходе к моделированию природных процессов для корректировки ошибок прогнозов используются непосредственные наблюдения процессов. Будем обозначать их  $z_{ij}$ , понимая под этим символом измерение процесса  $x_i$  в момент времени  $t_j$ . Сравнение прогноза с соответствующим наблюдением в момент времени  $t_j$  дает ошибку или “невязку” прогноза  $z_{ij} - x_{ij}$ . Обозначим коэффициенты корреляции невязок прогнозов  $P_{ij} = E\{[z_i - x_i][z_j - x_j]\}$ . Тогда можно построить следующую систему эволюционных уравнений для коэффициентов взаимной корреляции невязок прогнозов

$$\frac{dP_{ij}}{dt} = \sum_{l=1}^n a_{il} P_{jl} + \sum_{k=1}^n a_{jk} P_{ik} - 2P_{ij}; \quad (i, j, k, l = 1, 2, \dots, n), \quad (l \neq i; k \neq j)$$

(3)

Решения системы уравнений (3) дают возможность находить оптимальные (по среднеквадратичному критерию) весовые коэффициенты  $g_{ij}$  для получения поправок к прогнозам процессов в последующие моменты времени

$$\frac{dg_{ij}}{dt} = P_{ij} - \sum_{k=1}^n g_{ik} P_{ik} - g_{ij}; \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n), \quad (i \neq j \neq k)$$

(4)

Теперь оптимальные прогностические оценки процессов  $x_i^{opt}$  могут быть представлены в виде следующей ABC-модели [8]

$$\frac{dx_i^{opt}}{dt} = x_i + \sum_{j=1}^n g_{ij} [z_{ij} - x_{ij}] - x_i^{opt} \quad (5)$$

Переменные, стоящие в квадратных скобках, должны быть получены в результате прогнозов на моменты времени поступления измерений процессов.

Таким образом, уравнения (1) - (5) представляют собой замкнутый алгоритм динамико-стохастической ABC-модели системы взаимосвязанных эколого-экономических процессов в ПЗМ. Алгоритм лежит в основе информационной технологии управления этими процессами, так как он обеспечивает адаптацию к наблюдениям прогностических сценариев развития.

**Уравнения DSM ABC для случая простой эколого-экономической системы.** Рассмотрим пример прогнозирования процессов в простой эколого-экономической системе, представленной на рис. 3.

Предположим, что система характеризуется четырьмя взаимосвязанными процессами:  $x_1, x_2, x_3$  и  $x_4$ .

Пусть  $x_1$  – размер популяции морских организмов в ПЗМ, представляющих экономический интерес в качестве биоресурса для производства морепродукта,  $x_2$  – концентрация живых организмов, служащих питанием для данного сообщества,  $x_3$  – концентрация загрязняющих веществ в воде, ограничивающих рост популяции,  $x_4$  – объем потребления организмов популяции за счет их промысла. Все уравнения, необходимые для построения DSM ABC-модели, могут быть выведены из общих уравнений (1) – (5), а матрица коэффициентов корреляции  $\{R_{ij}\}$  позволит идентифицировать коэффициенты модели

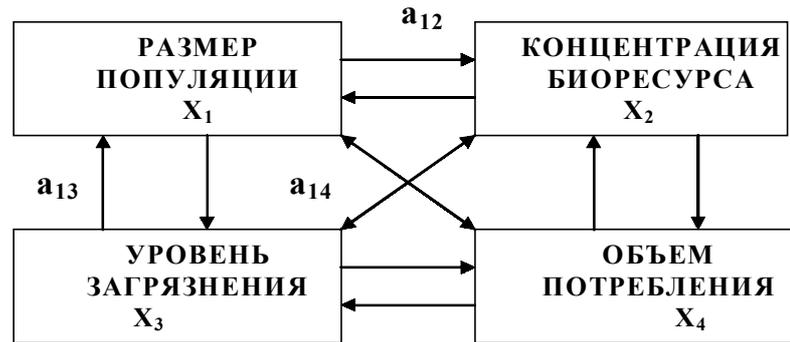


Рис. 3. Концептуальная модель простейшей эколого-экономической системы  
 Fig. 3. Concept model of a simple ecological-economic system

$$\begin{aligned} \frac{dx^{opt}_1}{dt} &= x_1 + \sum_{i=1}^4 g_{1i}[z_i - x_i] - x^{opt}_1 \\ \frac{dx^{opt}_2}{dt} &= x_2 + \sum_{i=1}^4 g_{2i}[z_i - x_i] - x^{opt}_2 \\ \frac{dx^{opt}_3}{dt} &= x_3 + \sum_{i=1}^4 g_{3i}[z_i - x_i] - x^{opt}_3 \\ \frac{dx^{opt}_4}{dt} &= x_4 + \sum_{i=1}^4 g_{4i}[z_i - x_i] - x^{opt}_4 \end{aligned} \quad (6)$$

Так, например, располагая архивными данными о динамике процессов  $x_1, \dots, x_4$  за некоторый период времени, можно выполнять прогнозы объемов популяции  $x_1$  с использованием АВС-модели (6) и данных наблюдений над процессами  $x_2, x_3$  и  $x_4$ . В проведенных нами вычислительных экспериментах были использованы имитированные архивные данные. Частные коэффициенты взаимной корреляции  $R_{12}, R_{13}$  и  $R_{14}$ , которые вычислялись на каждом шаге расчетов, показаны на рис. 4, а изменчивость соответствующих коэффициентов влияния – на рис. 5.

С вычисленными переменными коэффициентами влияния был выполнен прогноз процесса  $x_1$  на пять шагов вперед. Результаты прогнозирования приведены на рис. 6, где они могут быть сопоставлены с истинными значениями процесса  $x_1$ .

Далее была осуществлена корректировка прогнозов путем усвоения данных наблюдений и получения оптимальных оценок  $x^{opt}_1$  на основе алгоритма (1) - (5). Как следует из рис. 6, оптимальная оценка  $x^{opt}_1$  оказывается ближе к исходному ряду  $x_1$ , чем прогноз без усвоения данных наблюдений.

**Диагноз и прогноз состояния морской среды и ресурсов ПЗМ.** Диагностические и прогностические оценки процессов в морской среде должны осуществляться с помощью DSM морских экосистем.

Примеры использования АВС-метода для построения подобных моделей можно найти в ряде исследований [1 - 4].

Основываясь на результатах этих работ, все живые организмы, населяющие морскую среду, будем характеризовать 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. Значения биоресурса BR будут представлять биомассу всех остальных живых организмов, включая рыб и других промысловых объектов, чем и объясняется использование этого термина.

Учтем далее в аналитической схеме те из процессов, которые обеспечивают существование перечисленных классов живых организмов.

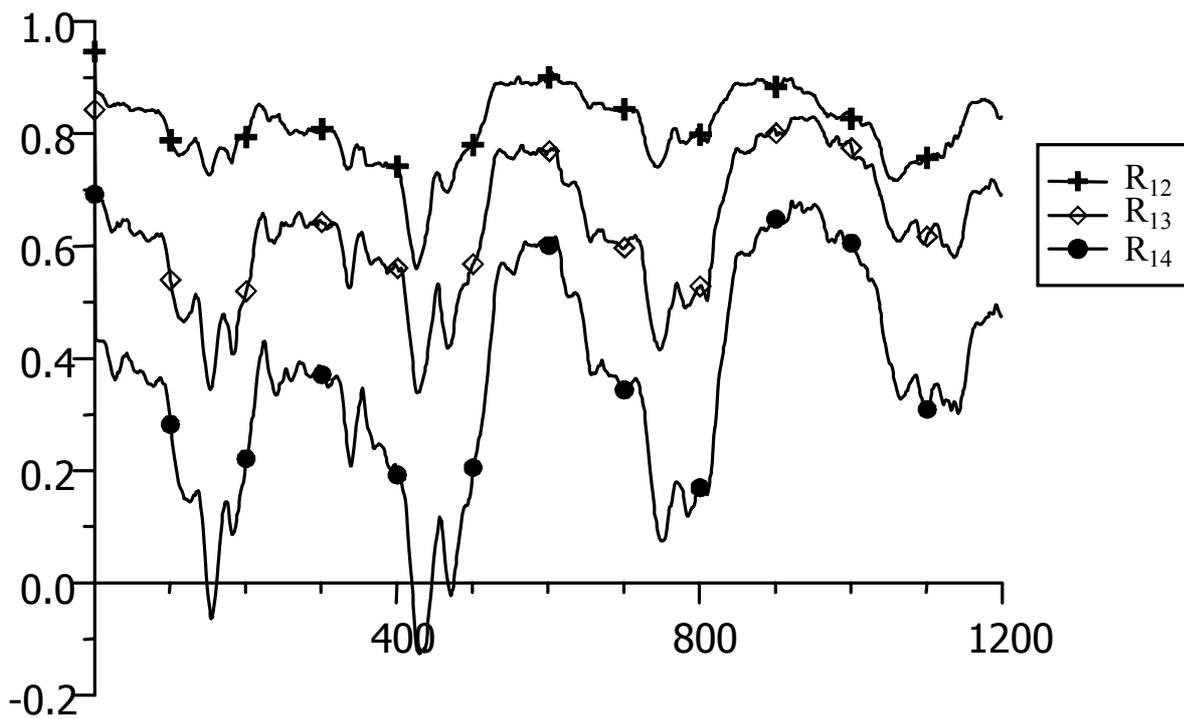


Рис. 4. Временная изменчивость коэффициентов взаимной корреляции  $R_{12}$  (1),  $R_{13}$  (2) и  $R_{14}$  (3)  
Fig. 4. Temporal variations of correlation coefficients  $R_{12}$  (1),  $R_{13}$  (2) and  $R_{14}$  (3)

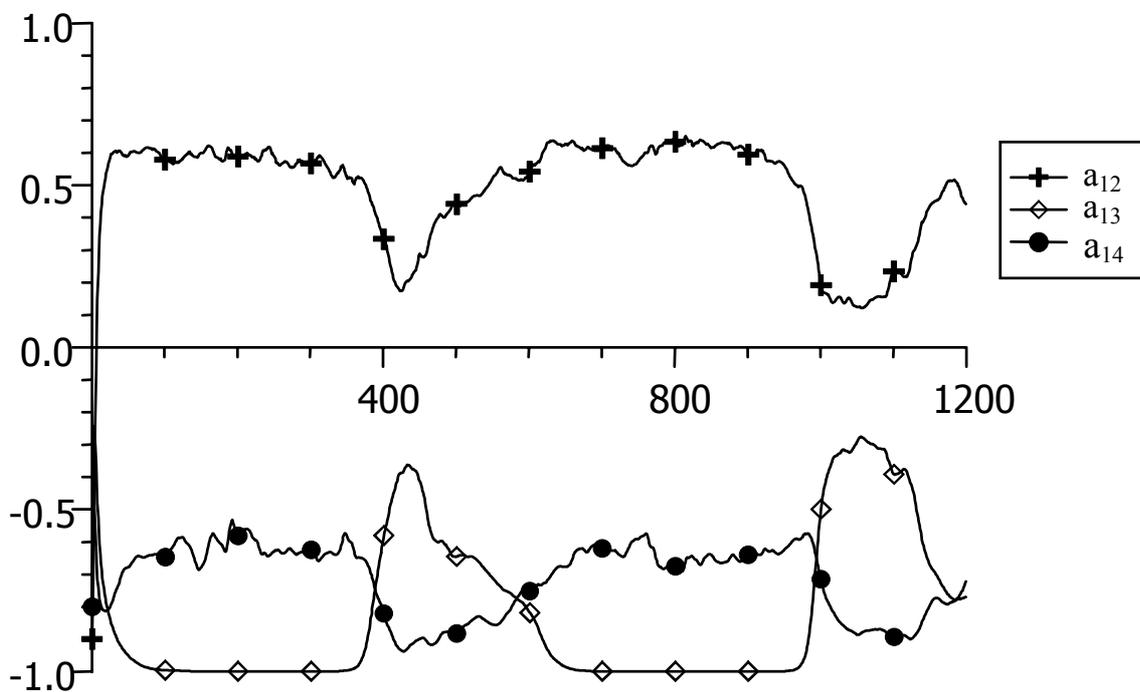


Рис. 5. Временная изменчивость коэффициентов влияний  $a_{12}$  (1),  $a_{13}$  (2) и  $a_{14}$  (3)  
Fig. 5. Temporal variations of cause coefficients  $a_{12}$  (1),  $a_{13}$  (2) and  $a_{14}$  (3)

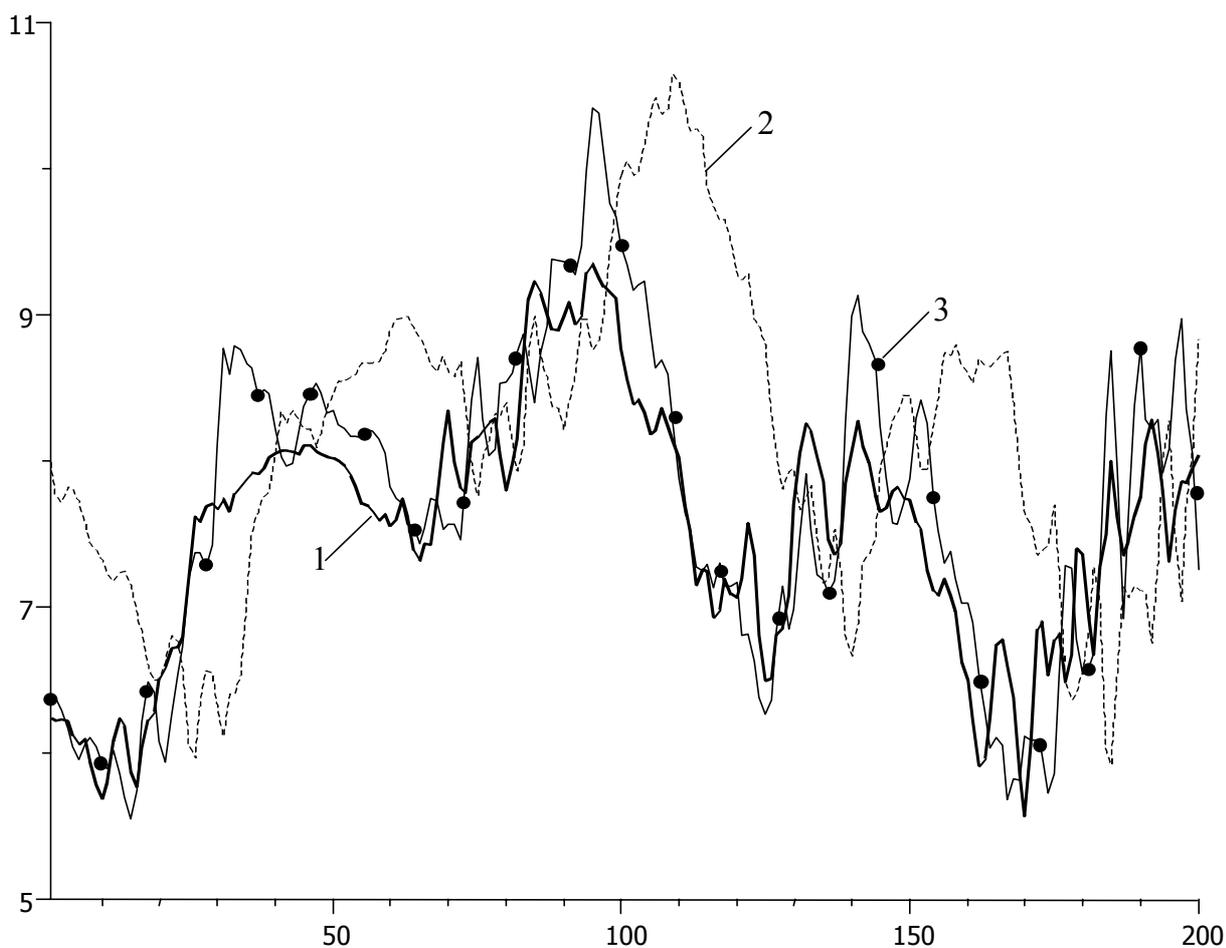
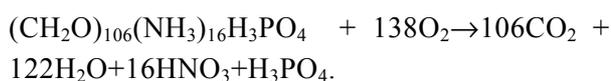


Рис 6. Результаты прогнозирования объема популяции морских организмов: 1 – имитированные «истинные» значения процесса  $x_1$ , 2 - прогноз ряда  $x_1$  по модели (1)-(2), 3 - оптимальный прогноз  $x_1$  по модели (1)-(5)  
 Fig. 6. Prediction results for a marine species population volume: 1 – simulated “real”  $x_1$  values, 2 – predicted  $x_1$  values by the model (1)-(2), 3 – optimal prediction of the  $x_1$  values by the model (1)-(5)

Ими будут солнечная радиация SR и изменения концентраций биогенных элементов – неорганических азота ( $\text{NO}_2, \text{NO}_3, \text{NH}_4$ ) и фосфора  $\text{PO}_4$ , а также углекислый газ  $\text{CO}_2$ . Отмирающие живые организмы являются источниками взвешенных фаз органического азота PON, углерода POC и фосфора PON, которые частично переходят в растворенные фазы DON, DOC и DOP. На завершающей стадии трансформации органического вещества образуются минеральные (неорганические) формы азота  $\text{NH}_4, \text{NO}_2, \text{NO}_3$  и фосфора  $\text{PO}_4$  в стехиометрическом соотношении N:P = 16:1, в соответствии со схемой Хорна [9]



Кроме уже обозначенной выше солнечной радиации, на экосистему влияют приводный ветер WF, температура морской воды TW и пресноводный сток RF, являющийся дополнительным источником органических веществ, биогенных элементов и загрязняющих веществ. На содержание биогенных элементов влияет также вертикальное перемещение водных масс VM.

Концептуальная модель экосистемы представляет собой схему взаимных влияний перечисленных процессов (рис. 7).

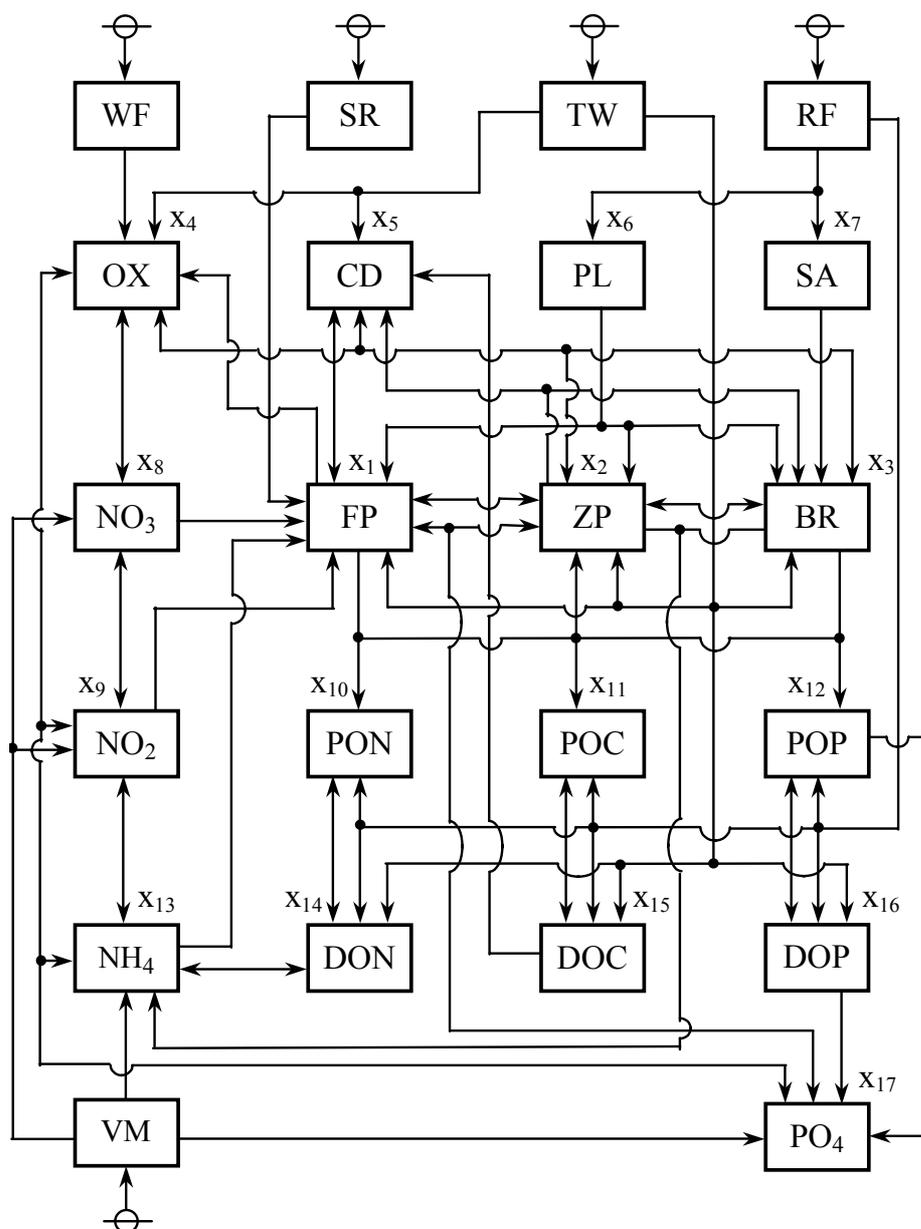


Рис. 7. Концептуальная модель морской экосистемы  
Fig. 7. Marine ecosystem concept model

Направления стрелок на этом рисунке соответствуют направлениям влияний. Принципиальным является тот факт, что рост и уменьшение концентрации биологических объектов зависят одновременно от нескольких факторов. В соответствии с принятой нами концептуальной моделью, фитопланктон FP требует для своего существования наибольшее количество необходимых ему видов ресурсов. В каждый конкретный момент времени один из этих видов неизбежно будет лимитирующим в том смысле, что именно от его количества будут зависеть в ко-

нечном итоге пределы роста или уменьшения концентрации фитопланктона.

**Формализация концептуальной модели экосистемы.** Формализация концептуальной модели экосистемы означает построение системы уравнений, соответствующей схеме причинно-следственных связей, изображенной на рис.7. Мы воспользуемся для этого методом адаптивного баланса влияний [8].

Представим среднее значение  $x_1^*$  некоторого процесса  $x_1(t)$  в экосистеме как равновесное состояние модуля 1, в котором

этот модуль находится при отсутствии внешних влияний со стороны модулей 2,3,...,N. Будем использовать общее уравнение ABC-метода [8]

$$dx_1/dt = c_1x_1(t)[x_1^* - (x_1(t) - a_{12}x_2(t) - a_{13}x_3(t) - \dots - a_{1N}x_N(t))]. \quad (7)$$

Объединение подобных уравнений, построенных для всех N модулей, позволяет получить математическую модель экосистемы. Учитывая приведенные на рис.7 обозначения переменных, можно построить ABC-модель морской экосистемы [3]

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= c_1x_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))]\}; \\ dx_2/dt &= c_2x_2(t)\{x_2^* - AD_{21} - AD_{24} - [x_2(t) - AP(x_1, x_4, \alpha_{ZP}) + a_{23}x_3(t) - a_{2/TW}(TW(t)) + a_{26}x_6(t)]\}; \\ dx_3/dt &= c_3x_3(t)\{x_3^* - AD_{32} - AD_{34} - [x_2(t) - AP(x_2, x_4, \alpha_{BR}) + a_{37}x_7(t) - a_{3/TW}(TW(t)) + a_{36}x_6]\}; \\ dx_4/dt &= c_4x_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) + 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_{4/TW}(TW(t))]\}; \\ dx_5/dt &= c_5x_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) - a_{5/TW}(TW(t))]\}; \\ dx_6/dt &= c_6x_6(t)\{x_6^* - [x_6(t) - a_{6/RF}(RF(t))]\}; \\ dx_7/dt &= c_7x_7(t)\{x_7^* - [x_7(t) - a_{7/RF}(RF(t))]\}; \\ dx_8/dt &= c_8x_8(t)\{x_8^* - [x_8(t) - AP(x_4, x_9) + a_{81}x_1(t) - a_{8/VM}(VM(t))]\}; \\ dx_9/dt &= c_9x_9(t)\{x_9^* - [x_9(t) - AP(x_4, x_{13}) + a_{91}x_1(t) - a_{9/VM}(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) + a_{10/14}x_{14}(t) - a_{10/RF}(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) + a_{11/15}x_{15}(t) - a_{11/RF}(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) + a_{12/16}x_{16}(t) - a_{12/RF}(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) - a_{13/2}x_2 - a_{13/3}x_3 - a_{13/VM}(VM(t))]\}; \\ dx_{14}/dt &= c_{14}x_{14}(t)\{x_{14}^* - [x_{14}(t) - a_{14/10}x_{10}(t) - a_{14/RF}(RF(t)) - a_{14/TW}(TW(t))]\}; \\ dx_{15}/dt &= c_{15}x_{15}(t)\{x_{15}^* - [x_{15}(t) - a_{15/11}x_{11}(t) - a_{15/RF}(RF(t)) - a_{15/TW}(TW(t))]\}; \\ dx_{16}/dt &= c_{16}x_{16}(t)\{x_{16}^* - [x_{16}(t) - a_{16/12}x_{12}(t) - a_{16/RF}(RF(t)) - a_{16/TW}(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_{17/VM}(VM(t))]\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Чтобы учесть лимитирующие факторы в модели экосистемы, необходимо предусмотреть в ней логические операции слежения за количествами ресурсов, необходимых для жизнедеятельности биологических объектов. Эти операции выполняют так называемые интеллектуальные агенты управления [3]. Присутствующие в правых частях уравнений (8) слагаемые вида AD представляют собой пер-

вую группу агентов управления, которые контролируют поведение экосистемы вблизи границ ее гомеостаза. Они определяются выражением типа

$$AD_{15} = IF\{x_5(t) > x_5^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{15}t)]\} \quad (9)$$

Мы предполагаем, что, когда концентрации жизненно важных веществ достигают своих предельно допустимых значений, начинаются процессы деградации экосистемы, ко-

торые сопровождаются быстрым уменьшением биомасс FP, ZP и BR. Границы гомеостаза 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  $\alpha_{ij}$ .

Вторая группа интеллектуальных агентов, имеющая в модели (8) обозначения вида AP, контролирует зависимости биомасс FP, ZP и BR от наличия необходимых им видов ресурсов

$$AP(a_{54}x_4, a_{5/15}x_{15}) = \min \{x_4, x_{15}\} [a_{54} \text{ or } a_{5/15}]. \quad (10)$$

Наиболее простые логические операции управления связаны с трансформацией веществ при химических реакциях и бактериальном разложении. Мы предполагаем, что подобная трансформация происходит практически без временных задержек. Поэтому агенты вида AP контролируют лишь лимитирующие факторы преобразований.

Третья группа агентов представлена логическими условиями следующего вида

$$AP(x_1, x_4, \alpha_{ZP}) = IF \{M(t) - M(t - \tau) < 0; a_{2M} x_M; a_{2M} [M(t) + [M(t - \tau) - M(t)] \exp(-\alpha_{ZP}t)]\},$$

$$\text{где } M(t) = \min \{x_1(t), x_4(t)\}, \quad (11)$$

что позволяет следить за лимитирующими факторами, устанавливать соответствующие им коэффициенты, а также учитывать инерционность процессов роста биомассы FP, ZP и BR.

Для проведения имитационных экспериментов все моделируемые процессы путем линейных преобразований были представлены в безразмерной форме и приведены к общему интервалу изменчивости (0,10). Рассматривалась ситуация, когда уменьшение концентрации кислорода связано с попаданием в морскую экосистему повышенного количества органических веществ и биогенных элементов, выносимых речным стоком RF. Эксперимент

был приурочен к летнему периоду года, когда в условиях штиля образующийся в море запирающий слой препятствует поступлению кислорода из атмосферы. Как известно, повышенные расходы кислорода на окисление органики речного происхождения, а также органических веществ, образованных внутри экосистемы за счет дополнительных поступлений с речным стоком биогенных элементов, может быть одной из причин «заморных» явлений.

На рис. 8 и 9 показаны сценарии развития процессов в экосистеме, обусловленных ростом и последующим уменьшением концентраций неорганических веществ. Агенты, управляющие работой модели, были поставлены в условия, имитирующие выход экосистемы на границы гомеостаза по концентрации кислорода для зоопланктона и по концентрации зоопланктона для биоресурса. С этой целью в выражениях для агентов  $AD_{24}$  и  $AD_{32}$  были установлены значения параметров  $\alpha_{24} = \alpha_{32} = 0,8$ .

Дважды в период выноса органических веществ и биогенных элементов речным стоком кислород достигал предельно допустимых концентраций. (125 и 135 шаги схемы вычислений). В эти моменты концентрации зоопланктона и биоресурса также резко падали. С этим было связано некоторое сокращение потребления кислорода, в результате чего его концентрация незначительно увеличивалась, а экосистема возвращалась в пределы границ гомеостаза. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что применение интеллектуальных агентов управления в уравнениях моделей морских экосистем позволяет моделировать сложные сценарии развития химико-биологических процессов, которые происходят в реальных экосистемах.

**Экономическая рентабельность потребления ресурсов.** Еще одной проблемой практической реализации информационной технологии управления, показанной на рис. 2, является построение экономической модели

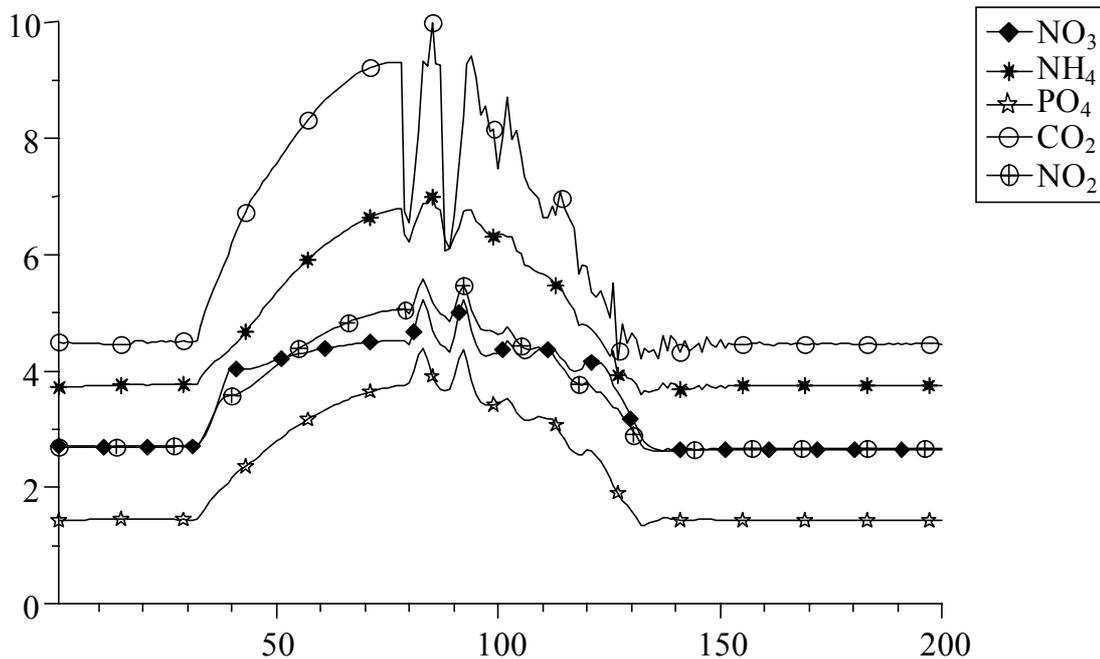


Рис. 8. Имитированный вынос биогенов с речным стоком:  $\text{NO}_3$  - нитраты,  $\text{NH}_4$  - аммиак,  $\text{PO}_4$  - фосфаты,  $\text{CO}_2$  - углекислый газ,  $\text{NO}_2$  - нитриты

Fig. 8. Simulated biogenic impact with the river flow:  $\text{NO}_3$  - nitrates,  $\text{NH}_4$  - ammonia,  $\text{PO}_4$  - phosphates,  $\text{CO}_2$  - carbon dioxide,  $\text{NO}_2$  - nitrites

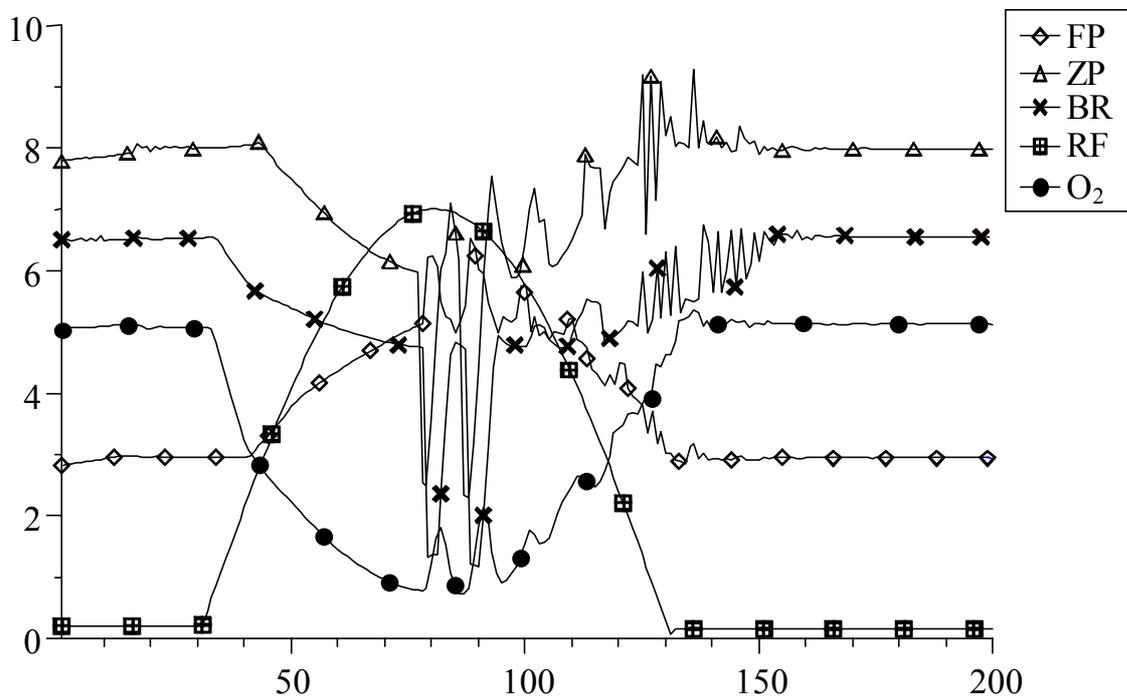


Рис. 9. Реакция экосистемы на вынос биогенов с речным стоком: FP -фитопланктон, ZP - зоопланктон, BR - биоресурс, RF - речной сток,  $\text{O}_2$  - кислород

Fig. 9. Ecosystem response on the biogenic impact with the river flow: FP -phytoplankton, ZP - zooplankton, BR - bioresource, RF - river flow,  $\text{O}_2$  - oxygen

потребления ресурсов ПЗМ (рис. 10). Любое производство, основанное на потреблении природных ресурсов, находится в динамическом контакте с двумя рынками: рынком ресурсов и рынком сбыта своей продукции. По-

этому управление устойчивым развитием возможно лишь на основе постоянных наблюдений (контроля) за динамикой ресурсов окружающей среды и меняющейся конъюнктурой рынков.

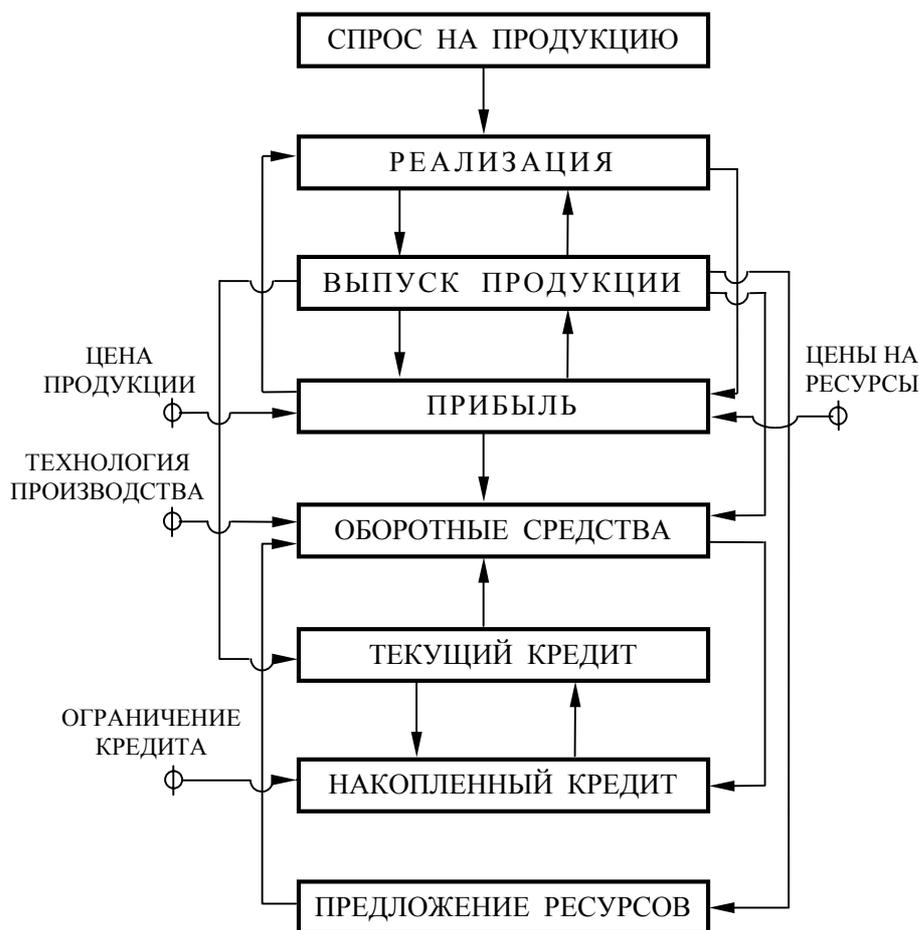


Рис. 10. Структура экономической модели производства ПЗМ  
Fig. 10. Economic model structure for a coastal zone production

Пусть в единице производимого производством товара содержится  $y_1$  необходимого экономического ресурса (материалы, оборудование, транспортная доступность природных ресурсов, рабочая сила и др.),  $y_2$  природного ресурса (минеральное сырье, биоресурсы и др.) и  $y_3$  экологического ресурса (ассимиляционная емкость природной среды).

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 кредита  $H_3$ .

Так, например, для количественной оценки объема произведенной продукции имеем

$$H_k = H_j + V_k - S_k, \quad (12)$$

где  $H_k$  - количество продукции (товара) в текущий момент времени  $k$ ,  $H_j$  - его количество в предыдущий момент времени  $j$ ,  $V_k$  - поступление и  $S_k$  - расходование товара за период времени от момента  $j$  до момента  $k$ .

Введем цену товара  $x_2$  и его себестоимость  $x_4$ . Тогда норма прибыли  $N_k$ , будет определена разностью этих величин  $N_k = x_{2k} - x_{4k}$ . Реализация товара становится невыгодной, когда  $N_k < 0$ . Поэтому операции, выполняемые агентом реализации продукции, должны иметь вид

$$S_k = IF(N_k < 0; 0; R), R_k = IF(D_k < H_j; D_k; H_j), \quad (13)$$

где  $D_k$  - текущий спрос на товар. Очевидно, что выпуск товара будет ограничен тем видом ресурсов, запасы которого оказываются минимальными. Если обозначить  $M_j$  - минимальный объем ресурсов, имеющийся у производства, то объем выпуска продукции будет определен следующими логическими операциями, которые выполняет агент, управляющий выпуском:

$$V_k = IF(D_k < H_j; 0; M_{1k}), M_{1k} = IF(D_k - H_j < M_j; D_k - H_j; M_j), \\ M_j = \min(m_{1j}^1; m_{1j}^2; m_{1j}^3), \quad m_{1j}^i = H_{1j}^i / y_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

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

$$I_k = IF((P_k - E_k) < 0; 0; P_k - E_k), \quad P_k = x'_{2k} S_k, \\ E_k = x'_{4k} V_k. \quad (15)$$

Экономическая система ПЗМ (для краткости: предприятие) может закупить недостающие ресурсы и увеличить выпуск продукции до объемов, определяемых текущим спросом. Будем считать, что имеющиеся у нее оборотные средства  $H_2$  распределяются на приобретение ресурсов в той же пропорции, в которой каждый из трех видов ресурсов участвует в производстве товара. Введем коэффициенты пропорциональности

$$\rho_{ik} = p'_{ik} y_i [p'_{1k} y_1 + p'_{2k} y_2 + p'_{3k} y_3]^{-1}, \\ i = 1, 2, 3. \quad (16)$$

Тогда на приобретение  $i$  - ресурса система 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 определяется следующим пассивным балансом

$$H_{2k} = H_{2j} + I_{0k} - S_{3k}, \quad (17)$$

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

$$S_{3k} = IF(H_{3j} \theta < H_{2j}; H_{3j} \theta; H_{2j}). \quad (18)$$

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

$$V_{3k} = p'_{1k} V_{1k}^1 + p'_{2k} V_{1k}^2 + p'_{3k} V_{1k}^3. \quad (19)$$

Величина накопленного кредита будет выражена балансовым соотношением

$$H_{3k} = H_{3j} + V_{3k} - S_{3k}. \quad (20)$$

Представим запасы ресурсов, которыми располагает производство, балансовыми соотношениями

$$H_{1k}^i = H_{1j}^i + V_{1k}^i - S_{1k}^i. \quad (21)$$

Расходование каждого вида ресурсов пропорционально объему выпуска продукции  $S_{1k}^i = V_k y_{1i}$ . В том случае, когда запас ресурса достаточен для выпуска требуемого объема продукции, закупка ресурса не производится. В противном случае закупается некоторое количество ресурса  $F_{1k}^i$

$$V_{1k}^i = IF((D_k - H_j) y_i < H_{1j}^i; 0; F_{1k}^i). \quad (22)$$

Функция  $F_{1k}^i$  ограничивает приобретение ресурсов теми объемами оборотных средств, которыми располагает предприятие. Ее выполняет агент-контролер приобретения ресурсов.

Если количество свободных оборотных средств, выделяемых на приобретение  $i$  -того вида ресурса, составляет  $\rho_i H_{2j}$ , а стоимость недостающего количества ресурса равна

$p_j^i (y_i D_k - H_{1j}^i)$ , то уравнение для этой функции принимает вид

$$F_{1k}^i = IF (p_j^i (y_i D_k - H_{1j}^i) < \rho_i H_{2j}; y_i D_k - H_{1j}^i; R_{1k}^i). \quad (23)$$

$R_{1k}^i$ , призванная контролировать ситуацию с кредитом, уже накопленным предприятием к моменту времени  $k$ , выполняется агентом-контролером накопленного кредита. Он ограничивает приобретение ресурса по мере того, как величина накопленного кредита при-

ближается к заранее установленной норме  $\rho_i H_3^*$ .

Диаграмма связей в моделях потребления каждого вида ресурсов приведена на рис. 11. Отметим, что модель ресурсного обеспечения производства является достаточно общей. Она применима к любым видам ресурсов: как природных, так и экономических.



Рис. 11. Операции ресурсного обеспечения в экономической модели ПЗМ  
Fig. 11. Supply chain operations in the economic model for a coastal zone production

**Интегрированное управление эколого-экономической системой прибрежной зоны моря.** В качестве примера рассмотрим совместное использование модели морской экосистемы (8) и экономической модели потребления морских ресурсов (12) – (23) в информационной технологии управления процессами в ПЗМ. Основными переменными рынка морепродуктов должны быть спрос на товар  $z_1$ , стоимость товара  $z_2$ , его качество  $z_3$  и себестоимость производства  $z_4$ .

АВС-уравнения модели рынка морепродукта представим в следующем виде [3]

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

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 качества ресурсов  $\mu_j$ . Себестоимость

производства зависит от интегрального параметра стоимости ресурсов  $\eta_j$ . Таким образом, интегрированное управление экономической системой ПЗМ может осуществляться путем регулирования допустимой величины ее долга за пользование морскими ресурсами  $H_3^*$ .

Рассмотрим результаты одного из вычислительных экспериментов, выполненных с помощью предложенной информационной технологии [3]. Имитированные внешние воздействия на модель ПЗМ изображены на рис. 12 а. В первой части временного интервала для реализации эксперимента имитировалось увеличение речного стока, во второй – подъем глубинных вод. Практически все процессы в экосистеме отреагировали на поступление с пресноводным стоком химических соединений и органики (см. рис. 12 б, в). Аналогичная реакция приурочена ко времени подъема глубинных вод.

Вместе с тем, на графиках содержания химических соединений заметны небольшие колебания, которые объясняются нелинейными процессами приспособления живых организмов к новым условиям существования.

Повышенное содержание органики привело к резкому увеличению расхода 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. 12 в. В свою очередь, колебания зоопланктона отразились на сценариях развития биоресурса BR и всех других связанных с ним сценариях.

Перейдем теперь к рассмотрению реакции экономической системы суши на сценарии развития процессов формирования ресурсов в море. В качестве оценки стоимости био-

ресурса была принята зависимость, противоположная величине его концентрации в море, т.е.  $p^1 = 10 - x_3$ , а в качестве стоимости минеральных ресурсов – аналогичная величина  $p^2 = 10 - x_4$ , связанная с концентрацией кислорода, обеспечивающей существование биообъектов в море. Стоимость экологического ресурса была принята пропорциональной концентрации загрязняющих веществ в море  $p^3 = x_6$ .

Соответствующие сценарии приведены на рис.13 а, из которого следует, что 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.

Динамика стоимости ресурсов отразилась на кривой спроса на морепродукт (рис. 13 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.

На рис.13, б 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 достаточных средств для приобретения ресурсов в нужном ему объеме и было вынуждено вести потребление ресурсов в кредит, что сопровождалось ростом накопленного долга  $H_3$ . Орган интегрированного управления прибрежной системой, ориентируясь на информацию об экологическом состоянии морской среды, установил в начальный период времени (1 – 100 сутки) предельно допустимую величину накопленного предприятием долга в размере  $H_3^* = 45$  безразмерных -

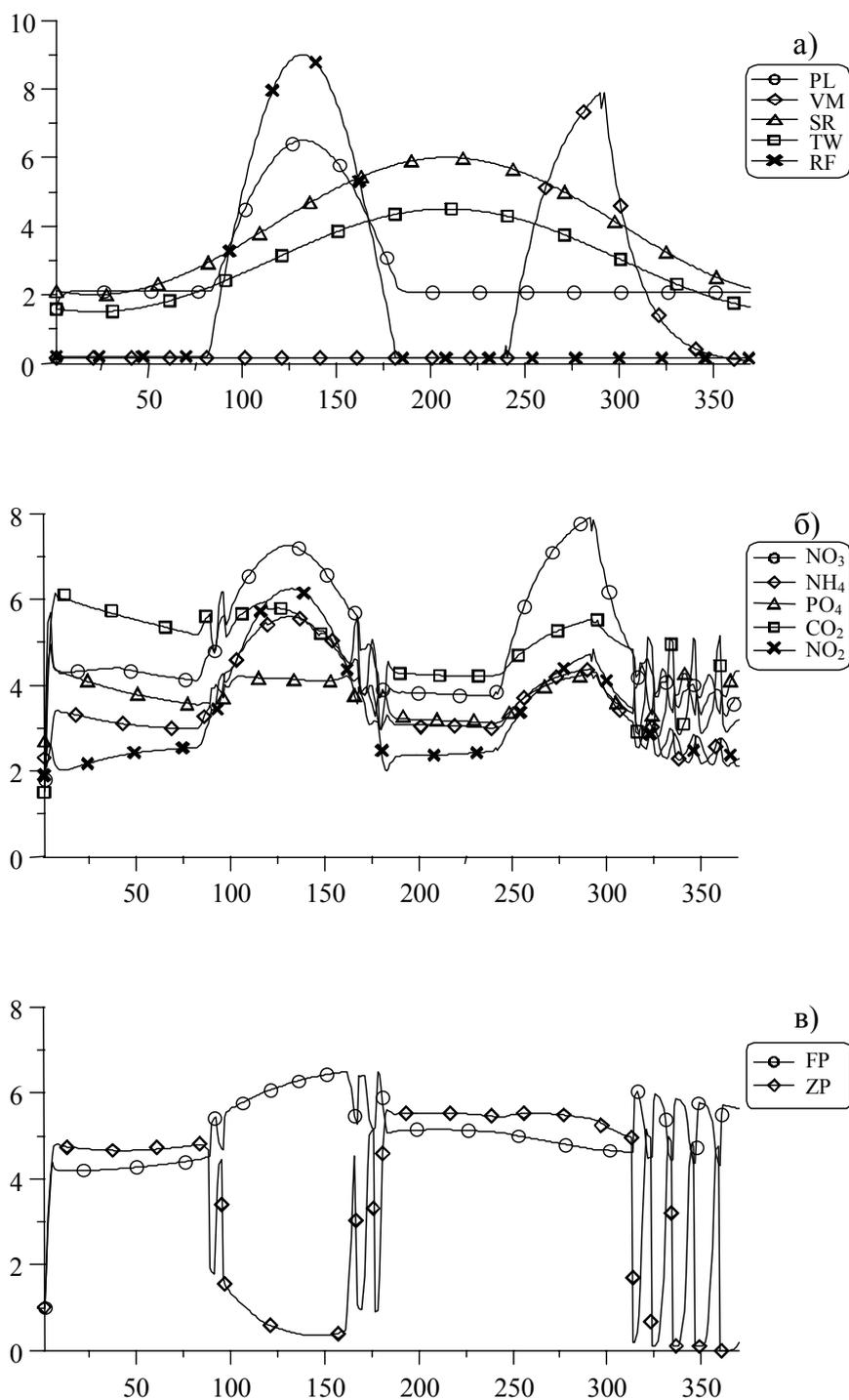


Рис. 12 а, б, в. Реакция морской экосистемы на имитированное внешнее воздействие: поступление биогенов с речным стоком (с 80 по 160 шаг) и за счет подъема глубинных вод (с 240 по 330 шаг вычислений)  
 Fig. 12 а, б, в. Marine ecosystem response on external forcing: biogenic impact with the river flow (from 80 to 160 calculation time steps) and with the upwelling (from 240 to 330 calculation time steps)

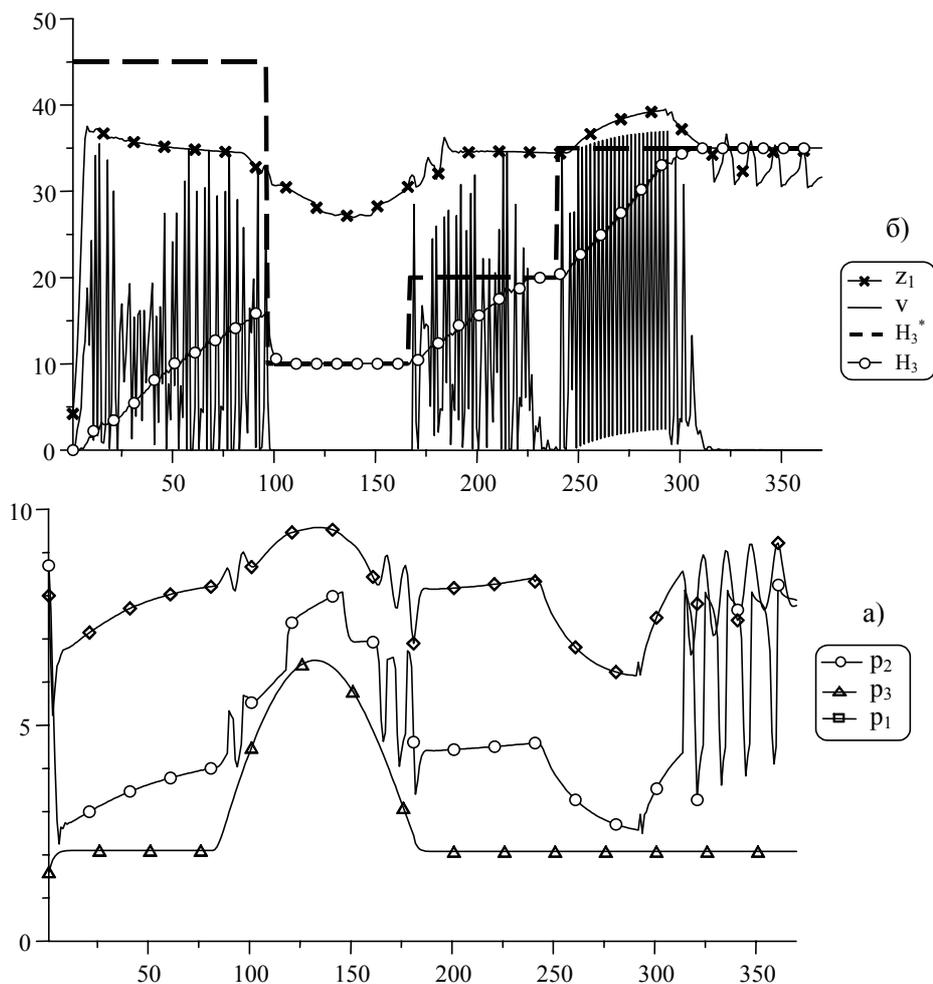


Рис. 13 а, б. Интегрированное управление потреблением ресурсов ПЗМ:

а) динамика стоимости потребляемых ресурсов морской среды:  $p_1$  – биоресурсы,  $p_2$  – минеральные,  $p_3$  – экологические;

б) управление выпуском продукции путем изменения допустимого объема накопленного долга  $H_3^*$ . ( $v$  – суточные объемы производства морепродуктов).

Fig. 13 a, б. Integrated management by the coastal zone resources consumption:

a) Cost dynamics for marine resources to be used:  $p_1$  – biorecources,  $p_2$  – mineral resources,  $p_3$  – ecological resources;

b) Production output management by the control of accumulated debts  $H_3^*$ . ( $v$  – daily marine production output)

единиц (б.е.). В этих условиях предприятие продолжало накапливать долги за потребление ресурсов. Однако, по мере ухудшения экологической ситуации, произошедшей в период времени с 70 по 170 сут, допустимая величина накопленного долга была снижена до 10 б.е. Предприятие 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 сутки, а также после 310 суток.

В проведенных исследованиях получила подтверждение основная системная концепция управления ресурсами ПЗМ: применение экономических санкций и взимание ресурсной ренты могут служить в качестве эффективных механизмов, поддерживающих динамический баланс экологических процессов и хозяйственно-производственной активности в прибрежной зоне моря. Текущий реанализ наблюдаемых сценариев развития [14] открывает путь к использованию моделей с управляемыми коэффициентами влияния, т.е. динамико-стохастических АВС-моделей ПЗМ, типа рассмотренных в данной статье, для решения тактических и проработки стратегических задач интегрированного управления прибрежными зонами суши и морскими акваториями.

1. Еремеев В. Н., Тимченко И. Е. Устойчивое развитие. Системный подход / Приморские города и поселки Украины. Совместно к устойчивому развитию. - Севастополь: 2002.
2. Еремеев В. Н., Игумнова Е. М., Тимченко И. Е. Моделирование причинно-следственных связей в морских экосистемах. // Морск. эколог. журн. - I, № 1. - 2002 - С. 16 - 32.
3. Еремеев В. Н., Игумнова Е. М., Тимченко И. Е. Моделирование эколого-экономических систем. - Севастополь.: ЭКОСИ-Гидрофизика. 2004. - 320 с.
4. Игумнова Е. М., Тимченко И. Е. Моделирование процессов адаптации в экосистемах.// Морск. гидрофизич. журн. - 2003. - № 1 - С. 46 - 57.
5. Математические модели в биологической океанографии / Под ред. Т. Платта, К. Х. Манна, Р. Е. Улановича. - Париж.: ЮНЕСКО, 1984. - 195 с.
6. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981. - 487 с.
7. Тимченко И. Е. Системные методы в гидрофизике океана. - Киев: Наук. думка, 1988. - 180 с.
8. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. - Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. - 225 с.
9. Хорн Р. Морская химия. М.: Наука, - 1972. - 398 с.
10. Cicin-Saint B., Knecht R. W. Integrated Coastal and Ocean Management. Concepts and Practices. Island Press. Washington, D.C.: Covelo, California. - 1998. - 518 p.
11. Eremeev V. N., Timchenko I. E., Igumnova E. M. Sustainable Development and Integrated Management of Natural-Industrial Coastal Systems / A Gateway to Sustainable Development: Proceedings of 30<sup>th</sup> International Conference "Pacem in Maribus". October 27 - 30, 2003. Kiev, Ukraine. - Kiev^ The International Ocean Institute, 2004. - P. 342 - 354.
12. Field J. G., Hempel G., Summerhayes C. P. Oceans 2020. Science, Trends, and the Challenge of Sustainability. Washington-Covelo-London: Island Press. - 2002. - 365 p.
13. Pears D., Moran D. The Economic Value of Biodiversity. - London: Earthscan Publications, -1994. - 172 p.
14. Timchenko I. E. Stochastic Modeling of Ocean Dynamics. - Chur - London - Paris - New-York: Harwood Acad. Publ, - 1984. - 320 p.
15. Timchenko I. E., Igumnova E. M. Systems Reanalysis / Proceedings of the Second WCRP International Conference on Reanalysis (Reading, UK, August 1999). - World Meteorological Organization Publications: WMO/TD-No. 985, January 2000. - P. 107 - 110.

Поступила 21 октября 2004 г.

**Прибережна зона моря як еколого-економічна система. В. Н. Єремєєв, К. М. Ігумнова, І. Є. Тімченко.** Розроблена загальна структура інформаційно-технологічного блоку системи управління ресурсами прибережної зони моря. Вона включає динаміко-стохастичну модель морської екосистеми та економічну модель прибережної зони. Для побудови подібних моделей застосований засіб адаптивного балансу впливів (АВС-AGENT). Розглянутий приклад прогнозування сценаріїв розвитку із засвоєнням даних спостережень в простій еколого-економічній системі. Створена і випробувана АВС-МОДЕЛЬ морської екосистеми та економічна модель споживання морських ресурсів, що містить логічні оператори (агенти) управління. На основі цих моделей здійснені імітаційні експерименти по управлінню процесами споживання ресурсів в прибережній еколого-економічній системі.

**Ключові слова:** баланс впливів, еколого-економічна система, інформаційна технологія управління

**Ecological-economic coastal management. V. N. Eremeev, E. M. Igumnova, I. E. Timchenko.** A general structure of informational technology is suggested for the coastal management of marine resources. It comprises dynamic-stochastic model for marine ecosystem and the coastal economic model. The Adaptive Balance of Causes (or ABC) method has been used for practical models construction. An example of simple coastal ecological-economic model is considered to obtain the model to predict development scenarios with observational data assimilation. ABC model of marine ecosystem has been developed and tested. Multi-agent economic model of marine resources consumption is offered. Based on these models simulated management experiments have been made to determine balance ecological-economic conditions for natural resources use in a coastal system.

**Key words:** balance of causes, ecological-economic system, information management technology