

## Управление моделью экосистемы прибрежной зоны моря

Представлена модель процессов развития в экосистеме прибрежной зоны моря, построенная методом адаптивного баланса влияний (метод *ABC – Adaptive Balance of Causes*). Модель содержит 9 переменных (фито- и зоопланктон, личинки рыб, рыбы, кислород, углекислый газ, соленость, биогены и детрит), находящихся под влиянием солнечной радиации, приводного ветра, температуры моря и речного стока. В уравнениях модели присутствуют агенты управления, контролируемые зависимость элементов пищевой цепи от жизненно важных для них ресурсов и условий среды обитания. Построены сценарии процессов развития при имитируемом годовом ходе внешних воздействий. Рассмотрена возможность управления запасом рыбных ресурсов путем регулирования выноса биогенов и детрита с речным стоком. Предложен механизм управления, основанный на слежении за концентрацией растворенного кислорода в морской воде. С помощью вычислительных экспериментов показано, что *ABC*-модель процессов развития в экосистеме прибрежной зоны моря позволяет имитировать сценарии управления выносом биогенов и детрита в море с целью сохранения запасов рыбных ресурсов.

**Введение.** Прибрежная зона моря (ПЗМ) служит источником разнообразных ресурсов для прилегающего к ней приморского региона. Одновременно она находится под влиянием хозяйственной деятельности на его территории. Поэтому экосистема ПЗМ и экономическая система региона образуют единый сложный природно-хозяйственный комплекс. Проблема устойчивого развития подобных комплексов интенсивно изучается в связи с быстрым ростом населения ПЗМ и повышением роли подобных зон в экономике различных стран.

В частности, в разработанной Европейской Комиссией Демонстрационной программе по управлению ПЗМ [1] отмечается, что морское побережье Европы на протяжении веков играет ключевую роль в экономическом развитии континента и в повышении качества жизни людей. Управление ПЗМ – это непрерывный процесс поддержки административных решений, направленных на изучение и рациональное использование социальных, природных и экономических ресурсов в сложной системе приморский регион – прибрежная зона моря. В программе отмечено, что управление ресурсами ПЗМ невозможно без системного подхода [2], учитывающего весь комплекс причинно-следственных связей между геофизическими, экономическими, социальными, экологическими, культурными и другими процессами, развивающимися в подобных системах.

В ряде исследований проблема нарастающего конфликта интересов в потреблении ресурсов ПЗМ была рассмотрена с позиций тесной и прямой кооперации между участниками этих процессов [3, 4]. Эти исследования ориентированы на создание методик долгосрочного планирования ресурсов ПЗМ с использованием динамических моделей и экспертных оценок хозяйственной активности в приморском регионе, отражающих качественные изменения в прибрежной морской среде [5 – 7]. Была отмечена сложность нахождения оптимальных решений по использованию ресурсов в конфликтных ситуациях, возникающих в условиях конкурентной борьбы за ресурсы.

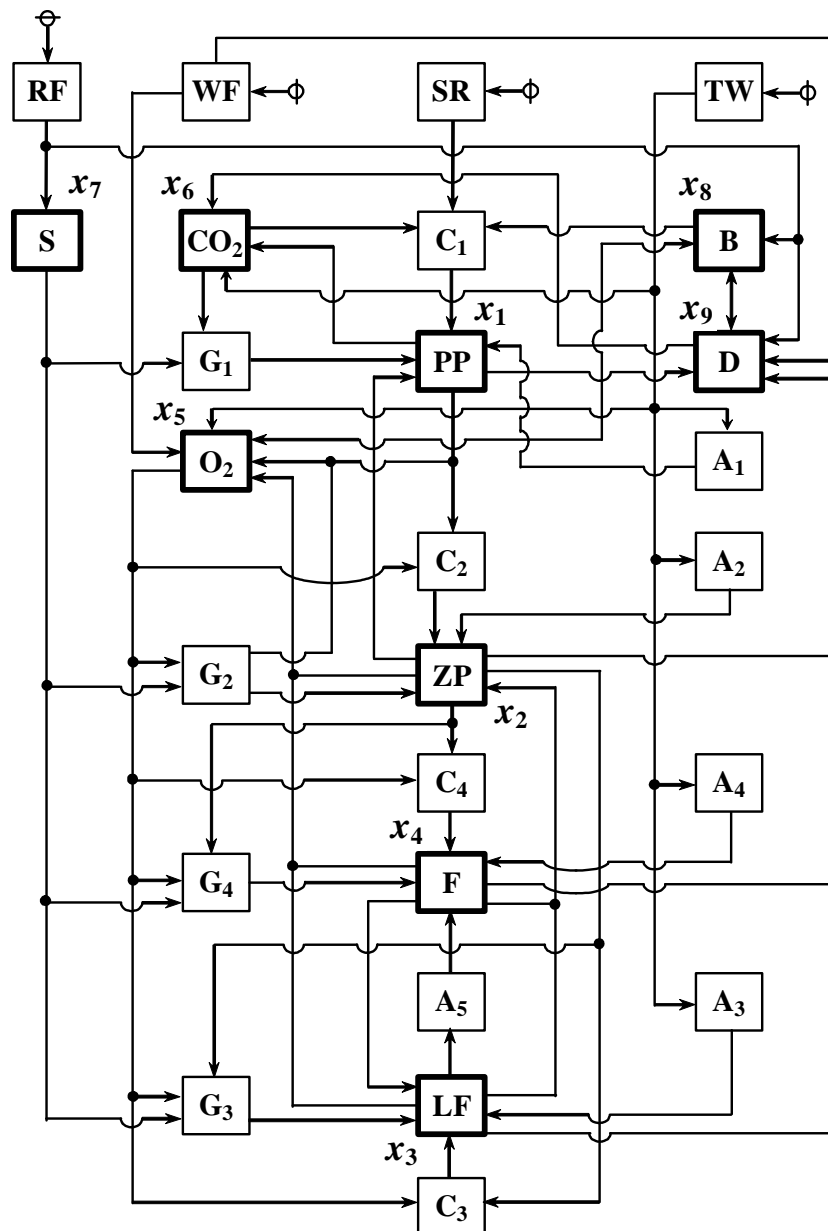
Суть проблемы управления ресурсами ПЗМ сводится к оптимизации природопользования по многим критериям одновременно. Принятие решений в подобных условиях невозможно без прогноза сценариев развития в сложной социальной эколого-экономической системе ПЗМ, для построения которых необходима общая динамическая модель этой системы. Составными элементами этой общей модели должны стать модель эколого-экономической системы приморского региона и экологическая модель морской экосистемы, которые учитывают динамику морских ресурсов, потребляемых регионом, и дают возможность прогнозировать экономическую рентабельность производства морепродуктов. В такой постановке проблема управления морскими биоресурсами была сформулирована в монографиях [2, 8], где для прогнозирования сценариев развития был применен метод адаптивного баланса влияний – *Adaptive Balance of Causes (ABC-метод)* [9].

В настоящей работе мы продолжим изучение возможностей этого метода при построении системы поддержки решений, принимаемых с целью контроля морских биоресурсов в экосистеме ПЗМ. Основное внимание будет уделено использованию управляющих функций в уравнениях *ABC*-модели морской экосистемы (агентов управления [10]). Поэтому для моделирования морских биоресурсов, подлежащих контролю, будет применена относительно простая модель процессов развития, которая содержит 9 переменных (фито- и зоопланктон, личинки рыб, рыбы, кислород, углекислый газ, соленость, биогены и детрит), находящихся под влиянием солнечной радиации, приводного ветра, температуры моря и речного стока. Мы сочли целесообразным провести проверку алгоритмов управления сценариями развития в морских экосистемах на имитированных данных наблюдений, поскольку при отработке самой методики управления необходимо варьировать большое количество параметров модели, что принципиально невозможно при использовании натуральных данных.

**Концептуальная модель процессов в морской экосистеме.** В соответствии с принципами системного подхода [9] построение концептуальной модели экосистемы должно начинаться с анализа целевой установки моделирования и с оценки связанных с этой постановкой задачи процессов, развивающихся в экосистеме и в окружающей ее природной среде. На этом начальном этапе моделирования полезно выявить те из процессов, которые образуют замкнутые цепочки причинно-следственных связей, существующих между ними и образующих основу системы. Такой подход, обычно используемый в методе системной динамики [11], позволяет учесть наиболее важные для целей моделирования процессы, а также уточнить саму постановку задачи, с тем, чтобы выбранная система процессов была ей адекватна. Речь, таким образом, идет о взаимной адаптации целевой установки моделирования и структуры будущей концептуальной модели.

В качестве целевой установки моделирования выберем прогнозирование сценариев развития процессов в морской экосистеме, которые представляют собой средние за период времени порядка нескольких суток концентрации живых организмов и химических веществ в некотором объеме морской среды, характеризующем прибрежную зону моря. Среди живых организмов будем рассматривать четыре категории объектов моделирования: фитопланк-

тон (*PP*), зоопланктон (*ZP*), личинки рыб (*LF*) и рыбы (*F*). Тогда из элементов, которые обеспечивают жизнедеятельность этих организмов, в модели должны быть использованы: солнечная радиация (*SR*), углекислый газ ( $CO_2$ ), кислород ( $O_2$ ), соленость (*S*), биогены (*B*) и детрит (*D*). В качестве основных внешних влияний на экосистему будем рассматривать речной сток (*RF*), интенсивность приводного ветра (*WF*) и температуру морской воды (*TW*). Построенная с учетом этих обозначений концептуальная модель процессов в морской экосистеме приведена на рис. 1.



Р и с. 1. Концептуальная модель интегральных процессов в морской экосистеме

Подобный выбор процессов обеспечивает большое количество замкнутых цепей обратных связей в модели экосистемы. В частности, фитопланктон выделяет кислород, потребляемый зоопланктоном, личинками рыб и рыбами, которые увеличивают концентрацию углекислого газа, потребляемого фитопланктоном. Эта цепочка дает пример положительной обратной связи, которая стабилизируется цепочкой отрицательной связи по кислороду, так как с ростом концентраций зоопланктона, личинок рыб и рыб концентрация кислорода убывает.

Кроме переменных, выбранных в качестве компонентов модели экосистемы, необходимо учесть зависимость живых организмов экосистемы от условий их существования в морской среде. Существуют предельно допустимые концентрации элементов пищевой цепи, кислорода и углекислого газа, при достижении которых начинается резкое сокращение популяции живых организмов вследствие их гибели. Для описания условий гомеостаза в модели экосистемы должны быть введены логические операторы или агенты управления  $G_j$ , следящие за наступлением подобных условий и включающие операции ограничения концентраций живых организмов.

Важную роль в формировании процессов в экосистеме играют эффекты реакции некоторых процессов на причины, вызывающие эти реакции. Например, увеличение концентрации фитопланктона не может вызвать рост концентрации зоопланктона, если оно не будет сопровождаться одновременным увеличением концентрации кислорода в морской воде. В каждый момент времени для любого из живых организмов экосистемы существует минимальное количество одного из ресурсов развития. Влияние этого ресурса, лимитирующего рост популяции организмов, должно быть учтено в модели экосистемы с помощью еще одной группы агентов управления, которую мы будем обозначать символом  $C_i$ .

Температура морской воды существенно влияет на скорости процессов развития живых организмов. Как правило, существует один вполне определенный интервал температур, в котором условия развития складываются наиболее благоприятно. Для того чтобы учесть это обстоятельство, мы введем в структуру модели экосистемы агенты управления  $A_k$ , которые будут усиливать процессы роста живых организмов в некоторых диапазонах наиболее благоприятных для них значений температуры моря.

Для проведения вычислительных экспериментов с моделью экосистемы мы будем предполагать, что речной сток выносит в море продукты отходов производства и бытовые отходы, которые содержат биогены и детрит. Одновременно речной сток приводит к изменениям солености за счет частичного распреснения морской воды. Температура моря, а также солнечная радиация в расчетах имели явно выраженный годовой ход, тогда как интенсивность ветрового перемешивания верхнего слоя была принята случайной. Конвективное перемешивание, связанное с ним сезонное увеличение концентрации биогенов, а также оседание детрита не учитывались.

**Формальная модель процессов в морской экосистеме.** Для представления концептуальной модели, изображенной на рис. 1, в форме системы дифференциальных уравнений введем следующие обозначения концентраций

веществ и объектов в морской воде:  $x_1$  – фитопланктон,  $x_2$  – зоопланктон,  $x_3$  – личинки рыб,  $x_4$  – рыбы,  $x_5$  – кислород,  $x_6$  – углекислый газ,  $x_7$  – соленость,  $x_8$  – биогены,  $x_9$  – детрит. С учетом схемы влияний (рис. 1) выпишем уравнения для каждой переменной модели, используя для этой цели *ABC*-метод [9]. В этом методе скорости изменения всех моделируемых процессов представляются в виде суммы двух балансирующих друг друга тенденций (роста и убывания). Обратные связи управляют каждой из тенденций таким образом, что все процессы принимают значения, которые согласованы между собой и образуют состояние динамического баланса с внешними влияниями, приложенными к системе. Все уравнения динамической *ABC*-модели экосистемы имеют одинаковую структуру, но отличаются между собой теми конкретными влияющими функциями, которые должны быть учтены в правых частях уравнений в соответствии со схемой рис. 1. В случае, когда тенденциями роста и убывания управляют линейные функции влияния, все уравнения *ABC*-модели экосистемы принимают форму уравнений логистического типа [12] и могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1 \{ 1 - c_1 [x_1 - C_1(x_6, x_8, SR) + G_1(x_6) + G_1(x_7) + a_{12}x_2 - A_1(TW)] \},$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_2 \{ 1 - c_2 [x_2 - C_2(x_1, x_5) + G_2(x_5) + G_2(x_7) - a_{23}x_3 - A_2(TW)] \},$$

$$\frac{dx_3}{dt} = x_3 \{ 1 - c_3 [x_3 - C_3(x_2, x_5) + G_3(x_5) + G_3(x_7) - a_{34}x_4 - A_3(TW)] \},$$

$$\frac{dx_4}{dt} = x_4 \{ 1 - c_4 [x_4 - C_4(x_2, x_5) + G_4(x_5) + G_4(x_7) - A_5(x_3) - A_4(TW)] \},$$

$$\frac{dx_5}{dt} = x_5 \{ 1 - c_5 [x_5 - a_{51}x_1 + a_{52}x_2 + a_{53}x_3 + a_{54}x_4 + a_{58}x_8 + a_{59}x_9 - a_{5/WF}WF] \},$$

$$\frac{dx_6}{dt} = x_6 \{ 1 - c_6 [x_6 + a_{61}x_1 - a_{69}x_9 + a_{6/TW}TW] \},$$

$$\frac{dx_7}{dt} = x_7 \{ 1 - c_7 [x_7 + a_{7/RF}RF] \},$$

$$\frac{dx_8}{dt} = x_8 \{ 1 - c_8 [x_8 - a_{85}x_5 - a_{69}x_9 + a_{8/RF}RF] \},$$

$$\frac{dx_9}{dt} = x_9 \{ 1 - c_9 [x_9 - a_{91}x_1 - a_{92}x_2 - a_{93}x_3 - a_{94}x_4 - a_{9/RF}RF] \},$$

где  $\alpha_{ij}$  – коэффициенты влияния метода *ABC*,  $c_i$  – масштабирующие параметры метода.

Группу агентов управления, контролирующую зоны гомеостаза живых организмов, представим следующими формулами:

$$\begin{aligned}
G_1(x_6) &= \text{IF}\{x_6 > x_{16}^0; 0; k_{16}^0 [1 - \exp(-\alpha_{16}t)]\}, \\
G_1(x_7) &= \text{IF}\{x_7 < x_{17}^0; k_{17}^0 [1 - \exp(-\alpha_{17}t)]; \text{IF}\{x_7 > x_{17}^{\max}; k_{17}^{\max} [1 - \exp(-\alpha_{17}t)]; 0\}\}, \\
G_2(x_5) &= \text{IF}\{x_5 > x_{25}^0; 0; k_{25}^0 [1 - \exp(-\alpha_{25}t)]\}, \\
G_2(x_7) &= \text{IF}\{x_7 < x_{27}^0; k_{27}^0 [1 - \exp(-\alpha_{27}t)]; \text{IF}\{x_7 > x_{27}^{\max}; k_{27}^{\max} [1 - \exp(-\alpha_{27}t)]; 0\}\}, \\
G_3(x_5) &= \text{IF}\{x_5 > x_{35}^0; 0; k_{35}^0 [1 - \exp(-\alpha_{35}t)]\}, \\
G_3(x_7) &= \text{IF}\{x_7 < x_{37}^0; k_{37}^0 [1 - \exp(-\alpha_{37}t)]; \text{IF}\{x_7 > x_{37}^{\max}; k_{37}^{\max} [1 - \exp(-\alpha_{37}t)]; 0\}\}, \\
G_4(x_5) &= \text{IF}\{x_5 > x_{45}^0; 0; k_{45}^0 [1 - \exp(-\alpha_{45}t)]\}, \\
G_4(x_7) &= \text{IF}\{x_7 < x_{47}^0; k_{47}^0 [1 - \exp(-\alpha_{47}t)]; \text{IF}\{x_7 > x_{47}^{\max}; k_{47}^{\max} [1 - \exp(-\alpha_{47}t)]; 0\}\}.
\end{aligned}$$

В этих формулах нижняя и верхняя границы зон гомеостазиса обозначены  $x^0$  и  $x^{\max}$  соответственно. Параметры  $k_i$  и  $\alpha_{ij}$  устанавливают скорости гибели живых организмов вне зон гомеостазиса.

Для выполнения операций ограничения роста живых организмов в зависимости от имеющихся ресурсов включим в уравнения модели группу агентов лимитирования:

$$\begin{aligned}
C_1(t) &= \text{IF}\{M_1(t) - M_1(t - \tau_1) < 0; M_1(t); [M_1(t) + (M_1(t - \tau_1) - M_1(t)) \exp(-\alpha_{C_1}t)]\}, \\
M_1(t) &= \min\{\alpha_{16}x_6(t); \alpha_{18}x_8(t); \alpha_{1/SR}SR(t)\}; \\
C_2(t) &= \text{IF}\{M_2(t) - M_2(t - \tau_2) < 0; M_2(t); [M_2(t) + (M_2(t - \tau_2) - M_2(t)) \exp(-\alpha_{C_2}t)]\}, \\
M_2(t) &= \min\{\alpha_{21}x_1(t); \alpha_{25}x_5(t)\}; \\
C_3(t) &= \text{IF}\{M_3(t) - M_3(t - \tau_3) < 0; M_3(t); [M_3(t) + (M_3(t - \tau_3) - M_3(t)) \exp(-\alpha_{C_3}t)]\}, \\
M_3(t) &= \min\{\alpha_{32}x_2(t); \alpha_{35}x_5(t)\}; \\
C_4(t) &= \text{IF}\{M_4(t) - M_4(t - \tau_4) < 0; M_4(t); [M_4(t) + (M_4(t - \tau_4) - M_4(t)) \exp(-\alpha_{C_4}t)]\}, \\
M_4(t) &= \min\{\alpha_{42}x_2(t); \alpha_{45}x_5(t)\}.
\end{aligned}$$

Эта группа агентов допускает мгновенное влияние на живые организмы тех процессов, значения которых уменьшаются (т.е. имеют негативную тенденцию). В противном случае, когда имеет место рост процесса, его влияние на живые организмы запаздывает на некоторое время  $\tau_k$ . Параметры  $\tau_k$  в этих выражениях устанавливают скорости роста организмов при увеличении ресурсных возможностей морской среды. Таким образом, данная группа агентов совмещает в себе функции лимитирования и задержки на время роста организмов.

Введем в уравнения модели экосистемы агенты управления  $A_i$ , которые будут усиливать процессы роста живых организмов, когда температурные условия становятся наиболее благоприятными для их развития. Обозначим наиболее благоприятные значения температур  $TW_i^*$  и будем использовать для агентов  $A_i$  гауссовские функции [12] следующего вида:

$$A_i(TW) = \exp[-\beta_i(TW - TW_i^*)^2], \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

Еще один агент управления  $A_5(x_3)$  следует ввести в уравнение концентрации рыб  $x_4$  для того, чтобы имитировать влияние личинок рыб на эту переменную величину. Мы предполагаем, что при ухудшении условий питания и дыхания концентрация личинок рыб убывает пропорционально величине лимитирующего фактора. В противоположном случае, когда условия жизни личинок сохраняются или улучшаются, их влияние на концентрацию рыб проявляется с запаздыванием  $\tau_5$ , которое учитывает конечное время роста личинок до размеров рыб:

$$A_5(x_3) = \text{IF}\{x_3(t) - x_3(t - \tau_5) < 0; \alpha_{43}x_3(t - \tau_5); \alpha_{43}x_3(t) + [\alpha_{43}x_3(t - \tau_5) - \alpha_{43}x_3(t)][1 - \exp(-\alpha_{43}t)]\},$$

Заметим, что мы исключаем из рассмотрения раннюю стадию развития личинок рыб, когда они питаются исключительно фитопланктоном. По сути дела, речь идет не о личинках рыб, а о молоди, которая еще не достигла репродуктивного возраста, но перешла на питание зоопланктоном и продолжает расти, хотя и более медленно, чем личинки на ранней стадии развития. Именно этот период развития учитывается в модели с использованием агента  $A_5(x_3)$ . Построенная формальная модель содержит большое количество коэффициентов, что дает возможность имитировать развитие процессов в ПЗМ при различных условиях.

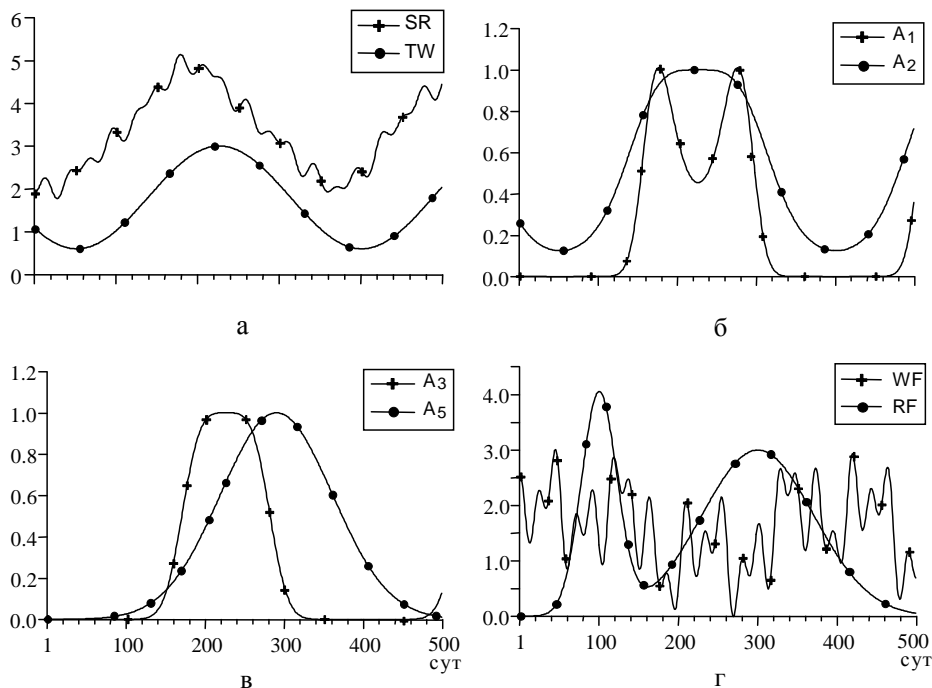
**Имитация процессов развития в морской экосистеме.** Для проведения вычислительных экспериментов все моделируемые процессы были приведены к общей безразмерной шкале изменчивости переменных  $[0,10]$ . Коэффициенты уравнений выбирались в диапазоне значений от 0,1 до 0,8. В качестве единицы измерения времени был использован шаг вычислений в 1 сут. Расчеты производились на 500 шагов по времени. Первоначально ставилась задача оценить чувствительность модели экосистемы по отношению к внешним воздействиям, а также проверить устойчивость решений уравнений в зависимости от выбора значений их коэффициентов.

На рис. 2 приведены имитированные сценарии годового хода внешних воздействий, приложенных к экосистеме. Для моделирования годового хода температуры морской воды была использована гармоническая функция с годовым периодом и максимумом, приходящимся на август. Сценарий освещенности моря был представлен аналогичной функцией с максимумом в середине июня и незначительной по интенсивности модуляцией амплитуд годовой гармоникой, что имитировало случайное распределение облачных дней в течение года (см. рис. 2, а).

Влияние температуры морской воды на концентрации фитопланктона и зоопланктона было имитировано с помощью агентов управления  $A_1$  и  $A_2$ . Функции управления этих агентов показаны на рис. 2, б. Было принято, что наиболее благоприятный температурный режим для фитопланктона существует весной (май) и осенью (октябрь), тогда как для зоопланктона этот режим охватывает весь период времени с мая по октябрь. С помощью функции влияния температуры моря на личинки рыб (агент  $A_3$ ) был выбран наиболее благоприятный для их развития период времени с июня по сентябрь (теплолюбивые рыбы). Кроме того, было учтено конечное время роста личинок

рыб, т.е. время перехода личинок в категорию рыб, которое в расчетах составляло 100 дней.

Соответствующие графики функций приведены на рис. 2, в. На рис. 2, г изображены сценарии влияния ветрового воздействия и речного стока на морскую среду. Предполагалось, что годовой ход интенсивности ветрового перемешивания верхнего слоя моря отсутствует. Ветровое воздействие носило случайный характер в течение всего года. Что касается речного стока, то его сценарий имитировал увеличение выноса биогенов и детрита в море дважды в течение года: в марте (резкое увеличение, вызванное весенним половодьем) и в ноябре (менее резкое увеличение, связанное с осенними осадками).



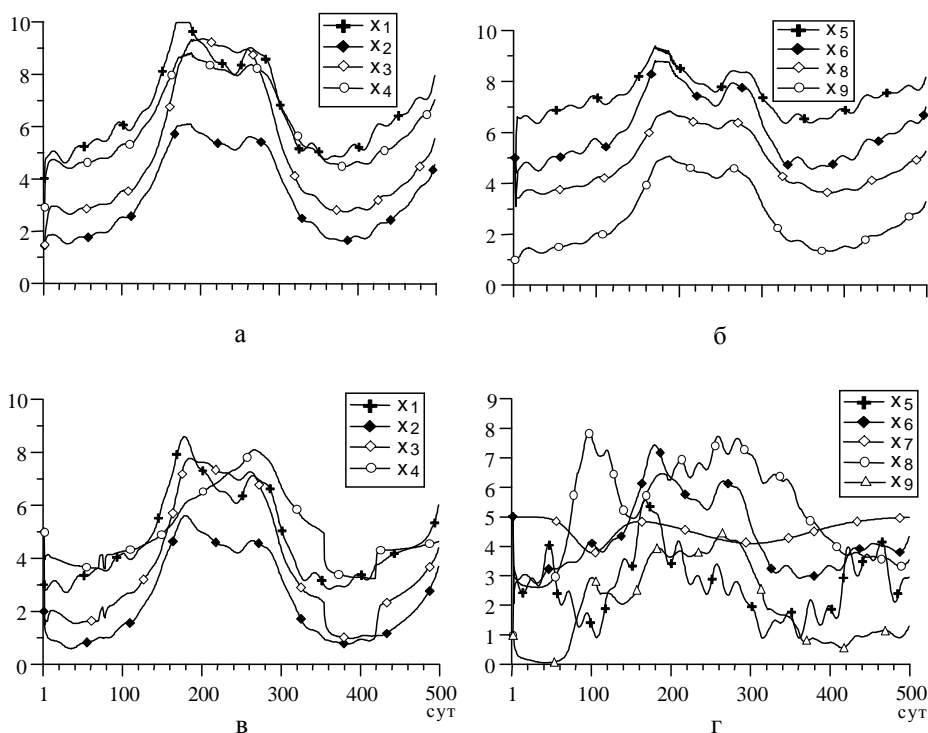
**Р и с. 2.** Управляющие воздействия на экосистему: *SR* – годовой ход освещенности моря, *TW* – годовой ход температуры моря; *A<sub>1</sub>* – функция влияния температуры моря на фитопланктон, *A<sub>2</sub>* – функция влияния температуры моря на зоопланктон; *A<sub>3</sub>* – функция влияния температуры моря на личинки рыб, *A<sub>5</sub>* – функция влияния количества личинок рыб на рыб; *WF* – годовой ход интенсивности приводного ветра, *RF* – сценарий выноса биогенов и детрита с речным стоком

Для проведения вычислений уравнения модели были представлены в конечных разностях. Проверка устойчивости модели показала, что выбранные значения коэффициентов влияния в правых частях уравнений приводят к стационарным решениям уже через 5 – 7 итераций. Определение чувствительности модели к внешним воздействиям проводилась в два этапа. На первом этапе были включены годовой ход температуры моря и солнечная радиация, на втором – дополнительно были учтены годовой ход интенсивности приводного ветра и сценарий выноса биогенов и детрита с речным стоком.

Реакция модели на внешние влияния изображена на рис. 3. Как следует из рис. 3, а, б, практически все сценарии интегральных процессов в варианте расчетов без учета приводного ветра и речного стока оказались подобны друг



другу. Их изменчивость определялась агентами управления  $A_1 - A_4$ . После включения влияний приводного ветра и речного стока существенные изменения произошли в концентрациях кислорода, биогенов, детрита и рыб. Сопоставляя между собой соответствующие графики на рис. 3, б и 3, з, нетрудно заметить значительный рост концентраций биогенов и детрита, обусловленный речным стоком. Как следствие, концентрация кислорода понизилась, что, в свою очередь, привело к некоторому уменьшению концентрации рыб (см. рис. 3, в).



**Р и с. 3.** Годовой ход сценариев процессов в экосистеме, вызванных внешними воздействиями, изображенными на рис. 2, без учета ветра и речного стока (3, а, б) и с их учетом (3, в, г):  $x_1$  – фитопланктон,  $x_2$  – зоопланктон,  $x_3$  – личинки рыб,  $x_4$  – рыбы;  $x_5$  – кислород,  $x_6$  – углекислый газ,  $x_7$  – соленость;  $x_8$  – биогены,  $x_9$  – детрит

Проведенные эксперименты показали, что выбранные для моделирования коэффициенты уравнений обеспечивают чувствительность модельной концентрации рыб к содержанию кислорода в морской воде. Это обстоятельство позволило проиллюстрировать на модельном примере механизм управления запасом рыбных ресурсов в море путем регулирования выноса биогенов и детрита с речным стоком.

**Управление сценариями изменения рыбных запасов в море путем регулирования речного стока.** Будем полагать, что основное влияние на концентрацию рыб в моделируемой морской экосистеме оказывает недостаток кислорода, обусловленный расходом его на окисление продуктов, которые выносятся с речным стоком. Для сохранения необходимого запаса

рыбных ресурсов следует ограничивать вынос этих продуктов в море путем проведения природоохранных мероприятий (сокращение выбросов в реки вредных отходов промышленного и сельскохозяйственного производства, использование очистных сооружений и др.). Проведение этих дорогостоящих операций требует информационной поддержки, в качестве которой должны служить рассчитанные по модели сценарии интегральных процессов в морской экосистеме.

Рассмотренная выше модель позволяет связать концентрацию рыб в море с количеством биогенов и детрита, поступающих с речным стоком. Однако управление выносом этих веществ предполагает установление обратной связи между концентрацией кислорода и интенсивностью управляемого речного стока, который мы обозначим  $RF^*$ . Поэтому, исходя из концепций системного моделирования [8, 9], необходимо включить управляемый речной сток в состав внутренних переменных модели экосистемы.

С этой целью мы дополнили рассмотренную выше систему динамических уравнений морской экосистемы еще одним уравнением для интенсивности управляемого речного стока  $RF^*$ :

$$\frac{d(RF^*)}{dt} = (RF^*)\{1 - c_{RF}[(RF^*) - H(x_5)]\},$$

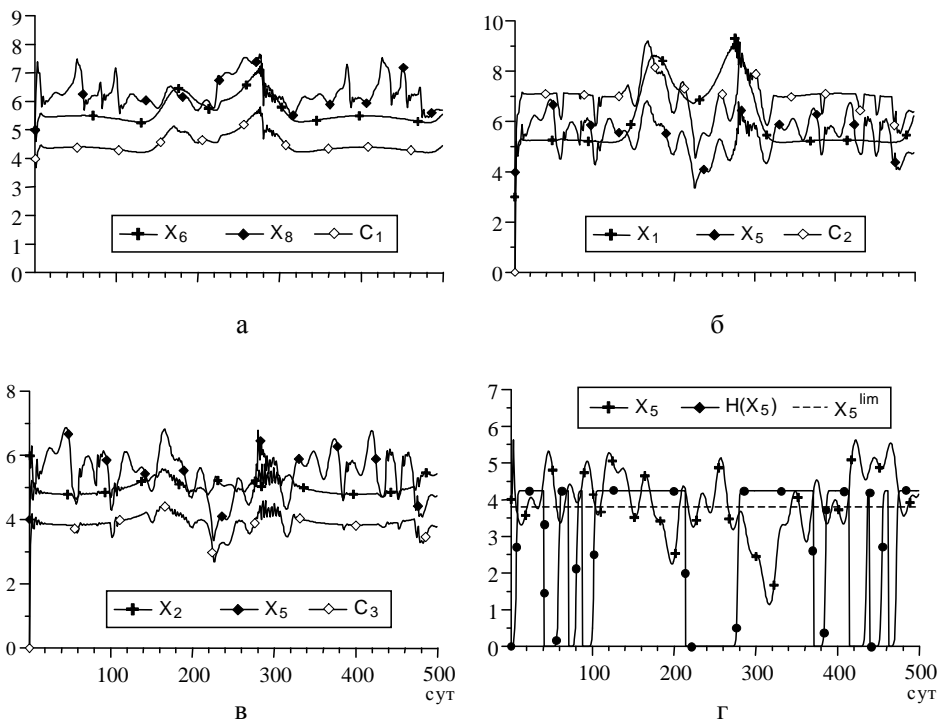
$$H(x_5) = \text{IF}[x_5 > x_5^{\text{lim}}; (RF); (RF)\exp(-\alpha_{RF}t)].$$

Включенный в это уравнение агент управления  $H(x_5)$  должен был следить за тем, чтобы концентрация кислорода в море не опускалась ниже предельно допустимой величины  $x_5^{\text{lim}}$ . В тех случаях, когда это условие не выполнялось, агент начинал уменьшать величину  $RF^*$  по сравнению с нерегулируемым речным стоком  $RF$ . Он продолжал эту операцию управления до тех пор, пока не восстанавливалось условие  $x_5 > x_5^{\text{lim}}$ .

Для проверки предложенного механизма управления были использованы сценарии интегральных процессов в морской экосистеме, изображенные на рис. 3, *в* и 3, *г*. Агент управления  $H(x_5)$  выполнял предписанные ему действия одновременно с операциями агентов лимитирования  $C_i$ , входящих в структуру модели экосистемы. На рис. 4, *а* – *в* показаны графики функций управления, которые осуществляли эти агенты в ходе эксперимента.

Как следует из рис. 4, *а*, в начальный и заключительный периоды времени расчетов количество биогенов в море доминировало над количеством растворенного углекислого газа. В эти периоды агент  $C_1$  установил зависимость роста концентрации фитопланктона от содержания углекислого газа. Однако в середине периода вычислений дважды ситуация менялась на противоположную, и агент начинал учитывать влияние биогенов на фитопланктон.

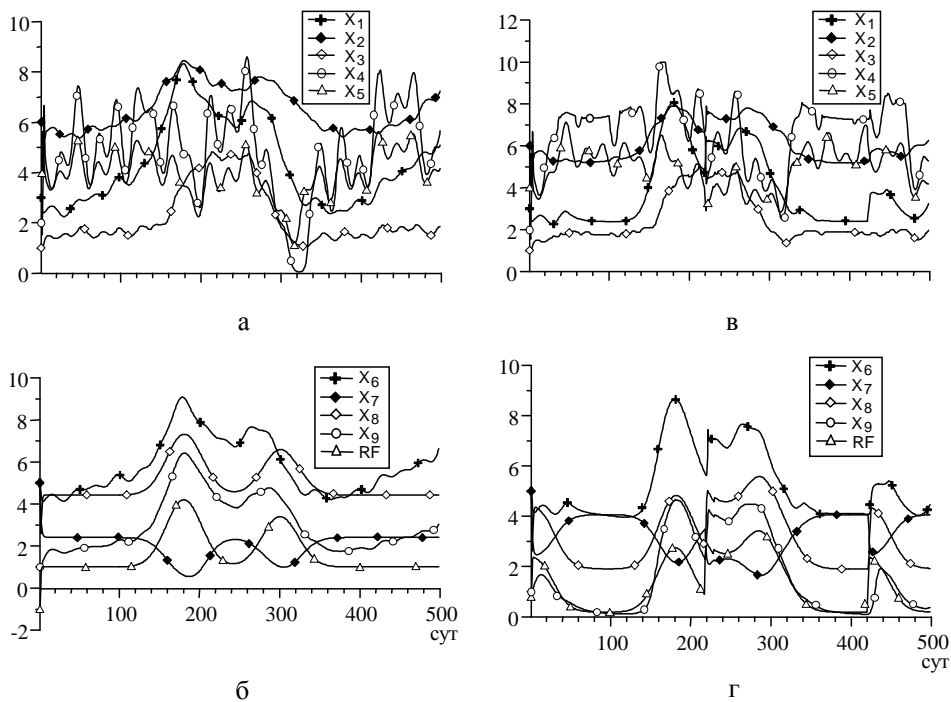
Аналогичным образом действовали агенты управления  $C_2$  и  $C_3$ , которые контролировали изменчивость концентраций фитопланктона и личинок рыб в зависимости от текущих минимальных количеств фитопланктона и кислорода. Сценарии этих процессов, а также управляющие функции  $C_2$  и  $C_3$  показаны на рис. 4, *б*, *в*.



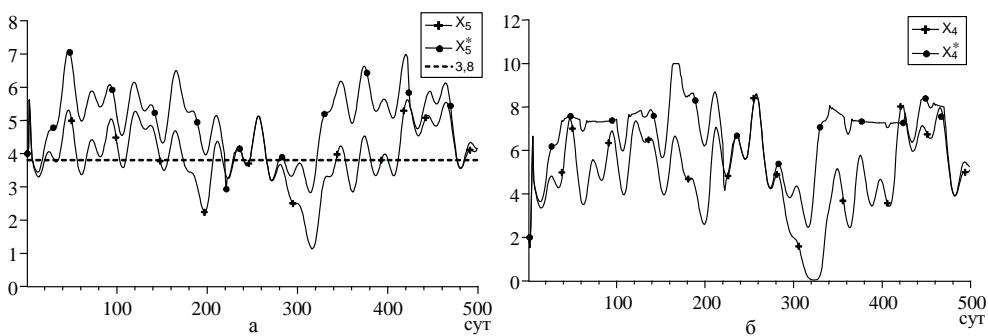
**Р и с. 4.** Операции агентов управления: *a* – лимитирование роста биомассы фитопланктона ( $x_6$  – углекислый газ,  $x_8$  – биогены,  $C_1$  – функция агента  $C_1$ ); *б* – лимитирование количества личинок рыб ( $x_1$  – фитопланктон,  $x_5$  – кислород,  $C_2$  – функция агента  $C_2$ ); *в* – лимитирование роста биомассы рыб за счет личинок ( $x_2$  – зоопланктон,  $x_5$  – кислород,  $C_3$  – функция агента  $C_3$ ); *г* – сценарий изменчивости концентрации кислорода ( $x_5$  – кислород при отсутствии управления речным стоком,  $H(x_5)$  – функция агента управления речным стоком, штриховая линия –  $x_5^{\text{lim}} = 3,8$ )

Операции лимитирования факторов роста живых объектов экосистемы сформировали сценарий изменчивости концентрации кислорода, который приведен на рис. 4, *г*. В качестве предельно допустимого значения этой концентрации была установлена величина  $x_5^{\text{lim}} = 3,8$ . Поэтому агент управления  $H(x_5)$  уменьшал вынос веществ с речным стоком до этого установленного предела (см. рис. 4, *г*). В расчетах операция регулирования занимала 10 сут – время, которое условно было отведено для того, чтобы сокращение выноса веществ с речным стоком привело к восстановлению концентрации кислорода в море до уровня 3,8. Продолжительность времени регулирования стока оказалась различной в течение года: периоды регулирования были заключены в интервале 10 – 100 сут.

На рис. 5, *a – г* приведены для сравнения сценарии процессов в морской экосистеме, обусловленные выносом веществ в море с речным стоком, до и после регулирования стока. Как и следовало ожидать, ограничение выноса биогенов и детрита существенно повлияло на содержание кислорода и концентрацию рыб. Количественные изменения этих переменных можно оценить по рис. 6, *a, б*, которые дают возможность судить об эффективности регулирования стока в отношении увеличения концентрации рыбных ресурсов в море. Средняя за период расчетов концентрация рыб возросла в 1,5 раза.



**Р и с. 5.** Сценарии процессов в экосистеме при отсутствии регулирования речного стока (а, б) и в случае его регулирования (в, г):  $x_1$  – фитопланктон,  $x_2$  – зоопланктон,  $x_3$  – личинки рыб,  $x_4$  – рыбы,  $x_5$  – кислород;  $x_6$  – углекислый газ,  $x_7$  – соленость,  $x_8$  – биогены,  $x_9$  – детрит,  $RF$  – интенсивность выноса биогенов и детрита с речным стоком



**Р и с. 6.** Результаты управления сценариями выноса биогенов и детрита с речным стоком:  $x_5$  – изменения концентрации кислорода в море до управления,  $x_5^*$  – после управления, штриховая линия – установленное предельное значение концентрации кислорода 3,8 безразмерных единиц,  $x_4$  – изменение биомассы рыб в море до управления,  $x_4^*$  – после управления

Заметим, что регулирование речного стока по критерию концентрации кислорода в море привело к заметному изменению солености. Эта переменная входит в уравнения для всех живых организмов модели. В проведенных расчетах влияние концентрации кислорода доминировало над влиянием солености. Однако регулирование стока повлияло на результирующие сценарии всех процессов не только за счет кислорода, но и за счет солености. В общем случае сценарий изменения рыбных запасов в море является сложной функ-

цией многих переменных, прогнозирование которой невозможно без применения динамической модели морской экосистемы.

**Заключение.** Рассмотренная в настоящей работе динамическая модель морской экосистемы может служить примером того, какими должны быть инструменты поддержки принимаемых решений при управлении процессами в ПЗМ. Мы стремились показать возможность их построения методом адаптивного баланса влияний с применением агентов управления в динамических уравнениях модели. Для практического использования подобных моделей необходима большая и кропотливая работа по инициализации параметров модели и определению ее коэффициентов для условий конкретной ПЗМ. Однако прежде чем адаптировать модели к реальным процессам в природной среде, необходимо убедиться в целесообразности их создания. Такого рода выводы могут быть получены лишь при имитации процессов развития в моделях типовых ПЗМ в условиях контролируемого вычислительного эксперимента.

Результаты работы показали, что, опираясь на причинно-следственные связи между интегральными процессами в морской экосистеме, известные из опыта предыдущих исследований, можно легко построить динамическую *АВС*-модель экосистемы, чувствительную к внешним воздействиям и обладающую устойчивостью к изменениям ее параметров. Благодаря этим свойствам, удастся включить логические операторы управления в правые части уравнений модели для того, чтобы контролировать изменяющиеся условия существования живых организмов в морской среде. Это, несомненно, делает модель более реалистичной и дает возможность прогнозировать такие сценарии развития процессов, которые трудно предсказать даже весьма опытным экспертам. Именно это обстоятельство делает имитационные модели экосистем ПЗМ важной составной частью информационных технологий поддержки принимаемых решений, когда речь идет о рациональном использовании морских ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Towards a European Integrated Coastal Zone Management (ICZM) Strategy: General Principles and Policy Options.* – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999.
2. *Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Моделирование эколого-экономических систем. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 320 с.
3. *UNEP. Guidelines for Integrated Management of Coastal and Marine Areas // UNEP Regional Seas Reports and Studies.* – 1995. – № 161. – 80 p.
4. *World Bank. Guidelines for Integrated Coastal Zone Management / Eds. J.C. Post, C.G. Lundin.* – Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs. – 1993. – Series № 9. – 16 p.
5. *Fedra K.* Coastal zone resource management: tools for a participatory planning and decision making process // Eds. D.R. Green et al. – *Delivering Sustainable Coasts: Connecting Science and Policy / Proceedings of Littoral 2004, September 2004, Aberdeen, Scotland, UK.* – 2004. – 1. – P. 281 – 286.
6. *Sustainable Management of Scarce Resources in the Coastal Zone.* – SMART Project homepage: <http://www.ess.co.at/SMART>.
7. *Ozhan E.* Coastal zone management in Turkey // *Ocean Coast. Manag.* – 1996. – 30. № 2. – P. 153 – 176.
8. *Еремеев В.Н., Тимченко И.Е., Васечкина Е.Ф. и др.* Системное моделирование морских эколого-экономических процессов. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – 427 с.

9. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
10. Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Имитационное моделирование условных ресурсных потенциалов природной среды // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 2. – С. 24 – 43.
11. Forrester J.W. Principles of Systems. – Cambridge MA: Productivity Press, 1968.
12. Математические модели в биологической океанографии / Т. Платт, К.Х. Манн, Р.Е. Уланович и др. – Париж: ЮНЕСКО, 1984. – 195 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 09.08.07  
После доработки 07.09.07

**ABSTRACT** A model of integral processes of development in the coastal zone ecosystem built by the method of *Adaptive Balance of Causes* (ABC method) is presented. The model contains 9 variables (phyto- and zooplankton, larvae of fishes, fishes, oxygen, carbon dioxide, salinity, biogens and detritus) influenced by sun radiation, wind stress, sea temperature and river flow. The control agents in the model equations govern dependence of food chain elements on vitally important resources and environmental conditions. The scenarios of integral processes of development at the simulated annual motion of external influences are built. Possibility of fish resources management by regulating a river inflow of biogens and detritus to the sea is considered. The managing mechanism based on tracing the dissolved oxygen concentration in marine water is proposed. The simulation experiments show that the ABC model of integral processes in marine coastal zone ecosystem permits to simulate the scenarios of management of biogens and detritus inflow to the sea purposely to save the supplies of fish resources.