

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.46.001.57

И.Е. Тимченко, Е.Е. Совга, Е.М. Игумнова, С.М. Солодова

Интеллектуальные агенты управления в моделях морских экосистем

Предложена новая информационная технология моделирования биохимических процессов в морских экосистемах, которая основана на применении логических операторов управления (интеллектуальные агенты) в динамических уровнях моделей. Построена концептуальная модель экосистемы, представляющая взаимодействие 17 биохимических процессов при 5 внешних воздействиях. Уравнения модели получены методом адаптивного баланса влияний (АВС-метод), что позволило имитировать сложные сценарии развития процессов в системе и обеспечило устойчивость вычислений. Приведены примеры поведения экосистемы в условиях недостатка кислорода, вызванного природными и антропогенными факторами. Делается вывод о перспективности совместного использования АВС-уравнений и интеллектуальных агентов управления в моделях морских экосистем.

Введение

Развитие теории сложных систем и, в частности, теории искусственного интеллекта, представляет собой одну из приоритетных задач современного естествознания. Морские экосистемы относятся к категории подобных систем ввиду большого количества взаимодействующих факторов, которые определяют динамику происходящих в экосистемах гидрофизических и биохимических процессов. Поэтому некоторые результаты теории искусственного интеллекта могут быть успешно использованы при построении динамических моделей морских экосистем и при создании информационных технологий управления процессами в них [1].

Одним из таких примеров может служить применение логических операций управления в алгоритмах решения уравнений моделей экосистем. Ввиду большого разнообразия внешних воздействий на природные экосистемы и различной реакции на них самих экосистем весьма часто возникает необходимость переключения параметров моделей с одних значений на другие. По этой причине модели экосистем должны иметь в своем составе наряду с традиционными системами динамических уравнений так называемые интеллектуальные агенты управления [2]. По своей сути интеллектуальные агенты управления, называемые также для краткости просто агентами, представляют собой относительно самостоятельные части общей модели экосистемы. Агенты способны следить за изменениями значений некоторых из происходящих

© И.Е. Тимченко, Е.Е. Совга, Е.М. Игумнова, С.М. Солодова, 2003

в экосистеме процессов и выполнять предписанные им функции управления параметрами модели.

На этой идее была основана разработанная в ряде цитируемых нами работ информационная технология *ABC AGENT* [3,4]. Эта технология позволяет прогнозировать сценарии развития процессов в эколого-экономических системах с учетом множественных внешних воздействий и допускает изменения структуры внутрисистемных связей. Речь, таким образом, идет о моделировании открытых динамических систем, способных гибко реагировать на внешние влияния и адаптироваться к ним путем подстройки своих внутренних параметров. Именно этими свойствами обладают живые организмы в морской среде, само существование которых невозможно без механизмов слежения за меняющимися внешними условиями и приспособления к ним. Естественно включить в состав модели морской экосистемы интеллектуальные агенты управления и наделить их такими функциями, которые обеспечат осуществление этих операций.

Целью настоящей работы является демонстрация возможности использования агентов управления совместно с системой динамических уравнений некоторой достаточно общей модели морской экосистемы. Отметим, что мы не ставим перед собой задачу предложить какую-либо новую модель подобной экосистемы. Напротив, рассматриваемые химико-биологические процессы в морской среде будут представлены в агрегированном виде, т. е. без детализации живых объектов и их жизненных циклов. Вместе с тем основные процессы сосуществования и трансформации живого и неживого вещества будут рассмотрены в их взаимосвязи, которая основывается на естественных законах и определяется строгими логическими правилами, осуществляемыми агентами.

Частые переключения коэффициентов уравнений модели с одних значений на другие, которые должны производить агенты управления, осложняют решение традиционных систем динамических уравнений. Устойчивость этих систем всегда представляла собой одну из вычислительных проблем математической биологии моря [5 – 7]. Для того чтобы обойти эту трудность, мы предлагаем применять при построении уравнений моделей экосистем метод адаптивного баланса влияний (или *ABC*-метод от *Adaptive Balance of Causes*) [1]. Этот метод обеспечивает устойчивость решений благодаря специальной модульной конструкции модели, которая гарантирует сходимость вычислительного алгоритма при контролируемых агентами изменениях коэффициентов уравнений. Таким образом, мы ставим своей целью показать возможности контроля естественных гидрохимических и гидробиологических процессов в морской экосистеме с помощью ее модели, построенной *ABC*-методом и использующей в своем составе интеллектуальные агенты управления.

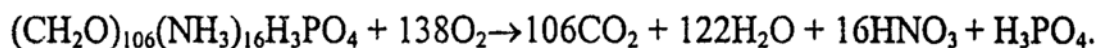
Формулировка концептуальной модели экосистемы

Исходя из поставленных целей, выберем основные гидрохимические и гидробиологические процессы, которые необходимо включить в модель морской экосистемы. 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 фитопланктона в единице объема, в качестве процесса *ZP* — изменения биомассы зоопланктона. Что касается *BR*, то его значения будут представлять биомассу всех остальных живых организмов, включая рыб и другие промысловые объекты, чем и объясняется название «биоресурс».

Введем далее те из процессов, которые обеспечивают существование перечисленных классов живых объектов. Для фитопланктона ими будут солнечная радиация (*SR*) и содержание химических соединений, необходимых для протекания процесса фотосинтеза и являющихся продуктами разложения органического вещества. Следуя работе [8], определим в качестве жизненно важных процессов существования фитопланктона изменения концентраций биогенных элементов — неорганических азота (NO_2 , NO_3 , NH_4) и фосфора PO_4 . Добавим к этим соединениям углекислый газ CO_2 как один из важных элементов углеродного цикла.

Условия существования зоопланктона в основном определяются концентрациями фитопланктона и растворенного в воде кислорода (*OX*). Для биоресурса необходимы зоопланктон, фитопланктон и кислород. Однако 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 (*POP*). 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^{3-} в стехиометрическом соотношении $\text{N:P} = 16:1$ в соответствии со схемой Р. Хорна [9]



Перечисленные процессы подвержены активному влиянию внешних факторов. Кроме уже введенной выше солнечной радиации, на экосистему влияет приводной ветер (*WF*), увеличивающий содержание кислорода в верхнем перемешанном слое. Заметно влияет на большую часть процессов в экосистеме температура морской воды (*TW*). Наконец, пресноводный сток (*RF*) служит дополнительным источником органических веществ и биогенных элементов NH_4 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} . С ним связан также вынос в море загрязняющих веществ, который влияет на их концентрацию (*PL*) в морской среде. В общем случае процесс *RF* отражается на солёности морской воды (*SA*) и на содержании биогенных элементов, которое в конкретном объеме морской среды находится также под воздействием вертикальных перемещений водных масс (*VM*). Последние могут либо обогащать, либо обеднять биогенными элементами рассматриваемый объем. Это же явление имеет место и при горизонтальном обмене, который, однако, не будем учитывать в целях упрощения модели.

Концептуальная модель экосистемы представляет собой схему взаимных влияний перечисленных процессов. При составлении схемы используется

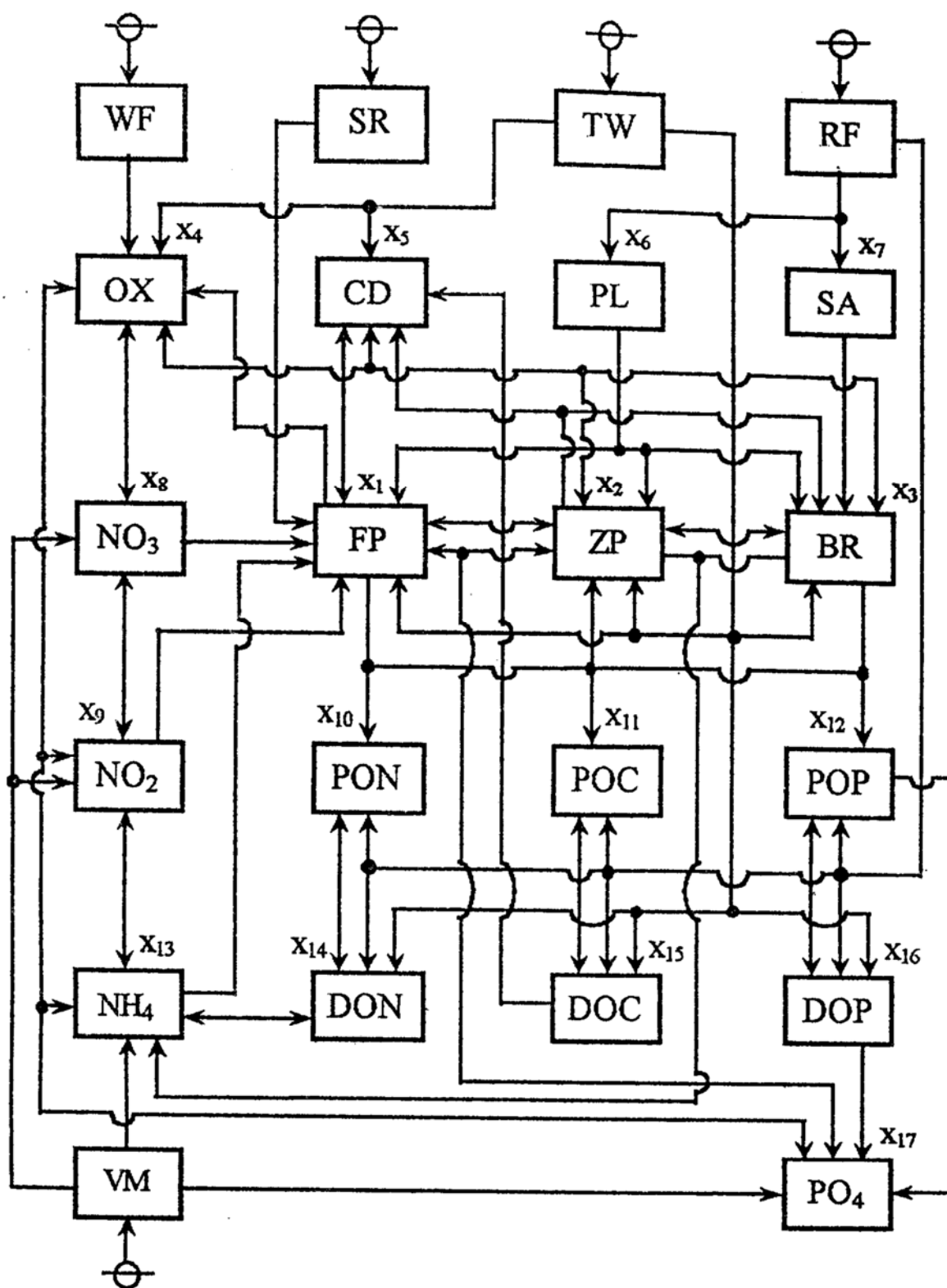
экспертная информация о природных явлениях, обычно имеющих место в выбранном объеме морской среды с учетом установленных масштабов осреднения или агрегирования процессов. Она представлена на рис. 1. Направления стрелок на этом рисунке соответствуют направлениям влияний. Поэтому стрелки, имеющие оба возможных направления, указывают на взаимные влияния процессов. Некоторые линии на схеме (например, идущие от блока *ТН*) изображают одновременное влияние этого процесса на большое количество других процессов. Для упрощения схемы подобные множественные влияния показаны в виде магистральных линий, имеющих ответвления.

На схеме концептуальной модели опущены знаки, с которыми процессы влияют друг на друга, так как обычно установление характера влияния не вызывает затруднений. Условимся считать влияния положительными, если рост (уменьшение) значения причины вызывает соответствующий рост (уменьшение) значения следствия. В противном случае влияние будем считать отрицательным. Примерами положительных влияний на схеме являются причинно-следственные связи: *WF* – *ОХ* и *SR* – *FP*, а отрицательных: *BR* – *ZP* и *ZP* – *FP*.

Построенная с учетом взаимных влияний концептуальная модель экосистемы отражает генерализованный баланс тенденций развития процессов в системе. В моделях сложных систем подобный баланс поддерживается цепями положительных и отрицательных обратных связей. Так, например, положительная обратная связь, которая стремится увеличить концентрацию зоопланктона в морской среде, представлена замкнутой цепью *ZP* – [*PON*, *POC*, *POP*] – [*DON*, *DOC*, *DOP*] – [*NH₄*, *NO₃*, *NO₂*, *PO₄*] – *FP* – *ZP*. Эта тенденция балансируется отрицательной обратной связью *ZP* – *FP* – *ZP*, которая, действуя по общей модели «хищник – жертва», обеспечивает адаптацию концентрации зоопланктона к концентрации фитопланктона [10].

Принципиальным является тот факт, что рост концентрации биологических объектов зависит одновременно от нескольких факторов. В соответствии с принятой нами концептуальной моделью *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 конечном итоге пределы роста концентрации фитопланктона. Если рассмотреть ситуацию с зоопланктоном, то для роста его концентрации наряду с увеличением концентраций питательных веществ необходимо соответствующее количество растворенного в воде кислорода. В этом случае лимитирующим фактором могут быть либо концентрация фитопланктона, либо содержание растворенного кислорода. Концентрация последнего в свою очередь зависит от температуры морской воды.

Для того чтобы учесть лимитирующие факторы в модели экосистемы, необходимо предусмотреть в ней логические операции слежения за количествами ресурсов, необходимых для жизнедеятельности биологических объектов. Поэтому наряду с уравнениями, описывающими динамику фитопланктона, зоопланктона и ряда других процессов, в модели должны быть представлены интеллектуальные агенты, управляющие ростом и убылью соответствующих концентраций.



Р и с. 1. Концептуальная модель морской экосистемы

Формализация концептуальной модели экосистемы

Формализация концептуальной модели экосистемы означает построение системы уравнений, соответствующей схеме причинно-следственных связей, изображенной на рис.1. Воспользуемся для этого методом адаптивного баланса влияний [1]. В этом методе для описания процессов в сложной системе применяется универсальный модуль, уравнение которого имеет следующий общий вид:

$$dx/dt = cx [F^{(-)}(x) - F^{(+)}(x)], \quad (1)$$

где c — некоторая константа, а $F^{(+)}(x)$ представляет собой функцию, монотонно растущую от 0 до 1, которая связана с функцией $F^{(-)}(x)$ соотношением

$$F^{(-)}(x) + F^{(+)}(x) = 1. \quad (2)$$

Функции $F^{(-)}(x)$ и $F^{(+)}(x)$, называемые базовыми функциями влияния, представляют собой две противоположные тенденции развития процесса $x(t)$. Поэтому универсальный модуль стремится к равновесию, при котором обе тенденции совпадают по величине.

Рассмотрим экосистему, состоящую из N стандартных модулей, каждый из которых соответствует одному из развивающихся в ней процессов. 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 . Следствием внешних влияний (причин) будет отклонение $x_1(t)$ модуля 1 от равновесия. Для описания нового состояния модуля мы будем использовать следующее выражение:

$$x_1(t) = x_1^* + x_1'(t) = x_1^* + a_{12}x_2(t) + a_{13}x_3(t) + \dots + a_{1N}x_N(t), \quad (3)$$

где a_{12} , a_{13} , ..., a_{1N} — некоторые постоянные коэффициенты влияния. Из формул (1) и (2) получаем

$$dx_1/dt = cx_1 [1 - 2F^{(+)}(x_1)]. \quad (4)$$

В работе [1] показано, что в качестве базовой функции влияния $F^{(+)}(x_1)$ целесообразно использовать представление

$$F^{(+)}(x_1) = x_1(t) - a_{12}x_2(t) - a_{13}x_3(t) - \dots - a_{1N}x_N(t). \quad (5)$$

Тогда общее уравнение для процесса $x_1(t)$ в экосистеме, описываемое универсальным модулем, принимает вид

$$dx_1/dt = c_1x_1(t) \{x_1^* - [x_1(t) - a_{12}x_2(t) - a_{13}x_3(t) - \dots - a_{1N}x_N(t)]\}. \quad (6)$$

Объединение подобных уравнений, построенных для всех N модулей, позволяет получить математическую модель экосистемы.

Введем следующие обозначения для моделируемых процессов: $x_1(t)$ — 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 (*PL*); $x_7(t)$ — 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*); $x_{15}(t)$ — концентрация растворенного органического углерода (*DOC*); $x_{16}(t)$ — концентрация растворенного органического фосфора (*DOP*); $x_{17}(t)$ — содержание неорганического фосфора в форме PO_4 .

Используем теперь уравнение универсального модуля (6) для построения динамических уравнений модели экосистемы. В качестве влияющих функций в правых частях уравнений выпишем те влияния на данный модуль, которые обозначены входящими стрелками на диаграмме концептуальной модели (рис.1):

$$\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} - \\
&\quad - [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) - \\
&\quad - 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) - \\
&\quad - 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) + \\
&\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_{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) - \\
&\quad - 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))]\}, \quad (7) \\
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_{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) + \\
&\quad + 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) + \\
&\quad + 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) - \\
&\quad - 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}$$

Полученная система уравнений позволяет прогнозировать сценарии развития процессов в экосистеме. Однако для этого необходимо определить выражения для интеллектуальных агентов управления AD и AP , задать коэффициенты влияния a_{ij} и начальные значения процессов x_i .

Интеллектуальные агенты управления

Присутствующие в правых частях уравнений (7) слагаемые вида AD представляют собой первую группу интеллектуальных агентов управления. Они имеют следующие выражения:

$$\begin{aligned} AD_{15} &= IF\{x_5(t) > x_5^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{15}t)]\}, \\ AD_{18} &= IF\{x_8(t) > x_8^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{18}t)]\}, \\ AD_{19} &= IF\{x_9(t) > x_9^0; 0; -x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{19}t)]\}, \\ AD_{1/13} &= IF\{x_{13}(t) > x_{13}^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{1/13}t)]\}, \\ AD_{1/17} &= IF\{x_{17}(t) > x_{17}^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{1/17}t)]\}, \\ AD_{1/SR} &= IF\{SR(t) > SR^0; 0; x_1^*[1 - \exp(-\alpha_{1/SR}t)]\}, \\ AD_{21} &= IF\{x_1(t) > x_1^0; 0; x_2^*[1 - \exp(-\alpha_{21}t)]\}, \\ AD_{24} &= IF\{x_4(t) > x_4^0; 0; x_2^*[1 - \exp(-\alpha_{24}t)]\}, \\ AD_{32} &= IF\{x_2(t) > x_2^0; 0; x_3^*[1 - \exp(-\alpha_{32}t)]\}, \\ AD_{34} &= IF\{x_4(t) > x_4^0; 0; x_3^*[1 - \exp(-\alpha_{34}t)]\}, \\ AD_{4/TW} &= IF\{TW(t) < TW^0; 0; x_4^*[1 - \exp(-\alpha_{4/TW}t)]\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Интеллектуальные агенты (8) контролируют поведение экосистемы вблизи границ ее гомеостазиса. Предполагаем, что, когда концентрации жизненно важных веществ достигают своих предельно допустимых значений, начинаются процессы деградации экосистемы, которые сопровождаются быстрым уменьшением биомасс FP , ZP и BR . Следует отметить, что в отношении фитопланктона деградация экосистемы может иметь место и при его избыточном образовании. Это так называемая эвтрофикация экосистемы. В этих условиях избыточный фитопланктон не потребляется зоопланктоном и рыбами, а превращается в мертвое органическое вещество, на разложение которого расходуется значительное количество кислорода. При определенных гидрометеоситуациях, затрудняющих поступление кислорода из атмосферы, в системе начинаются заморы. В рамках данной модели эта ситуация будет рассмотрена ниже.

В условиях (8) 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 (7) обозначения вида AP , контролирует зависимости биомасс FP , ZP и BR от наличия необходимых им видов ресурсов. Наиболее простые логические операции управления связаны с трансформацией веществ при химических реакциях и бактериальном разложении. Предполагаем, что подобная трансформация происходит практически без временных задержек. Поэтому агенты вида AP

контролируют лишь лимитирующие факторы преобразований. В рассматриваемой модели эти агенты представлены следующими условиями:

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

Каждый из перечисленных агентов непрерывно контролирует лимитирующие факторы и включает соответствующие влияния с предписанными им коэффициентами.

Третья группа агентов не только отслеживает лимитирующие факторы и устанавливает соответствующие им коэффициенты, но также учитывает запаздывания процессов роста по отношению к вызвавшим их причинам. Инерционность процессов роста биомассы *FP*, *ZP* и *BR* объясняется естественными задержками, связанными с конечным временем роста живых организмов. Будем характеризовать их соответствующими постоянными времени α_{FP} , α_{ZP} и α_{BR} . Предположим также, что сокращение численности организмов происходит без запаздывания, так как может быть вызвано мгновенным увеличением процента гибнущих организмов. Тогда интеллектуальные агенты, входящие в первые три уравнения модели (7), могут быть представлены в следующей форме:

$$AP(x_5, x_8, x_9, x_{13}, x_{17}, SR, \alpha_{FP}) = IF\{M(t) - M(t - \tau) < 0; a_{1M}x_M; a_{1M}[M(t) + [M(t - \tau) - M(t)]\exp(-\alpha_{FP}t)]\},$$

где $M(t) = \min\{x_5(t), x_8(t), x_9(t), x_{13}(t), x_{17}(t), SR(t)\}$;

$$AP(x_1, x_4, \alpha_{ZP}) = IF\{M(t) - M(t - \tau) < 0; a_{2M}x_M; a_{2M}[M(t) + [M(t - \tau) - M(t)]\exp(-\alpha_{ZP}t)]\}, \quad (10)$$

где $M(t) = \min\{x_1(t), x_4(t)\}$;

$$AP(x_2, x_4, \alpha_{BR}) = IF\{M(t) - M(t - \tau) < 0; a_{3M}x_M; a_{3M}[M(t) + [M(t - \tau) - M(t)]\exp(-\alpha_{BR}t)]\},$$

где $M(t) = \min\{x_2(t), x_4(t)\}$.

Параметр τ в выражениях (10) можно рассматривать как шаг вычислений по времени. Агенты анализируют тенденции в изменениях значений лимитирующих факторов. Если тенденция отрицательная, включается обычный механизм отрицательного влияния, если же положительная, рост концентрации *FP*, *ZP* и *BR* будет задержан на некоторое время, согласно выражениям в квадратных скобках, в которых параметры α_{FP} , α_{ZP} , α_{BR} определяют время роста биологических объектов.

Определение коэффициентов уравнений модели

Выбор значений коэффициентов a_m в уравнениях модели устанавливает степень влияния одних процессов в морской экосистеме на другие. Величины коэффициентов зависят от условий развития процессов в конкретной экосистеме. Поэтому для их оценки необходима дополнительная информация о динамике экосистемы частного или общего характера.

Частной информацией можно считать данные архивных наблюдений за моделируемыми явлениями в экосистеме и за внешними воздействиями на нее, которые являются причинами развития биохимических процессов. При использовании ABC-метода для построения модели экосистемы возможен статистический метод оценки коэффициентов, суть которого заключается в следующем [1].

Предположим, что существуют архивные данные наблюдений за всеми моделируемыми процессами x_v в системе уравнений (7) и внешними воздействиями на нее WF, SR, TW, RF и VM на некотором интервале времени, достаточном для определения по ним матрицы коэффициентов авто- и взаимной корреляции K_{mn} . Будем предполагать, что в период выполнения наблюдений экосистема не выходила за пределы границ гомеостаза, а лимитирующие факторы ее развития были постоянными. Тогда систему уравнений (7) можно записать в конечно-разностной форме, исключив из рассмотрения изменения ее коэффициентов с помощью агентов:

$$x_{mk} = 2x_{mj}[1 - c_m(x_{mj} - \sum_n a_{mn}x_{nj})], \quad m, n = 1, 2, \dots, 17, m \neq n. \quad (11)$$

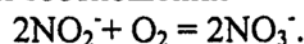
В системе уравнений (11) приняты обозначения процессов в дискретные моменты времени t_k, t_j следующего вида: $x_m(t_k) = x_{mk}, x_m(t_j) = x_{mj}, k, j = 1, 2, 3, \dots$.

Предложенный в работе [1] метод нахождения коэффициентов заключается в решении системы уравнений

$$\sum_n K_{mn}a_{mn} = K_{vm}, \quad m, n, v = 1, 2, \dots, 17, m \neq v, n \neq v. \quad (12)$$

В ряде имитационных экспериментов с моделями экосистем [4] этот метод показал высокую точность определения коэффициентов и был рекомендован для идентификации моделей в конкретных наблюдаемых условиях. Была отмечена возможность текущей идентификации (пересчета) коэффициентов путем реанализа наблюдаемых процессов и внешних воздействий, что обеспечивает адаптацию модели к меняющимся условиям природной среды. С учетом применения агентов управления подобный пересчет должен выполняться на интервалах времени, отделяющих два последовательных момента переключения лимитирующих факторов.

Общий метод оценки коэффициентов, обычно применяемый при моделировании морских экосистем [1, 4], заключается в использовании известных из теории или из лабораторных экспериментов закономерностей динамики биохимических процессов. Наиболее четко определяется взаимосвязь концентраций веществ в морской среде при рассмотрении химических реакций. Так, например, связь между концентрациями NO_3 и NO_2 может быть установлена с помощью стехиометрических соотношений



Рассматривая концентрации O_2 и NO_2 в качестве необходимых ресурсов для образования NO_3 , можно определить, какое количество NO_3 будет соответствовать имеющимся ресурсам в моделируемом объеме морской среды.

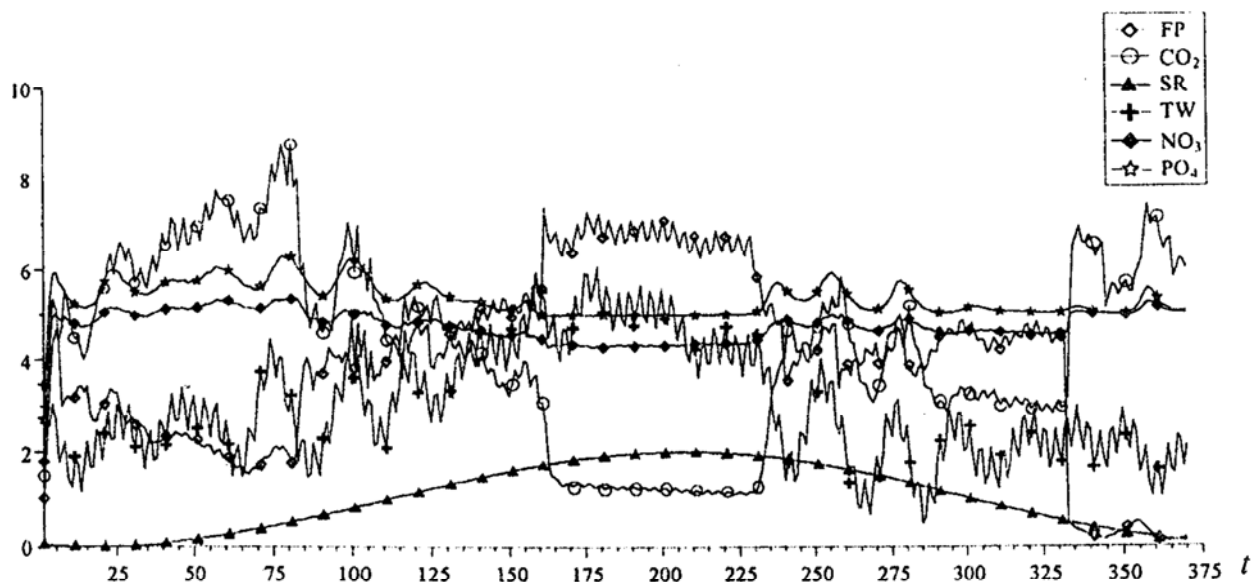
Подобные количественные зависимости между процессами в экосистеме позволяют идентифицировать значения коэффициентов в уравнениях (7) и в интеллектуальных агентах вида (8) – (10).

Имитационные эксперименты с моделью экосистемы

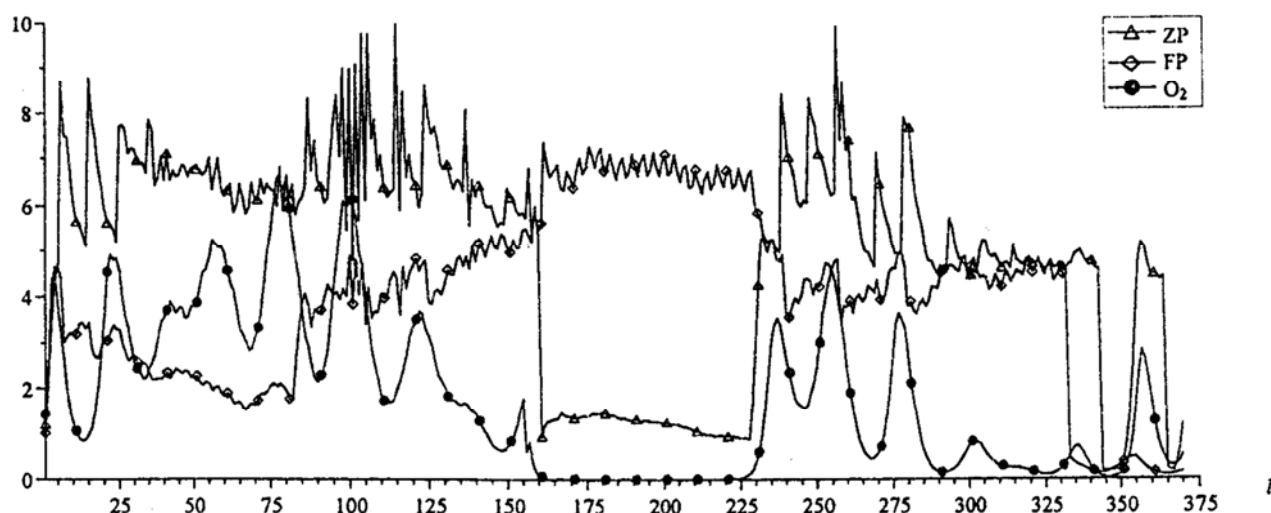
Для проведения имитационных экспериментов модель экосистемы (7) была представлена в форме конечно-разностных *ABC*-уравнений вида (11). Все моделируемые процессы путем линейных преобразований были приведены к безразмерной форме и к общему интервалу изменчивости 0,10. Коэффициенты влияний в уравнениях и в выражениях для интеллектуальных агентов выбирались в диапазоне значений 0,05 – 0,5. Вычисления производились на 370 шагов по времени с интервалом в одни сутки. Большое количество переменных в модели экосистемы позволило провести разнообразные вычислительные эксперименты. Остановимся коротко лишь на двух из них.

В первом из этих экспериментов в соответствии с выбранными масштабами изменчивости процессов в качестве внешних влияний на экосистему были заданы годовой ход солнечной радиации (*SR*), температуры воды (*TW*) (рис. 2) и кислорода (*OX*) (рис. 3). Рассматривался случай выхода экосистемы верхнего слоя моря на границу своего гомеостаза по кислороду вследствие повышения температуры морской воды и при отсутствии вертикальных движений (*VM*) и приводного ветра (*WF*). Известно, что с ростом температуры содержание кислорода в верхнем слое моря понижается вследствие уменьшения растворимости и ухода его в атмосферу. В качестве этой критической для экосистемы температуры воды была задана величина $TW^0 = 5$. Это означало, что агент $AD_{4/TW}$ в уравнении динамики кислорода из системы уравнений модели (7) должен был включать режим падения концентрации кислорода, как только температура морской воды начинала превышать 5 безразмерных единиц. В проведенных расчетах этот режим имел место между 150-м и 230-м шагами вычислений по времени (график *TW* на рис. 2). Резкое падение содержания кислорода в этот период отчетливо видно на рис. 3.

На рис. 3 показаны сценарии развития зоо- и фитопланктона в сопоставлении с динамикой содержания кислорода в морской воде. В результате действия агента $AP(x_1, x_4, \alpha_{ZP})$, входящего в уравнение динамики для x_2 , развитие зоопланктона (*ZP*) также было ориентировано на минимумы фитопланктона и кислорода, которые чередовались между собой в различные периоды времени. Это заметно на рис. 3, так как сценарий изменчивости зоопланктона повторяет тот из двух приведенных на этом же рисунке графиков фитопланктона и кислорода, который лежит ниже. Заметим, что принятое в эксперименте значение параметра α_{ZP} устанавливало задержку роста в 10 сут по отношению к вызвавшей этот рост причине. Эта функция была также выполнена агентом $AP(x_1, x_4, \alpha_{ZP})$, о чем свидетельствует отставание графика *ZP* по отношению к графикам *FT* и *OX* на рис. 3.



Р и с. 2. Сценарии развития процессов при внешних воздействиях на систему: *FP* – фитопланктон, CO_2 – углекислый газ, *SR* – солнечная радиация, *TW* – температура морской воды, NO_3 – концентрация нитратов, PO_4 – концентрация фосфатов



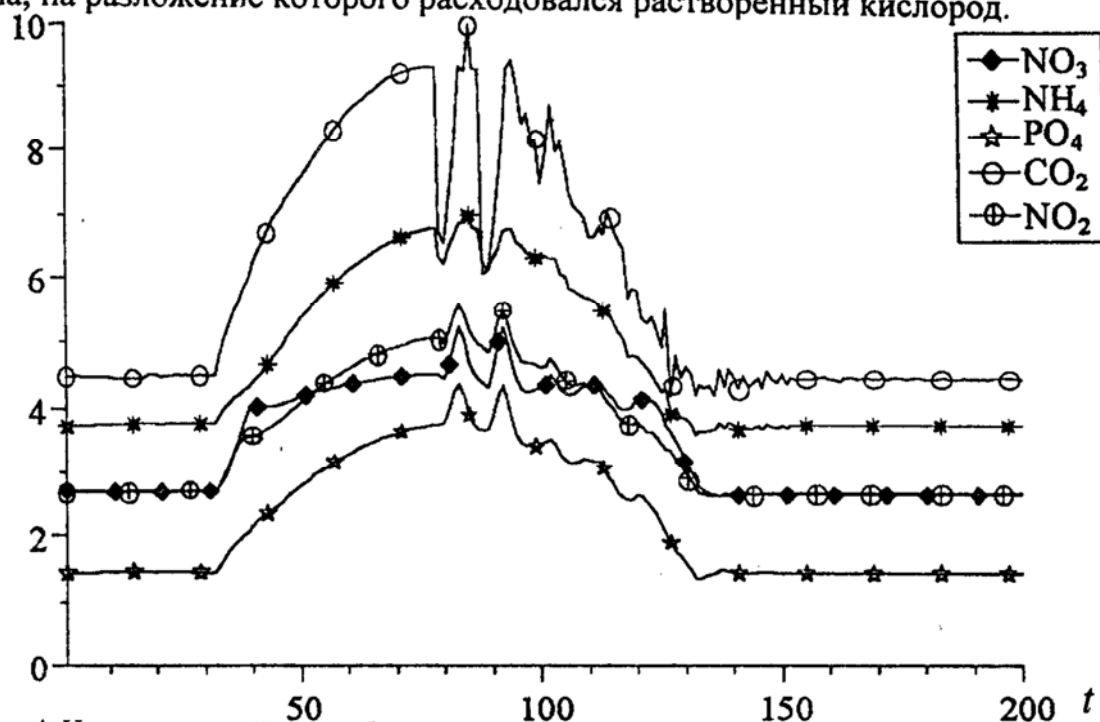
Р и с. 3. Влияние концентрации растворенного кислорода на динамику зоо- и фитопланктона: *ZP* – зоопланктон, *FP* – фитопланктон, O_2 – кислород

Результирующие сценарии *FT*, *ZP* и *BR* получены с помощью управлявшего динамикой биоресурса агента $AP(x_2, x_4, \alpha_{BR})$, который в уравнении для x_3 осуществил операцию «замора» биоресурса, вызванную резким падением концентрации кислорода в период времени со 150-го по 230-й шаг вычислений. Этот же агент обеспечил заданное выбором параметра α_{BR} запаздывание процесса восстановления прежнего уровня концентрации биоресурса на 20 сут.

Во втором вычислительном эксперименте 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 запи-

рающий слой препятствует поступлению кислорода из атмосферы. Повышение расхода 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 упомянутых выше «заморов».

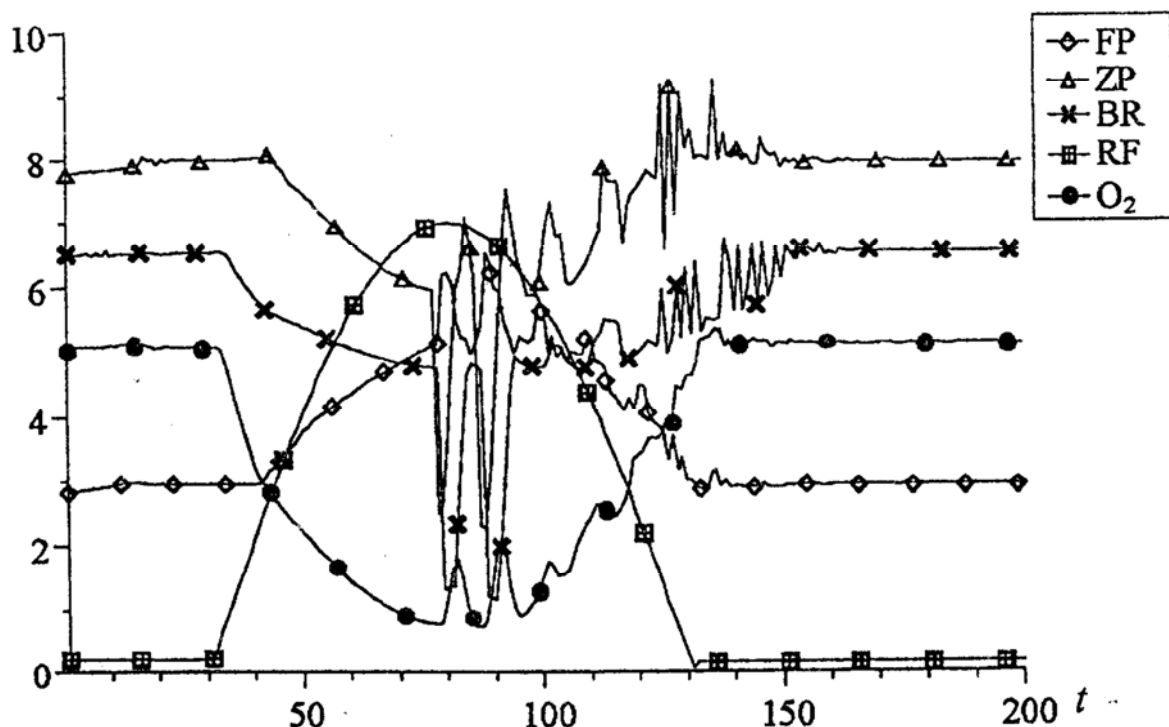
Период времени поступления органических веществ в экосистему извне составлял 100 сут, причем их максимум совпадал с максимумом солнечной радиации (SR) (185-е сутки). На рис. 4 показаны сценарии развития процессов в экосистеме, представляющих рост и последующее уменьшение концентраций неорганических веществ, использующихся при образовании фитопланктона, на разложение которого расходовался растворенный кислород.



Р и с. 4. Имитированный вынос биогенов с речным стоком: NO_3 – нитраты, NH_4 – аммиак, PO_4 – фосфаты, CO_2 – углекислый газ, NO_2 – нитриты

На рис. 5 представлена динамика биологических объектов экосистемы, определяемая графиками изменения содержания биогенных элементов (рис. 4) и изменением концентрации растворенного кислорода. В соответствии с ними наблюдались изменения OX , FP , ZP и BR . Агенты, управляющие работой модели, были поставлены в условия, имитирующие выход экосистемы на границы гомеостазиса по концентрации кислорода для зоопланктона и по концентрации зоопланктона для биоресурса. С этой целью в выражениях для агентов AD_{24} и AD_{32} (формулы (8)) 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: на 125-м и 135-м шагах вычислений. В эти моменты концентрации зоопланктона и биоресурса также резко падали. С этим было связано некоторое сокращение потребления кислорода, в результате чего его концентрация слегка увеличивалась и экосистема возвращалась в пределы границ гомеостазиса.



Р и с. 5. Реакция экосистемы на вынос биогенов с речным стоком: *FP* – фитопланктон, *ZP* – зоопланктон, *BR* – биоресурс, *RF* – речной сток, O_2 – кислород

Заключение

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что применение интеллектуальных агентов управления в уравнениях морских экосистем позволяет моделировать сложные сценарии развития химико-биологических процессов, которые происходят в реальных экосистемах благодаря нелинейным взаимодействиям и эффектам запаздывания следствий по отношению к вызвавшим их причинам. Рассмотренная в статье *ABC*-модель морской экосистемы устойчиво работала в условиях переключения коэффициентов, выполняемого агентами управления и при запаздывании процессов роста концентраций зоо- и фитопланктона. Это дает основания для вывода о том, что метод адаптивного баланса влияний в сочетании с интеллектуальными агентами управления имеет перспективы применения при создании информационных технологий управления морскими экосистемами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и *ABC*-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
2. Shen W, Norrie D.H. Agent-based systems for intelligent Manufacturing: A state-of-the-art survey. Knowledge and Information Systems, KAIS/a Int. J. – 1999. – 1(2). – Р. 129 – 156.
3. 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: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. – С. 62 – 77.
4. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Солодова С.М. Управление природными ресурсами. Имитационная технология *ABC AGENT*. – Севастополь, 2001. – 95 с. – (Препринт НАН Украины. МГИ).
5. Математические модели в биологической океанографии / Ред. Т. Платт, К.Х. Манн, Р.Е. Уланович и др. – Париж: ЮНЕСКО, 1984. – 195 с.

6. *Fasham M.J.R., Duclow H.W., Mckelvie S.H.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the ocean mixed layer//J. Mar. Res. – 1990. – 48. – P. 591 – 639.
7. *Мусеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М.* Человек и биосфера. – М.: Наука, 1985. – 270 с.
8. *Якушев Е.В., Михайловский Г.Е.* Моделирование химико-биологических циклов в Белом море. Расчет сезонной изменчивости фосфора, азота и кислорода//Океанология. – 1993. – 33, № 5. – С. 695 – 702.
9. *Хорн Р.* Морская химия. – М.: Наука, 1972. – 398 с.
10. *Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Моделирование процессов адаптации в экосистемах//Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 1. – С. 46 – 57.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 17.07.02

ABSTRACT New information technology for modeling biochemical processes in marine ecosystems is proposed based on application of logical operators (intelligent agents) in dynamic equations of the models. A concept model of the ecosystem representing 17 biochemical processes and 5 external forcings is constructed. The model equations are obtained by the method of the Adaptive Balance of Causes (ABC) that permits to simulate complex scenarios of processes development in the system and ensures robust calculations. Examples of the ecosystem behavior under insufficient oxygen concentration in marine environment caused by natural and anthropogenic factors are supplied. The conclusion is drawn that joint application of ABC-equations and intelligent agents in the models of marine ecosystems is prospective.