

УДК 551.463

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ В МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ

© В. Н. Еремеев, Е. М. Игумнова, И. Е. Тимченко, 2002

Океанологический центр Национальной Академии Наук Украины, Севастополь, Украина

Поступила 22 мая 2002 г.

Рассмотрен общий подход к построению моделей морских экосистем, использующий причинно-следственные связи между протекающими в них процессами. На основе ABC метода (Adaptive Balance of Causes) построена система уравнений модели, представляющей динамику биокomпонент морской среды в их взаимосвязи с циклами углерода, азота, фосфора и содержанием растворенного кислорода, а также учитывающей разнообразные внешние воздействия на экосистему. Обсуждается проблема определения коэффициентов в ABC моделях экосистем. В качестве примера создана модель, имитирующая динамику фитопланктона, зоопланктона и биоресурса в зависимости от содержания органических и неорганических веществ в морской воде. Проведены вычислительные эксперименты с моделью при различных сценариях солнечного, ветрового, температурного и загрязняющего (речной сток) внешних воздействий. Полученные результаты подтвердили эффективность и практическую полезность ABC метода для моделирования морских экосистем.

Ключевые слова: ABC модели, коэффициенты влияния, динамика экосистемы.

A general approach to the marine ecosystems modeling was suggested based on cause-effect interactions between processes inside a system. With the use of Adaptive Balance of Causes (ABC) method a set of equations was obtained which enable to describe the dynamics of main biological components of the marine environment and their linkages with carbon, nitrogen and phosphorus cycles, dissolved oxygen and various external influences on the ecosystem. The problem of the model coefficients determination was discussed. Simulation experiments with the model were made under different scenarios of external solar, wind, temperature and pollutant contamination (river flow) forcing. The results obtained confirmed the efficiency and profitability of the proposed ABC modeling for marine ecosystems.

Key words: ABC models, cause coefficients, ecosystem dynamics

Современная морская биология располагает достаточно обширным запасом знаний о биохимических явлениях и процессах, представляющих взаимодействие живой и неживой материи в морской среде. Применение этих знаний для изучения и рационального исполь-

зования природных ресурсов моря является главной задачей моделирования морских экосистем. Как известно, общие рекомендации, касающиеся построения подобных моделей, дает системный подход [1, 3, 4]. Исходя из иерархии целей, ради достижения которых,

Моделирование причинно-следственных связей...

собственно, и вводится само понятие “экосистема”, путем анализа выделяются наиболее важные из процессов, без которых будет утрачена целостность рассмотрения конкретной модели ее функционирования. На следующем шаге синтезируется структура системы, для чего привлекается информация о причинно-следственных отношениях между отобранными процессами. Однако логический анализ и синтез дают лишь схему причинно-следственных связей – так называемую концептуальную модель экосистемы, поэтому необходим еще один важный шаг, превращающий последнюю в формальную математическую модель.

Формализация концептуальных моделей составляет центральную проблему математической биологии моря. Обычно при построении формальных моделей учитываются те факторы, которые оказывают влияние на скорости изменения процессов в экосистемах. Классическим примером могут служить модели типа “хищник-жертва”, представляемые уравнениями Лотка-Вольтерра. Причинами изменения количеств хищников и жертв являются парные взаимодействия, а следствиями – рост популяции хищников и сокращение популяции жертв до наступления динамического равновесия в сообществе. Следует однако отметить, что до настоящего времени в морской биологии все еще не сформирован достаточно общий подход к построению математических моделей морских экосистем [2, 3, 10, 11].

Более успешными оказались поиски общего метода, отражающего причинно-следственные связи в моделях экономических систем. Прежде всего отметим метод системной динамики [12], который широко применяется в экономических исследованиях [13]. С его помощью удалось объяснить не предсказуемое экспертами (контринтуитивное) поведение сложных систем, которое является следствием нелинейного взаимодействия процессов, а также запаздывания следствий по отношению к вызвавшим их причинам [14].

В ряде исследований метод системной динамики был применен для моделирования морских эколого-экономических систем. В частности, в работах [5, 7] была решена задача построения системы уравнений модели, основанной на стандартных модулях, в которых причинно-следственные отношения между процессами выражаются при помощи положительных и отрицательных обратных связей. Дальнейшее развитие этого подхода привело к созданию нового метода моделирования сложных систем, получившего название Метод адаптивного баланса влияний или АВС метод (Adaptive Balance of Causes) [8].

В настоящей работе мы попытаемся восполнить обозначенный пробел, рассмотрев применение АВС метода для имитационного моделирования процессов в морских экосистемах. Будет показана возможность получения формальной модели экосистемы на основе общего подхода к построению уравнений динамических процессов. Кроме того, целью

Моделирование причинно-следственных связей...

работы является демонстрация различных сценариев развития процессов в экосистеме при разнообразных внешних влияниях на нее, а также при изменении причинно-следственных связей внутри самой системы. Этим объясняется выбор относительно простой структуры морской экосистемы и использование упрощенных представлений о протекающих в ней биохимических процессах.

Сущность ABC метода моделирования сложных систем Подавляющее большинство природных экосистем относится к такому типу открытых сложных систем, которые находятся в состоянии динамического или квазидинамического равновесия с окружающей их внешней средой. Это означает их относительную устойчивость, понимаемую в следующем смысле: вектор параметров, характеризующих данную систему, получает конечные приращения, вызываемые небольшими изменениями внешних сил за малые интервалы времени. Система приспосабливается (адаптируется) к изменяющимся внешним воздействиям, образуя с ними динамический баланс, т.е. приходя в новое состояние равновесия с внешними силами в каждый из следующих друг за другом малых интервалах времени. Подобное поведение системы можно объяснить тем, что причинно-следственные связи внутри нее сохраняются постоянными или, по крайней мере, изменяются значительно медленнее, чем те процессы, которые описывает эта система.

Предположение об устойчивости всей системы в целом позволяет постулировать устойчивость отдельных ее элементов-модулей. В ABC методе используется универсальный модуль, обладающий этим свойством. Его уравнение имеет следующий вид [8]:

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

где c – некоторая константа, а $F^{(+)}(x)$ представляет собой монотонно растущую функцию, 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 представляет один 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

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

Моделирование причинно-следственных связей...

где $a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1N}$ - некоторые коэффициенты влияния. Из формул (1) и (2) получаем

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

В работе [8] 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.

Отсылая читателя за подробностями ABC метода к монографии [8], отметим лишь основные его свойства:

1. Уравнение универсального модуля построено таким образом, что оно обеспечивает весьма быструю сходимость решений уравнений модели экосистемы к устойчивому равновесному состоянию.
2. Быстрая сходимость обеспечивает отслеживание системой уравнений плавных изменений коэффициентов влияний и внешних воздействий. Иными словами, возможно описание существенно нелинейных систем с переменными коэффициентами, зависящими от времени.

3. Метод позволяет учитывать запаздывания влияний, т.е. ввести запаздывающие аргументы.

4. Область устойчивости численного алгоритма решения уравнений модели заключена в пределах $0 < x_i < 2x_i^*$ ($i = 1, 2, \dots, N$).

ABC метод моделирования пригоден для создания математических моделей любых сложных систем. Модели различных систем отличаются между собой лишь выбором моделируемых процессов и причинно-следственными отношениями между процессами. Структура уравнений моделей при этом сохраняется неизменной.

Построение математической модели морской экосистемы ABC методом. В качестве цели моделирования поставим задачу получить сценарии развития процессов в морской экосистеме, находящейся под воздействием следующих основных внешних факторов: солнечной радиации SR, ветрового перемешивания WF, температуры морской воды TW и пресноводного (речного) стока RF. Конкретизируем эту задачу выбором следующих 12 параметров, которые составят основу для формализации концептуальной модели функционирования экосистемы:

1. $x_1(t)$ – соленость морской воды SA,
2. $x_2(t)$ – концентрация биоресурса BR,
3. $x_3(t)$ – концентрация загрязняющих веществ PL,
4. $x_4(t)$ – концентрация фитопланктона FP,
5. $x_5(t)$ – концентрация зоопланктона ZP,
6. $x_6(t)$ – содержание растворенного кислорода OX,

Моделирование причинно-следственных связей...

7. $x_7(t)$ – содержание углекислого газа CO_2 ,
8. $x_8(t)$ – содержание неорганического азота NO_3^- ,
9. $x_9(t)$ – содержание неорганического фосфора PO_4^{3-} ,
10. $x_{10}(t)$ – содержание органического углерода CO_2 ,
11. $x_{11}(t)$ – содержание органического азота NO_3^- ,
12. $x_{12}(t)$ – содержание органического фосфора PO_4^{3-} .

Выбор перечисленных процессов позволяет использовать известные причинно-следственные отношения между основными элементами трофической цепи, состоящей из фитопланктона, зоопланктона и расположенных выше в этой иерархической схеме живых объектов, которые мы объединили общим понятием “биологический ресурс”.

Заметим, что этот термин не обязательно подразумевает промысловые объекты морской среды. Речь идет о различных организмах, питающихся зоопланктоном и, в свою очередь, обеспечивающих существование других организмов, в том числе промысловых объектов. Подобное агрегирование не является принципиальным для применяемого нами метода моделирования. Оно лишь существенно сокращает количество дополнительных параметров, которые необходимо было бы ввести в рассмотрение для учета конкретных живых объектов популяции морских организмов.

Для построения концептуальной модели экосистемы необходимо включить в нее зависимости концентраций живых объектов от содержания растворенного кислорода в мор-

ской воде. Кроме того, должны быть учтены причины и следствия, определяющие циклы углерода, азота и фосфора.

Схема причинно-следственных связей в модели морской экосистемы показана на рис. 1. Стрелки изображают направления влияний. В целях упрощения схемы взаимные влияния представлены общими линиями с разнонаправленными стрелками. Кроме того, использованы магистральные линии влияния, такие как, например, линия, идущая от концентрации загрязняющих веществ PL к содержанию органических CO_2 , NO_3^- , PO_4^{3-} и неорганических NO_3^- , PO_4^{3-} веществ в морской воде.

Располагая концептуальной моделью (рис. 1), несложно воспользоваться ABC методом для построения математической модели экосистемы. С этой целью выпишем последовательно уравнения (6) для каждого из 12 модулей концептуальной модели:

$$\frac{dx_1}{dt} = c_1 x_1(t) [x_1^* - (x_1(t) - a_{13} x_3(t) + a_{1RF}(RF(t)))]$$

$$\frac{dx_2}{dt} = c_2 x_2(t) [x_2^* - (x_2(t) + a_{21} x_1(t) - a_{2TW}(TW(t)) + a_{23} x_3(t) - a_{26} x_6(t) - a_{25} x_5(t))]$$

$$\frac{dx_3}{dt} = c_3 x_3(t) [x_3^* - (x_3(t) + a_{3WF}(WF(t)) - a_{3RF}(RF(t)))]$$

$$\frac{dx_4}{dt} = c_4 x_4(t) [x_4^* - (x_4(t) + a_{43} x_3(t) - a_{49} x_9(t) + a_{45} x_5(t) - a_{48} x_8(t) - a_{47} x_7(t) - a_{4TW}(TW(t)) - a_{4SR}(SR(t)))]$$

$$\frac{dx_5}{dt} = c_5 x_5(t) [x_5^* - (x_5(t) - a_{54} x_4(t) + a_{52} x_2(t) + a_{53} x_3(t) - a_{56} x_6(t) - a_{5TW}(TW(t)))]$$

$$\frac{dx_6}{dt} = c_6 x_6(t) [x_6^* - (x_6(t) + a_{65} x_5(t) + a_{62} x_2(t) + a_{69} x_9(t) - a_{6TW}(TW(t)) - a_{6WF}(WF(t)))]$$

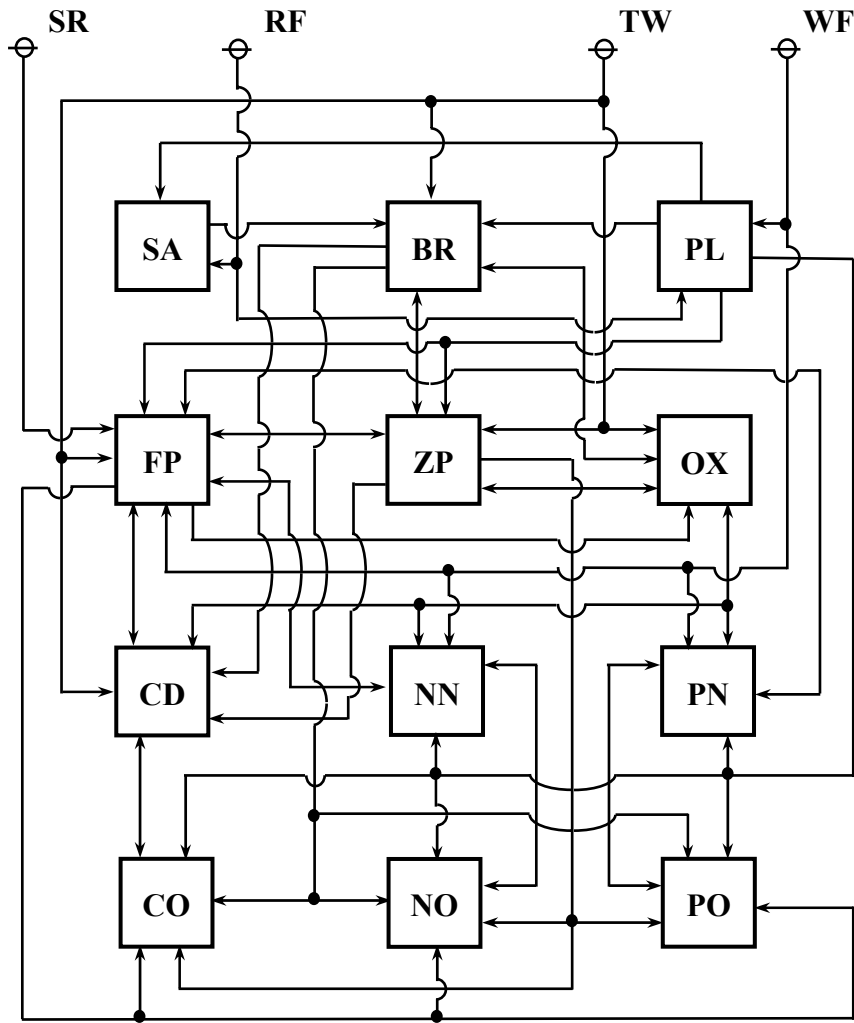


Рис. 1. Причинно-следственные связи в морской экосистеме
 Fig. 1. Cause-effect relations in marine ecosystems

$$\begin{aligned}
 dx_7/dt = & c_7x_7(t)[x_7^* - (x_7(t) + a_{74} x_4(t) - a_{76} x_6(t) - \\
 & - a_{72} x_2(t) - a_{75} x_5(t) - a_{710} x_{10}(t) - \\
 & - a_{7TW}(TW(t))],
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 dx_8/dt = & c_8x_8(t)[x_8^* - (x_8(t) + a_{84} x_4(t) - a_{86} x_6(t) - \\
 & - a_{811} x_{11}(t) - a_{8TW}(TW(t)) - a_{8WF}(WF(t))],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 dx_9/dt = & c_9x_9(t)[x_9^* - (x_9(t) - a_{912} x_{12}(t) - \\
 & - a_{96} x_6(t) + a_{94} x_4(t) - a_{93} x_3(t) - a_{9WF}(WF(t))],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 dx_{10}/dt = & c_{10}x_{10}(t)[x_{10}^* - (x_{10}(t) - a_{104} x_4(t) - \\
 & - a_{105} x_5(t) - a_{102} x_2(t) - a_{103} x_3(t) + a_{107} x_7(t))],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 dx_{11}/dt = & c_{11}x_{11}(t)[x_{11}^* - (x_{11}(t) - a_{112} x_2(t) - a_{113} \\
 & - x_3(t) + a_{118} x_8(t) - a_{115} x_5(t) - a_{114} x_4(t))],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 dx_{12}/dt = & c_{12}x_{12}(t)[x_{12}^* - (x_{12}(t) + a_{129} x_9(t) - \\
 & - a_{122} x_2(t) - a_{124} x_4(t) - a_{125} x_5(t) - a_{123} x_3(t))].
 \end{aligned}$$

Построенная математическая модель позволяет рассчитывать реакцию экосистемы на известные из наблюдений или имитируемые внешние влияния SR, RF, TW и WF при заданных коэффициентах влияния и при выборе масштабирующих множителей c_1, \dots, c_{12} .

Она позволяет также прогнозировать сценарии развития процессов в экосистеме на основе прогнозируемых изменений внешних воздействий.

Определение коэффициентов влияния и численная реализация модели Для решения системы уравнений модели последние должны быть записаны в конечно-разностной форме. Как показывает опыт применения ABC моделей [8], достаточно воспользоваться простейшими итерационными алгоритмами. Удобно перейти к безразмерным относительным значениям моделируемых процессов путем приведения их к какой-либо общей шкале, например, к интервалу (0, 10). Областью частных значений базовых функций влияния $F^{(-)}(x)$ и $F^{(+)}(x)$ будет интервал (0,1), а средние значения всех процессов становятся равными 5.

Установление коэффициентов влияния a_{ij} представляет собой важный этап построения динамической модели экосистемы. Существуют два основных способа их определения.

Прежде всего, величины коэффициентов могут быть выбраны путем сравнительного анализа влияющих факторов, основанного на опытных данных и экспертных оценках. Приближенно их значения могут быть определены, когда выполнен количественный анализ потоков соответствующих субстанций в экосистеме. Хотя недостатком этого метода является его субъективность, он чаще всего применяется на практике [2, 3, 10, 11]. Второй метод предполагает объективный анализ про-

цессов, наблюдаемых в системе под влиянием внешних воздействий [8]. Речь идет об использовании архивных данных или об организации специальных наблюдений, когда это возможно, для определения статистических связей между процессами, протекающими в системе, а также внешними воздействиями на нее. Этот метод позволяет идентифицировать коэффициенты уравнений ABC моделей через соответствующие корреляционные матрицы.

Для пояснения сути второго метода воспользуемся результатами работы [6], в которой рассмотрена более простая экосистема, состоящая из популяции организмов и окружающей среды. Обозначим через x_1 количество мужских организмов некоторого вида, а через x_2 – женских. Условия их обитания будем характеризовать одним фактором x_3 , который отрицательно влияет на количества x_1 и x_2 . Стремясь приспособиться к этому фактору, организмы адаптируются к условиям среды, и тем самым уменьшают вредное для них влияние фактора x_3 . Схема причинно-следственных связей в этой экосистеме и соответствующие коэффициенты влияния показаны на рис. 2.

Уравнения ABC модели имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= c_1 x_1(t) [x_1^* - (x_1(t) - a_{12} x_2(t) + \\ & a_{13} x_3(t) - f_1(t))], \\ dx_2/dt &= c_2 x_2(t) [x_2^* - (x_2(t) - a_{21} x_1(t) + \\ & a_{23} x_3(t) - f_2(t))], \\ dx_3/dt &= c_3 x_3(t) [x_3^* - (x_3(t) + a_{31} x_1(t) + \\ & a_{32} x_2(t) - f_3(t))], \end{aligned} \quad (8)$$

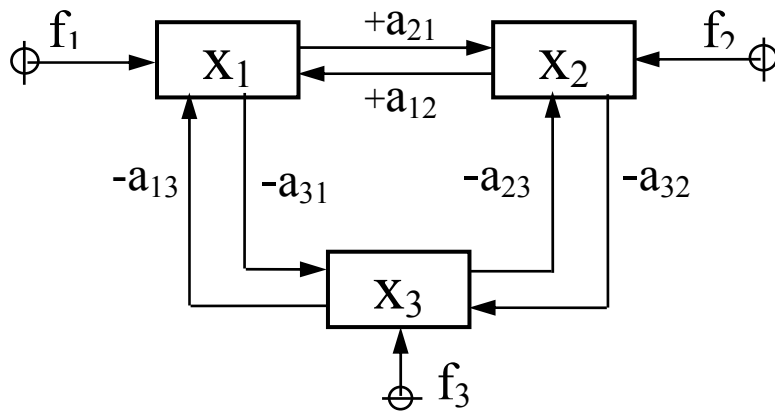


Рис. 2. Причинно-следственные связи в модели биогеоценоза

Fig. 2. Cause and effect relations in biocenosis model

где функции f_1, f_2, f_3 представляют внешние воздействия на систему. Наблюдая на некотором интервале времени реакцию модели на внешние влияния, можно построить систему уравнений, использующую корреляционную матрицу связей между сценариями адаптации и внешними влияниями.

В качестве примера приведем уравнения для определения коэффициентов a_{12} и a_{13} , которые могут быть выведены с использованием метода наименьших квадратов, по аналогии с выводом уравнений оптимальной интерполяции [15]. Введем обозначения для коэффициентов корреляции адаптационных процессов в экосистеме $D_{12}=M[x_1x_2]$ и для коэффициентов взаимной корреляции адаптационных процессов и внешних воздействий $G_{12}=M[x_1f_2]$, где M - оператор нахождения математического ожидания, а индексы соответствуют индексам процессов и воздействий. Тогда из системы уравнений оптимальной интерполяции для коэффициентов a_{12} и a_{13} имеем [6]:

$$a_{12} = (D_{12} - G_{21} - D_{23} D_{13} + D_{23} G_{31}) / (1 - D_{23}^2),$$

(9)

$$a_{13} = (D_{13} - G_{31} - D_{23} D_{12} + D_{23} G_{21}) / (1 - D_{23}^2).$$

Аналогичные формулы легко выводятся для остальных коэффициентов влияния.

Для того, чтобы оценить эффективность предложенной методики, были проведены имитационные эксперименты с моделью (8). Процесс идентификации коэффициентов влияния демонстрируют графики на рис. 3 а, б, с. Оценка корреляционных матриц производилась по отрезкам рядов длиной в 300 шагов по времени.

Как следует из приведенных результатов, коэффициенты влияния a_{mn} были идентифицированы достаточно точно на большей части интервала времени имитации, который составлял 600 шагов. В конце интервала ошибки идентификации возрастали из-за сокращения объемов используемых выборок.

При установлении коэффициентов влияния необходимо принять во внимание важное обстоятельство, которое отличает живые объекты моделируемой экосистемы от неживых.

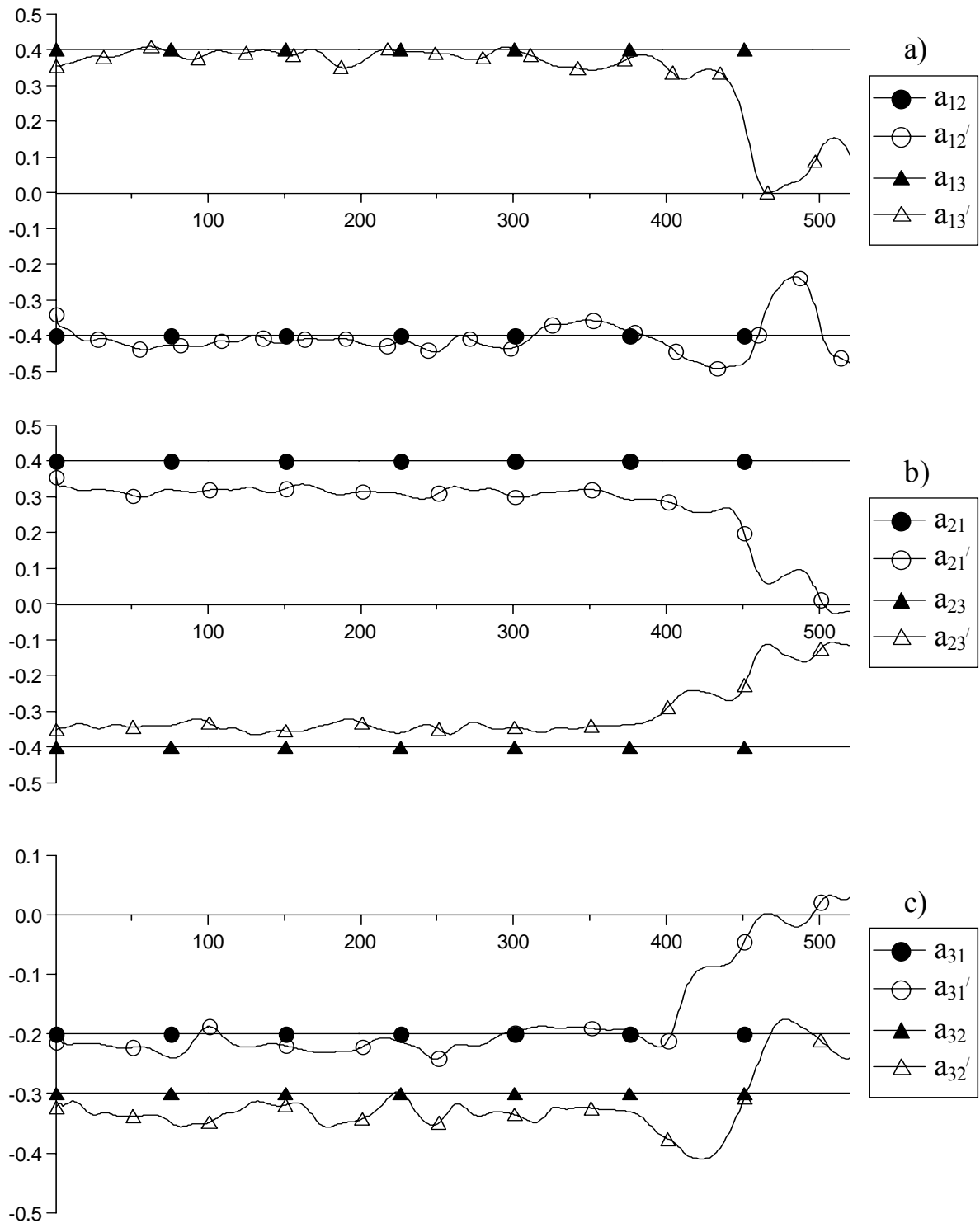


Рис. 3. Результаты идентификации коэффициентов модели

Fig. 3. Results of identification of model coefficients

Биоресурс, зоопланктон и фитопланктон могут существовать лишь в условиях гомеостаза, т.е. при наличии комплекса благоприятных для них условий. Например, для роста концентрации зоопланктона необходимо не только увеличение концентрации фитопланктона, но и повышение содержания кислорода в морской воде. Это означает, что соответствующие коэффициенты влияния в уравнении динамики зоопланктона должны быть условными, так как в каждый момент времени один из этих двух влияющих факторов будет лимитирующим.

Условные коэффициенты влияния вводятся путем добавления к уравнениям модели экосистемы (7) логических условий. Подобные условия были сформулированы в предложенной в работе [9] информационной технологии, которая связывает объемы продукции, выпускаемой экономической системой, с имеющимися у нее ресурсами.

Будем считать, что для существования единичной концентрации живого объекта x_m в морской среде (например, зоопланктона x_5) требуется y_1 единиц концентрации первого ресурса (например, фитопланктона x_4), y_2 единиц концентрации второго ресурса (например, кислорода x_6) и так далее до y_N единиц концентрации N-го ресурса.

Концентрация живого объекта x_m будет лимитирована тем видом ресурса x_p ($p = 1, 2, \dots, N$), количество которого x_{pj}/y_p является наименьшим. Обозначим это минимальное количество M_{pj} . Тогда условные коэффициен-

ты влияния в уравнении для x_m могут быть выражены следующими соотношениями:

$$a_{mpj} = IF(x_{pj}/y_p = M_{pj}; a_{mp}; a_{mp}x_p^*/x_{pj});$$

$$M_{pj} = \min\{x_{1j}/y_1, x_{2j}/y_2, \dots, x_{Nj}/y_N\}. \quad (10)$$

Логические условия (10) распространяются на все те влияния в модели экосистемы (7), которые обусловлены действием совокупности факторов. К ним должны быть отнесены влияния, управляющие динамикой биоресурса x_2 , зоопланктона x_4 и фитопланктона x_5 .

Имитационное моделирование реакции экосистемы на внешние воздействия.

Вернемся к рассмотрению экосистемы (рис. 1). В проведенных с моделью (7) вычислительных экспериментах коэффициенты влияния считались известными, т.е. были заданы субъективно с учетом условий (10). Шаг вычислений по времени был выбран равным одним суткам, а расчеты проводились на 500 суток. Первоначально проверялось свойство модели сохранять равновесное состояние при отсутствии внешних воздействий. Расчеты показали, что равновесные решения при произвольно задаваемых начальных условиях для уравнений (7) устанавливаются уже на первых 5 - 7 итерациях и в дальнейшем сохраняются неизменными. Равновесные значения процессов отличались от индивидуальных средних уровней, которые были выбраны равными 5 брм. ед., в виду действующих внутри системы взаимных влияний между модулями.

Затем были имитированы динамические внешние воздействия на экосистему, которые показаны на рис. 4 а. Речной сток RF

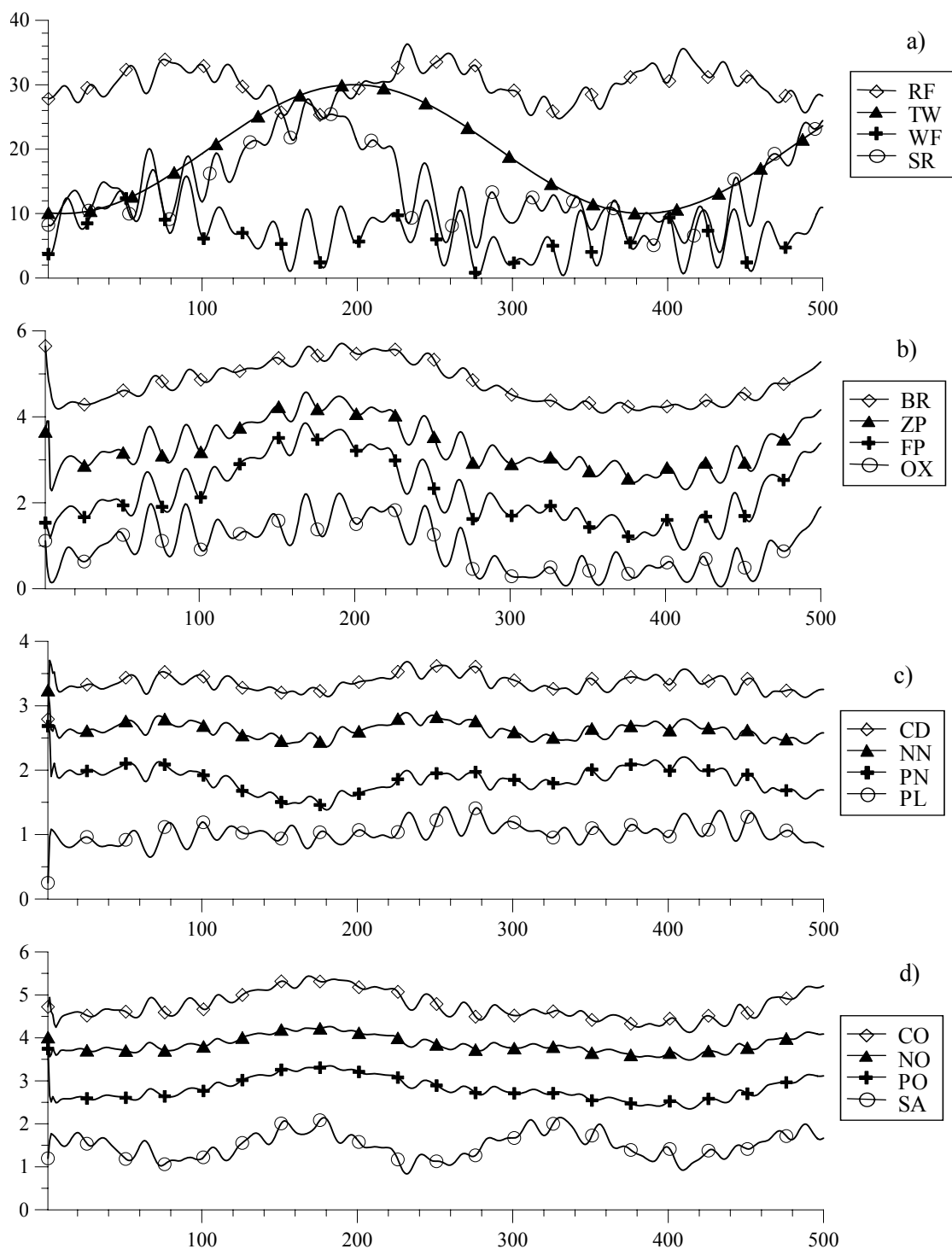


Рис. 4. Реакция модели экосистемы на имитированные внешние воздействия (относительные величины): **a)** RF - речной сток, TW - температура морской воды, WF - интенсивность ветрового перемешивания, SR - инсоляция; **b)** BR - концентрация биоресурса, ZP - концентрация зоопланктона, FP - концентрация фитопланктона, OX - концентрация растворенного кислорода; **c)** CD - содержание углекислого газа, NN - содержание неорганического азота, PN - содержание неорганического фосфора, PL - концентрация загрязнений; **d)** CO - содержание органического углерода, NO - содержание органического азота, PO - содержание органического фосфора, SA - соленость.

Fig. 4. Response of ecosystem model on simulated external influence, non-dimension values

был представлен случайными колебаниями, наложенными на цикл с полугодовым периодом, причем максимумы стока были приурочены к весеннему и осеннему интервалам времени. Годовой ход температуры воды TW имел отчетливый максимум в середине года, а вариации ветрового режима WF представляли собой случайные колебания в течение всего периода времени вычислений. В качестве среднесуточной освещенности SR был использован сценарий с максимумом в середине года, который был модулирован случайными колебаниями, имитировавшими изменения освещенности за счет облачности. Заметим, что в этом и последующих численных экспериментах интерес представляли не абсолютные значения имитированных процессов, а тенденции их изменения. Поэтому для большей наглядности кривые на рис. 4 разнесены по вертикали.

Реакция экосистемы на эти внешние воздействия представлена на рис. 4 b, c, d. Наибольшую изменчивость демонстрирует сценарий развития фитопланктона FP. Максимальные значения концентрации фитопланктона приходятся на максимумы освещенности, температуры морской воды и содержания в ней органических веществ. Изменения концентраций зоопланктона и биоресурса хорошо коррелируют с концентрацией фитопланктона. При выбранных коэффициентах влияния рост концентрации фитопланктона в большей степени способствовал увеличению содержания кислорода, чем ветровое пе-

ремешивание. В этом можно убедиться, сравнивая соответствующие сценарии для периода времени с 90 по 180 шаг вычислений.

В сценариях изменчивости фитопланктона, зоопланктона и биоресурса хорошо заметно влияние короткопериодных флуктуаций содержания кислорода, которые в свою очередь отслеживают флуктуации ветрового воздействия.

Представленные на рис. 4 c, d сценарии изменчивости содержания органических и неорганических веществ в морской воде находятся в соответствии с динамикой фитопланктона, зоопланктона и биоресурса. С периодами роста их концентраций связано увеличение количества органических веществ и уменьшение содержания углекислого газа, неорганических азота и фосфора.

В последующих вычислительных экспериментах к рассмотренным выше внешним воздействиям добавлялись новые влияющие факторы. Так, например, изучалась реакция экосистемы на постепенное накопление вредных для биоты загрязняющих веществ, которые поступают с речным стоком. Начало выброса этих загрязнений приходится на 150 шаг вычислений, что легко прослеживается по кривой PL на рис. 5. Как и следовало ожидать, по мере роста концентрации загрязняющих веществ наблюдается уменьшение концентраций фитопланктона, зоопланктона и биоресурса.

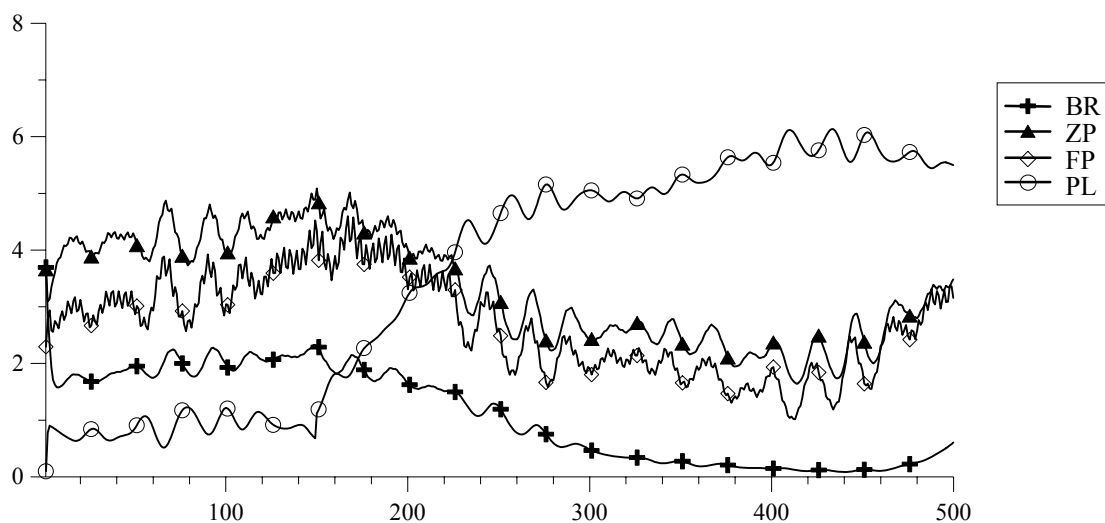


Рис. 5. Реакция экосистемы на рост концентрации загрязняющих веществ (BR - биоресурс, ZP - зоопланктон, FP - фитопланктон, PL - загрязнения)

Fig. 5. Ecosystem response on the increase of pollution concentration (BR - bioresources, ZP - zooplankton, FP - phytoplankton, PL - pollution)

Еще одна серия экспериментов была связана с изучением поведения экосистемы вблизи границ гомеостазиса. Предполагалось, что при уменьшении концентраций объектов пищевой цепи и изменении жизненно важных условий существования организмов в морской воде экосистема приближается к границам своего гомеостазиса. При этом лимитирующие факторы развития процессов в экосистеме, определенные выше (см. условия (10)), превращаются в факторы деградации. Для моделирования подобных ситуаций в правые части уравнений модели (7) были добавлены следующие логические функции, управляющие концентрацией биоресурса:

$$x_2^*(t) = \text{IF} \{x_5(t) > x_5^0; 0; -x_2^*[1 - \exp(-\alpha_{25}t)]\};$$

$$x_2^*(t) = \text{IF} \{x_6(t) > x_6^0; 0; -x_2^*[1 - \exp(-\alpha_{26}t)]\},$$

концентрацией зоопланктона:

$$x_5^*(t) = \text{IF} \{x_4(t) > x_4^0; 0; -x_5^*[1 - \exp(-\alpha_{54}t)]\};$$

$$x_5^*(t) = \text{IF} \{x_6(t) > x_6^0; 0; -x_5^*[1 - \exp(-\alpha_{56}t)]\}$$

и концентрацией фитопланктона:

$$x_4^*(t) = \text{IF} \{SR^*(t) > SR^0; 0; -x_4^*[1 - \exp(-\alpha_{4SR}t)]\};$$

$$x_4^*(t) = \text{IF} \{x_7(t) > x_7^0; 0; -x_4^*[1 - \exp(-\alpha_{47}t)]\},$$

$$x_4^*(t) = \text{IF} \{x_8(t) > x_8^0; 0; -x_4^*[1 - \exp(-\alpha_{48}t)]\};$$

$$x_4^*(t) = \text{IF} \{x_9(t) > x_9^0; 0; -x_4^*[1 - \exp(-\alpha_{49}t)]\}.$$

В приведенных формулах границы гомеостазиса установлены с помощью предельно допустимых значений концентрации зоопланктона x_5^0 , фитопланктона x_4^0 , кислорода x_6^0 , углекислого газа x_7^0 , неорганического азота x_8^0 , неорганического фосфора x_9^0 и солнечной радиации SR^0 . При достижении этих границ средние значения концентраций биоресурса x_2^* , зоопланктона x_5^* и фитопланктона

x_4^* устремлялись к нулю. Скорости падения средних значений концентраций регулировались путем выбора коэффициентов α_{mn}

На рис. 6 представлены сценарии развития процессов в экосистеме при установлении предельно допустимого для зоопланктона минимума растворенного в воде кислорода. Величина x_6^0 была выбрана по графику $x_6(t)$, изображенному на рис. 4 б. Переходы экосистемы через границу гомеостаза по кислороду отмечаются резкими падениями концентраций зоопланктона и биоресурса. Менее чувствительной, как и следовало ожидать, оказалась концентрация фитопланктона. Уменьшение концентраций биоресурса и зоопланктона сопровождалось сокращением потребления ими кислорода. Концентрация кислорода увеличивалась также под действием отдельных флуктуаций ветрового воздействия. Поэтому через интервалы времени порядка 25 шагов вычислений содержание кислорода в морской воде восстанавливалось до значений, превышавших пороговую величину x_6^0 . Одновременно начинали расти концентрации зоопланктона и биоресурса. Поэтому вблизи границы гомеостаза наблюдаются характерные колебания графиков BR, ZP и OX.

В экспериментах, результаты которых приведены на рис. 7, было установлено дополнительное ограничение: концентрация фитопланктона начинала резко уменьшаться при падении содержания углекислого газа ниже порогового уровня. В этом эксперименте зоопланктон оказался зависящим от двух крити-

ческих параметров: установленной для него границы начала деградации по кислороду x_6^0 и установленной для фитопланктона аналогичной границы по углекислому газу x_7^0 . Поэтому колебания концентрации зоопланктона приняли более обостренный характер. В особенности это заметно для сценариев, показанных на рис. 7, в периоды времени вычислений с 250 по 370 и с 430 по 480 шаг.

Заметим, что наряду с условными влияниями (10), учитывающими те пропорции, в которых живые организмы потребляют биогены и кислород, установление границ области гомеостаза экосистемы представляет собой еще один шаг на пути к более реалистичному, но и более сложному моделированию морских экосистем.

Результаты проведенных исследований и вычислительные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

1. ABC метод моделирования сложных систем позволяет относительно просто строить математические модели морских экосистем, если путем экспертного анализа определены главные процессы в экосистеме и установлены причинно-следственные связи между ними.

2. ABC модели весьма удобны для имитационного моделирования сценариев развития процессов в экосистемах при различных внешних воздействиях ввиду быстрой сходимости итерационных алгоритмов решения уравнений модели.

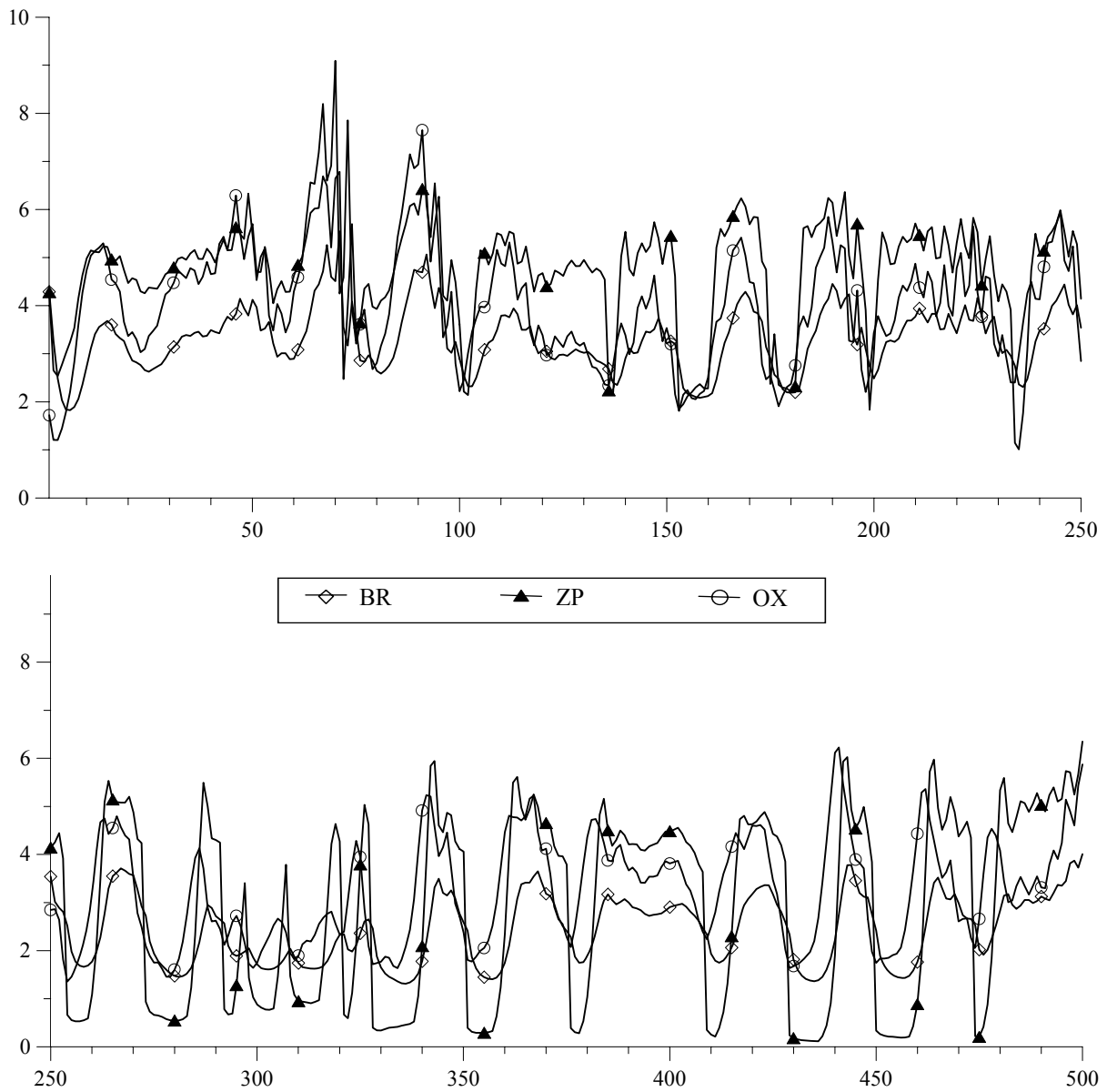


Рис. 6. Поведение экосистемы при недостатке растворенного кислорода: гибель зоопланктона при падении концентрации кислорода ниже 2.5 брм.ед. (BR - биоресурс, ZP - зоопланктон, OX - кислород)
Fig. 6. Ecosystem response on dissolved oxygen deficiency: a death of zooplankton under decrease of oxygen concentration below 2.5 ndv (BR - bioresources, ZP - zooplankton, OX - oxygen)

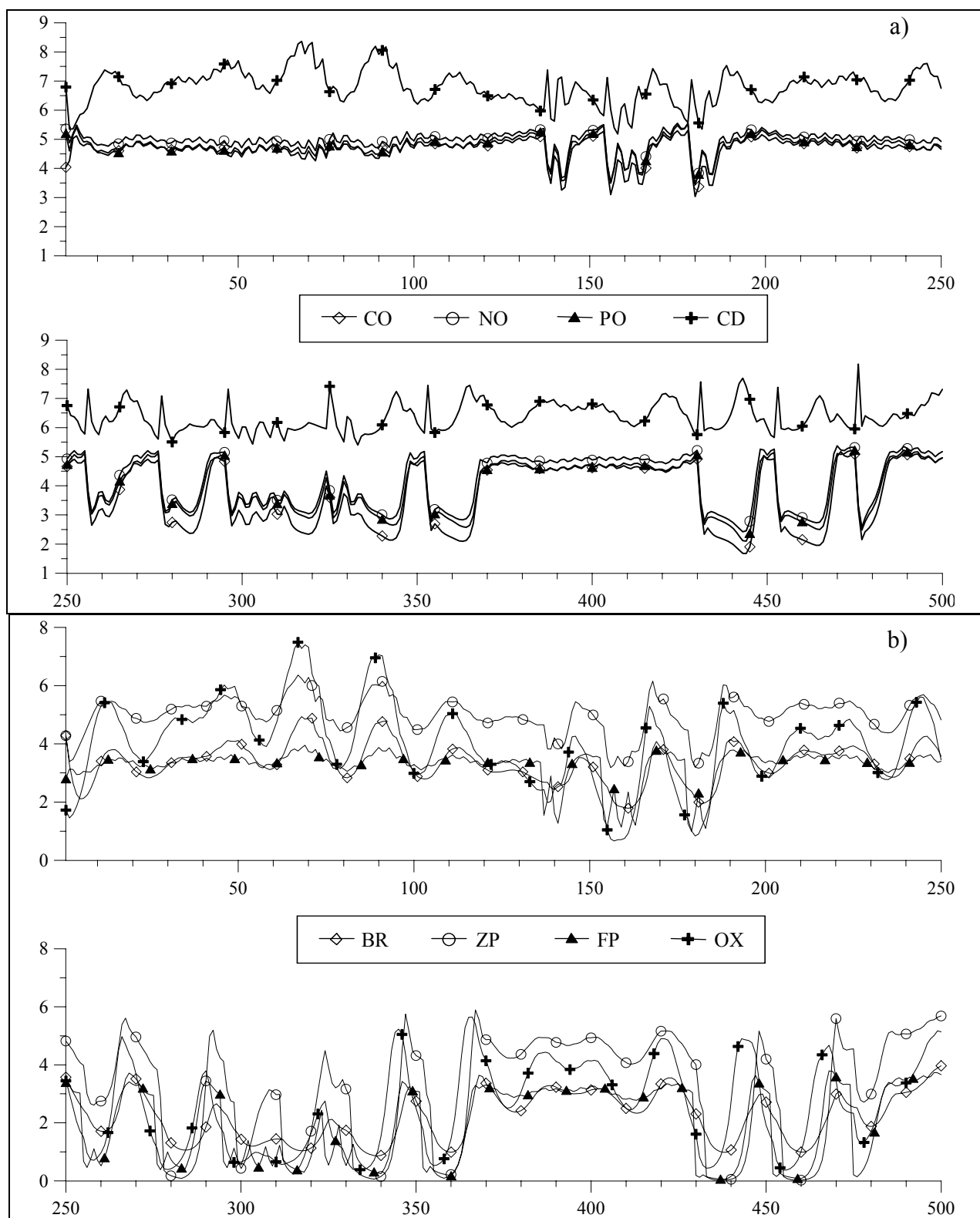


Рис. 7. Развитие процессов в экосистеме при недостатке органических веществ и кислорода: а) падение содержания органических веществ при уменьшении концентрации фитопланктона: CO - органический углерод, NO - органический азот, PO - органический фосфор, CD - углекислый газ; б) сценарии развития процессов в экосистеме при тех же условиях: BR - биоресурс, ZP - зоопланктон, FP - фитопланктон, OX - кислород. Fig. 7. Processes in ecosystem on deficiency of organic matters and oxygen

3. Переход от простых моделей экосистем к более сложным, содержащим большое количество взаимосвязанных процессов, в ABC методе моделирования не представляет особых затруднений в виду однотипности уравнений модулей и общего принципа учета в них причинно-следственных зависимостей.

4. Предложенный вариант ABC метода рассчитан на моделирование небольших отклонений процессов в экосистемах от их средних значений.

Дальнейшее развитие метода, заключается в более полном учете границ гомеостаза экосистемы, а также тех пропорций, в которых происходят трансформация веществ и потребление пищевых и минеральных ресурсов живыми объектами морской среды.

1. *Еремеев В. Н., Тимченко И. Е.* Устойчивое развитие: системный подход // Приморские города и поселки Черного и Азовского морей: совместно к устойчивому развитию: Тез. докл. Международной конф., Севастополь, март 12 - 16, 2001. - Севастополь, 2001 - С. 22 - 23.
2. *Математические модели в биологической океанографии* / Т. Платт, К. Х. Манн, Р. Е. Уланович и др. - Париж.: Изд. ЮНЕСКО, 1984. - 195 с.
3. *Моисеев Н. Н., Александров В. В., Тарко А. М.* Человек и биосфера. - М.: Наука, 1985. - 270 с.
4. *Тимченко И. Е.* Системные методы в гидрофизике океана. - К.: Наук. думка, 1988. - 180 с.
5. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М.* Морская среда как эколого-экономическая система // Морской гидрофизический журнал. - 1996. - № 6. - С. 28 - 37.
6. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Солодова С. М.* Управление природными ресурсами. Имитационная технология ABC AGENT. - Севастополь.: Изд. МГИ НАНУ, 2001. - 95 с.
7. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Прималенный А. А.* Управление эколого-экономическими системами. - Севастополь: Экокси-Гидрофизика, 1999. - 180 с.
8. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И.* Системный менеджмент и ABC технологии устойчивого развития. - Севастополь: Экокси-гидрофизика, 2000. - 225 с.
9. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И.* Динамика эколого-экономических систем. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - Севастополь: Изд. МГИ НАНУ, 2001. - С. 62 - 77.
10. *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.
11. *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.
12. *Forrester J. W.* Principles of Systems. - Cambridge MA: Productivity Press, 1968. - 280 p.
13. *Forrester J. W.* World Dynamics (2 ed.). - Cambridge MA: Productivity Press, 1973. - 340 p.
14. *Sterman J. D.* Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. - Irwin McGraw Hill, 1999. - 420 p.
15. *Timchenko I. E.* Stochastic Modelling of Ocean Dynamics. - Chur - London - Paris - New York: Harwood Acad. Publ., 1984. - 320 p.