

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.46.02

И.Е. Тимченко, И.К. Иващенко, Е.М. Игумнова, И.П. Лазарчук

Учет динамики и ресурсных свойств морской среды в адаптивных моделях морских экосистем

Рассмотрены адаптивные модели морских экосистем, в которых стабилизирующие обратные связи обеспечивают приспособление моделируемых процессов к состоянию динамического баланса с внешними влияниями на экосистему. Показано, что в подобных моделях закон сохранения баланса влияний позволяет адаптировать переменные экосистемы к оценкам ресурсных возможностей морской среды. Исследован баланс влияний при численном решении уравнений адаптивных моделей. Предложено использовать подобные модели для локальной адаптации химико-биологических процессов к данным о переносе и диффузии веществ, рассчитываемым по численным моделям динамики моря. Рассмотрен пример локальной адаптации сценариев интегральной модели морской экосистемы к имитированным данным о температуре морской поверхности, концентрациях хлорофилла a , переносе и диффузии в верхнем слое моря.

Ключевые слова: адаптивные модели, закон сохранения баланса влияний, ресурсная емкость.

Введение

Моделирование морских экосистем предполагает описание совместного взаимодействия биологических, гидрохимических, геофизических и гидрофизических процессов в морской среде. Для решения этой сложной проблемы применяются физические законы сохранения, законы химического взаимодействия веществ, а также наблюдаемые условия существования и правила поведения живых организмов. Наиболее общий подход к созданию моделей морских экосистем заключается в добавлении функций, учитывающих химико-биологические взаимодействия компонентов экосистемы, в уравнения динамики морской среды, описывающие перенос и диффузию водных масс. Это приводит к сложным уравнениям класса реакции – диффузия, свойства которых (устойчивость, возникновение бегущих волн) еще недостаточно изучены [1 – 4].

Несколько более простой подход заключается в двухэтапном моделировании экосистемы. На первом этапе по современной численной модели рассчитывается динамика водных масс, на втором – по модели экосистемы проводится локальная (в пределах ячейки расчетной сетки) подстройка переменных экосистемы друг к другу с учетом имеющихся оценок переноса и диффузии веществ. При таком моделировании рассчитываемые по гидродинамическим моделям перенос и диффузия становятся внешними влияниями по отношению к реакциям, происходящим в локальном объеме среды. Для локаль-

© И.Е. Тимченко, И.К. Иващенко, Е.М. Игумнова, И.П. Лазарчук, 2014

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 4

51

ной адаптации переменных экосистемы к переносу и диффузии предлагается использовать адаптивные модели причинно-следственных зависимостей между переменными экосистемы [5 – 9].

Особенностью адаптивных моделей являются отрицательные обратные связи моделируемых процессов и скоростей их изменения, которые присутствуют в каждом уравнении модели. Поэтому адаптивные модели экосистем адекватно отображают основное свойство живых организмов – их стремление приспособиться к изменяющимся условиям окружающей среды и максимально использовать имеющиеся ресурсы развития популяции для выживания и размножения.

Цель настоящей работы – проверка в условиях имитационного эксперимента сформулированной выше идеи двухэтапного подхода к моделированию экосистем с использованием адаптивных моделей. Взаимодействие компонентов экосистемы между собой и их изменения под влиянием внешних факторов будем называть общим термином «реакции». Реакции в адаптивной модели экосистемы подчинены стремлению сохранить состояние динамического равновесия внутрисистемных и внешних влияний. Однако возможности приспособления процессов, развивающихся в экосистемах, принципиально ограничены имеющимися ресурсами прохождения реакций. Поэтому для каждой субстанции, участвующей в реакции, существует предельное значение концентрации u_i , ограниченное ресурсной емкостью (*current capacity* [3]) окружающей среды C_i . Это принципиальное свойство экосистем выражает закон сохранения баланса влияний, который можно сформулировать следующим образом: в процессе реакций приспособления друг к другу и к внешним влияниям переменные экосистемы принимают такие значения, которые дополняют алгебраические суммы приложенных к ним влияний до значений ресурсных емкостей окружающей среды по каждой переменной.

Интерес к разработке адаптивных моделей был вызван широким распространением метода системной динамики, применяемого для построения моделей сложных систем по информации о причинно-следственных зависимостях между процессами, образующими систему [10, 11]. В моделях системной динамики отрицательные обратные связи, включаемые в уравнения, содержат искомые переменные в первой степени. Как показывают исследования, такие модели, называемые ниже моделями первого порядка, демонстрируют быструю адаптацию системы к состоянию динамического равновесия с внешними влияниями. Однако в моделях первого порядка отсутствуют механизмы ограничения роста процессов: не установлены реальные пределы роста переменных, обеспеченные ресурсными возможностями окружающей среды. Сформулированный выше закон сохранения баланса влияний в уравнениях моделей первого порядка не учитывает ресурсные емкости окружающей среды.

Для учета потенциальных ресурсных возможностей окружающей среды в адаптивных моделях с отрицательными обратными связями второго порядка (модели второго порядка) скорости изменения переменных связаны с квадратами переменных. Квадратичные обратные связи в форме логистических функций широко применяются в моделях роста популяции живых организмов.

мов, в которых принципиально важно учитывать ресурсную обеспеченность развития популяции [3, 4]. Подобные обратные связи были применены и при разработке метода адаптивного баланса влияний (*ABC*-метод), также основанного на использовании системы логистических дифференциальных уравнений [5]. В моделях экосистем, построенных *ABC*-методом, закон сохранения баланса влияний ограничивает рост переменных по мере приближения их значений к соответствующим ресурсным емкостям окружающей среды.

В данной работе рассматриваются свойства уравнений адаптивных моделей экосистем первого и второго порядка, определяющие сходимость алгоритмов численного решения этих уравнений. Основное внимание направлено на адаптивные модели экосистем второго порядка, в которых закон сохранения баланса влияний учитывает ресурсные емкости морской среды. Как пример локальной адаптации переменных экосистемы к данным о переносе и диффузии рассмотрена адаптивная морская экосистема, содержащая в качестве компонентов фито- и зоопланктон, нитраты, аммоний и детрит, которые находятся под имитированным внешним воздействием температуры моря, концентрации хлорофилла a , течений и диффузии.

Сохранение баланса влияний при численном решении уравнений адаптивных моделей

Рассмотрим морскую экосистему, которая объединяет процессы реакций, развивающиеся в некотором объеме морской среды и осредненные по нему. Для локальной адаптации химико-биологических процессов к переносу и диффузии, рассчитываемым по гидродинамической модели, примем, что рассматриваемый объем совпадает с объемом ячейки пространственной сетки численной модели динамики морской среды. Адаптивные модели экосистем отличаются структурой правых частей уравнений, в каждом из которых установлен баланс положительных и отрицательных обратных связей, заставляющий переменные модели подстраиваться под внутрисистемные причинно-следственные зависимости между процессами, а также под внешние воздействия на экосистему со стороны окружающей среды. Баланс обратных связей обеспечивает непрерывную адаптацию переменных экосистемы к сумме влияющих на них внутрисистемных и внешних факторов (реакции, перенос, диффузия, управление), когда разность между значением переменной и ожидаемым результатом адаптации автоматически устремляется к нулю или к известной константе.

Система уравнений адаптивной модели морской экосистемы с отрицательными обратными связями первого порядка имеет вид

$$\frac{du_i}{dt} = -r_i[u_i - (C_i + A_i)] = r_i(C_i + A_i) - r_i u_i, \quad (1)$$

где $\{u_i\}$ – множество переменных, представляющих собой реакции в экосистеме; r_i – удельные скорости изменения переменных u_i ; C_i – средние значения переменных; A_i – алгебраические суммы внутрисистемных и внешних влияний, к которым в процессе реакций происходит адаптация переменных.

Из уравнений (1) следует, что переменные экосистемы принимают значения $u_i^* = C_i + A_i$. С учетом положительной определенности переменных отрицательные значения влияний A_i не должны превышать C_i . Однако положительные влияния могут быть сколь угодно большими, что влечет за собой соответствующий рост переменных.

Для графического подтверждения этого факта рассмотрим одно из уравнений системы (1) и запишем его в конечных разностях по схеме Эйлера:

$$u_{k+1} = u_k + r\Delta t[(C + A) - u_k] = u_k(1 - r\Delta t) + r\Delta t(C + A). \quad (2)$$

Анализ уравнения позволяет определить условия сходимости решений к стационарному состоянию. Для этого построим графики левой и правой частей уравнения (2) при различных значениях произведений $r\Delta t$. Заметим, что две точки, через которые проходит линия $u_{k+1} = u_{k+1}(u_k)$, находятся непосредственно из уравнения (2): если $u_k = 0$, то $u_{k+1} = r\Delta t(C + A) > 0$; если $u_{k+1} = 0$, то $u_k = -\frac{r\Delta t(C + A)}{(1 - r\Delta t)} < 0$. При $r\Delta t < 1$ и отсутствии внешних влияний, т. е. когда

$A = 0$, линии графиков левой и правой частей уравнения (2) пересекаются в точке $u^* = C$, дающей стационарное решение, как показано на рис. 1, а.

Нетрудно видеть, что это решение является единственным и достигается при задании любых начальных условий u_0 . Сходимость в точку пересечения графиков от произвольного начального условия показана на рис. 1, б. При задании алгебраической суммы внутрисистемных и внешних влияний из диапазона значений $[0 \leq A_k < \infty)$ график u_{k+1} смещается вдоль вертикальной оси, не меняя угла наклона по отношению к линии u_k , который определяется значением $r\Delta t$. Поэтому область устойчивых неотрицательных решений уравнения представляет собой полусегмент $[0, \infty)$. При $r\Delta t = 1$ устойчивое решение достигается уже при первой итерации.

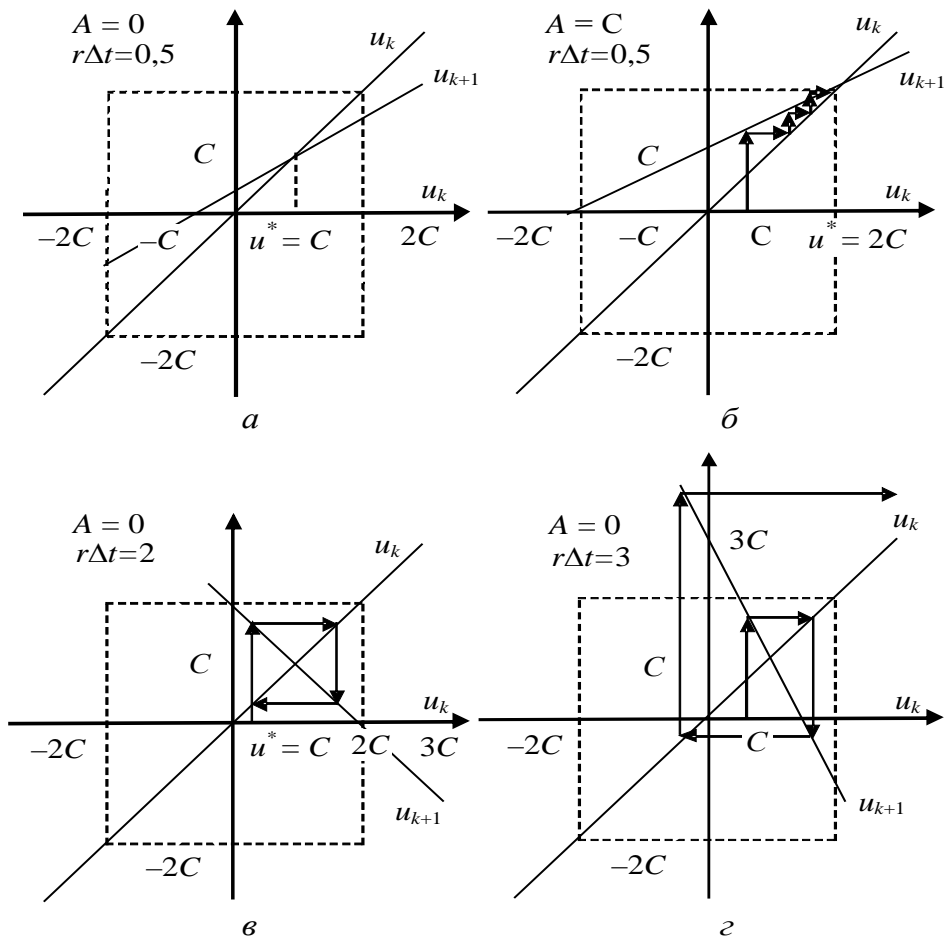
Однако условия устойчивой сходимости нарушаются, когда $r\Delta t > 2$. Графически переход в область неустойчивых решений характеризует величина угла между линиями $u_{k+1} = u_{k+1}(u_k)$ и $u_{k+1} = u_k$. Устойчивость сохраняется, пока $r\Delta t < 2$ и этот угол не превышает $\pi/2$. При $r\Delta t = 2$ угол становится прямым, вокруг точки $u^* = 2C$ возникает предельный цикл и решение становится периодическим (рис. 1, в). При $r\Delta t > 2$ наблюдается расхождение итерационного алгоритма (2), т. е. решения уравнения (1) отсутствуют (рис. 1, г).

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы в отношении адаптивных моделей экосистем первого порядка:

1. Сумма влияний A_i в уравнении (2) экосистемы (1), формирующая значения переменных u_i в процессе итераций, не нарушает устойчивость численного решения уравнения адаптивной модели при условии $r\Delta t < 2$.

2. Устойчивые решения могут принимать любые неотрицательные значения из полусегмента $[0, \infty)$. Поэтому адаптивные модели экосистем первого порядка обладают быстрой сходимостью итерационных процессов, но они не

учитывают ресурсные ограничения процессов развития, которые вытекают из свойств окружающей среды.



Р и с. 1. Существование решений и сходимость итерационного алгоритма решения адаптивно-уравнения с отрицательной обратной связью первого порядка

Для учета ресурсных возможностей окружающей среды в моделях экосистем необходимо использовать отрицательные обратные связи второго порядка. Рассмотрим их на примере моделей, построенных *ABC*-методом [5]. В этом методе используются уравнения следующего вида, в которых функции источников и стоков контролируют базовые функции влияния $F^{(-)}(u_i, u_j, A_i)$ и $F^{(+)}(u_i, u_j, A_i)$:

$$\frac{du_i}{dt} = r_i u_i [F_i^{(-)}(u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j - A_i) - F_i^{(+)}(u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j - A_i)], \quad (3)$$

где $F_i^{(-)}(u_i, u_j, A_i)$ – монотонно убывающая, $F_i^{(+)}(u_i, u_j, A_i)$ – монотонно растущая базовые функции влияний по основной переменной u_i ; $\sum_{j \neq i} a_{ij}u_j + A_i$ –

алгебраические суммы внутрисистемных и внешних влияний, формирующие концентрацию u_i . Базовые функции управляют ростом и убыванием переменных, направляя их к устойчивым стационарным значениям. Математически закон сохранения баланса влияний, сформулированный во введении, означает выполнение следующих условий:

$$F_i^{(-)}(u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij}u_j - A_i) + F_i^{(+)}(u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij}u_j - A_i) = 2C_i, \quad (4)$$

где C_i – стационарное значение концентрации u_i в отсутствие внешних влияний. Используя формулы (3) и (4), находим модульную систему уравнений адаптивной модели второго порядка *ABC*-метода:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i [C_i - F_i^{(+)}(u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij}u_j - A_i)]. \quad (5)$$

Если в качестве базовых функций выбрать наиболее простые линейные зависимости

$$F_i^{(+)}(u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij}u_j - A_i) = u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij}u_j - A_i, \quad (6)$$

адаптивная модель экосистемы становится системой уравнений логистического типа

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i [C_i - (u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij}u_j - A_i)]. \quad (7)$$

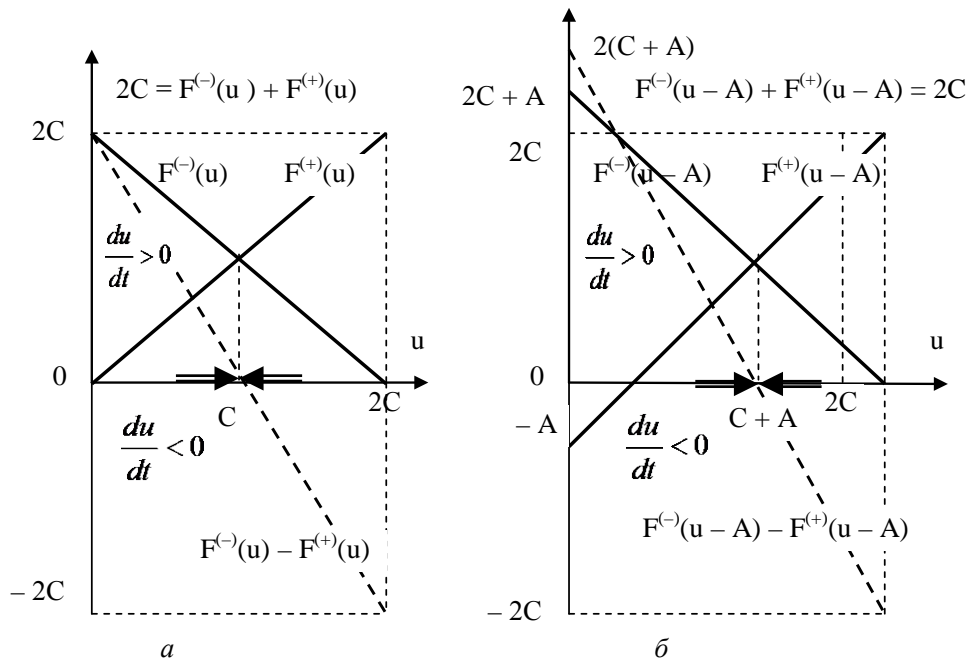
Из (7) следует, что в процессе адаптации суммарные значения переменных экосистемы и влияющих на них факторов сохраняются, они равны ресурсным емкостям окружающей среды по отношению к этим переменным:

$$u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij}u_j - A_i = C_i. \quad (8)$$

Таким образом, стационарное решение модульного уравнения *ABC*-метода (7) представляет собой математическую формулировку закона сохранения баланса влияний: алгебраическая сумма переменной экосистемы и влияющих на нее функций равна величине ресурсной емкости окружающей среды. Это означает, что в процессе адаптации переменные экосистемы принимают такие значения, которые дополняют алгебраические суммы влияний до значений ресурсных емкостей C_i . Под действием внутрисистемных и внешних влияний переменные экосистемы отклоняются от своих средних

(стационарных) значений C_i , образуя динамический баланс влияний. В этом можно убедиться, если представить процесс адаптации графически.

Для графической интерпретации закона рассмотрим снова одно из уравнений системы (7) и обозначим в нем общую алгебраическую сумму влияний как A . На рис. 2, а показаны графики базовых функций в отсутствие влияний, т. е. когда $A = 0$. Диапазон значений переменной u составляет сегмент $[0, 2C]$, а ее стационарное значение при отсутствии влияний равно ресурсной емкости C . Если допустить отклонение величины u от C , например вправо (в сторону увеличения), то разность значений базовых функций влияния, показанная штриховой линией, станет отрицательной. Эта разность определяет в уравнении (3) знак производной, а следовательно, и тенденцию изменения u , в данном случае – в сторону ее уменьшения. Поэтому u снова примет значение C .



Р и с. 2. Управление ростом и убыванием переменных в уравнении адаптивной модели второго порядка: при отклонении переменной от суммы $C + A$ возникает тенденция, возвращающая ее к этому значению

При наличии положительных влияний, т. е. когда $u - A > C$, точка пересечения графиков базовых функций, соответствующая новому балансу влияний, смещается вправо и переменная принимает значение $u = A + C$ (рис. 2, б). При отрицательных влияниях, когда $u + A < C$, переменная принимает значение $u = C - A$. Чем больше отклонение переменной системы от стационарного состояния, тем сильнее тенденция, возвращающая ее к этому состоянию.

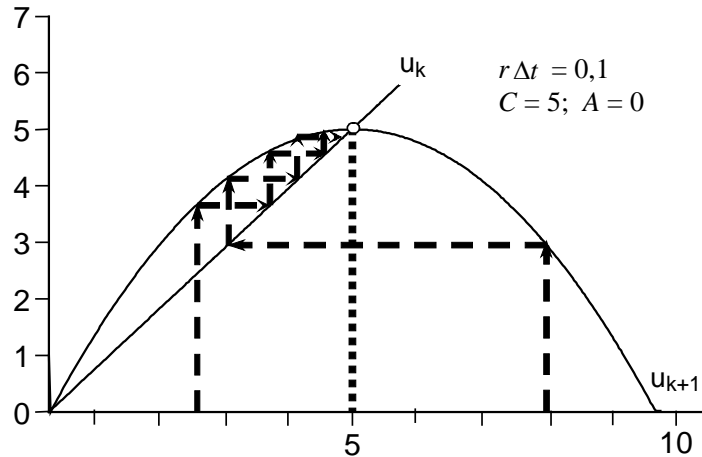
Представленные в конечных разностях по методу Эйлера уравнения (7) принимают вид

$$u_i^{k+1} = u_i^k \{1 + 2r\Delta t [C_i - (u_i^k - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij}u_j^k - A_i^k)]\}. \quad (9)$$

На рис. 3 приведены графики левой и правой частей разностного уравнения системы уравнений (9). Запишем уравнение системы (9) в упрощенном виде:

$$u^{k+1} = u^k \{1 + 2r\Delta t [C - (u^k - A^k)]\}, \quad (10)$$

где через A снова обозначена общая сумма влияний. В отличие от уравнения (2), используемого в моделях первого порядка, график правой части уравнения второго порядка (10) представляет собой параболу.



Р и с. 3. Сходимость вычислительного алгоритма уравнения адаптивной модели второго порядка при отсутствии внешних влияний

Как следует из рис. 3, в области положительных значений переменной u существует единственное решение этого уравнения. Быстрая сходимость итераций к единственному аттрактору от различных начальных условий свидетельствует об устойчивости алгоритма нахождения решения.

Сходимость решений системы из двух логистических дифференциальных уравнений к устойчивым аттракторам была изучена методами качественной теории дифференциальных уравнений [12] во многих исследованиях [3, 4]. При этом, как следует из условия (8), алгебраическая сумма влияний, отклоняющая переменные u_i от их стационарных состояний C_i , не должна превышать по модулю C_i :

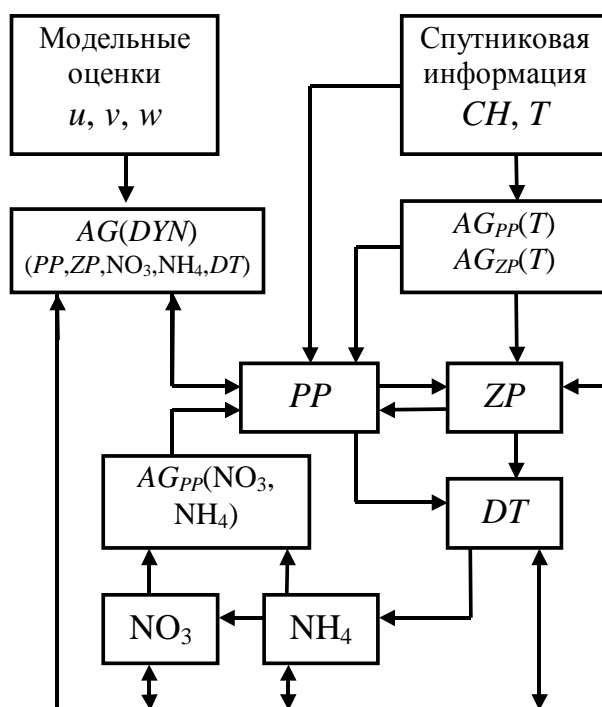
$$\left| \sum_{j \neq i} a_{ij}u_j + A_i \right| \leq C_i, \quad (11)$$

так как в противном случае закон сохранения баланса влияний будет нарушен. Это накладывает ограничения на выбор коэффициентов влияний в усло-

вии (11), соответствующих значениям ресурсных емкостей экосистемы морской среды.

Пример адаптивной модели морской экосистемы для локального учета динамики морской среды

Действие закона сохранения баланса влияний проиллюстрируем на примере адаптивной модели морской экосистемы, построенной *ABC*-методом (7). В качестве внутрисистемных реакций в этой модели рассмотрим взаимодействие 5 взаимосвязанных процессов u_i – изменений во времени концентраций фито- и зоопланктона, нитратов, аммония и детрита. В качестве внешних влияний на экосистему будем использовать годовой ход температуры моря, перенос и диффузию субстанций, обусловленные динамическими процессами в морской среде. Задачей моделирования будем считать построение сценариев моделируемых процессов в некоторой точке верхнего слоя моря, совпадающей с одним из узлов квадратной расчетной сетки численной модели динамики морской среды, в которой имеются расчетные значения составляющих скорости течений и плотности, а также заданы значения коэффициентов турбулентного обмена. Примем, что процессы находятся под влиянием сезонного хода температуры и изменений концентрации хлорофилла a , измеряемых со спутника. Будем считать также, что имеются данные о концентрации хлорофилла a в соседних узлах сетки, расположенных на удалении h от рассматриваемой точки.



Р и с. 4. Концептуальная модель внутрисистемных и внешних влияний

Схема внутрисистемных влияний – концептуальная модель экосистемы – приведена на рис. 4, где CH – хлорофилл a , T – поверхностная температура моря, PP – фитопланктон, ZP – зоопланктон, NO_3 – нитраты, NH_4 – аммоний, DT – детрит. Внешние влияния динамики морской среды (перенос и диффузия) на переменные экосистемы u_i обозначим как оператор (агент управления) $AG_{u_i/DYN}(DYN)$, влияния поверхностной температуры – как оператор $AG_{u_i/T}(T)$. Для концентраций фито- и зоопланктона определим наиболее благоприятные значения температуры морской среды, обозначив их T_{PP}^* и T_{ZP}^* соответственно. Так как фитопланктон нуждается одновременно в нитратах и аммонии, введем агент ресурсного лимитирования $AG_{PP}(NO_3, NH_4)$, который должен отслеживать, какой из этих двух ресурсов в данный момент времени имеется в минимальном количестве.

Используя с учетом введенных обозначений выражения (7), построим следующую систему уравнений адаптивной модели экосистемы:

$$\begin{aligned} \frac{dPP}{dt} &= 2r_{PP}PP\{C_{PP} - [PP - a_{PP/CH}CH + a_{PP/ZP}ZP - AG_{PP/DYN}(DYN) - \\ &- AG_{PP}(NO_3, NH_4) - AG_{PP/T}(T)]\}, \\ \frac{dZP}{dt} &= 2r_{ZP}ZP\{C_{ZP} - [ZP - a_{ZP/PP}PP - AG_{PP/DYN}(DYN) - AG_{ZP/T}(T)]\}, \\ \frac{dNO_3}{dt} &= 2r_{NO_3}NO_3\{C_{NO_3} - [NO_3 - a_{NO_3/NH_4}NH_4 - AG_{NO_3/DYN}(DYN)]\}, \\ \frac{dNH_4}{dt} &= 2r_{NH_4}NH_4\{C_{NH_4} - [NH_4 - a_{NH_4/DT}DT - AG_{NH_4/DYN}(DYN)]\}, \\ \frac{dDT}{dt} &= 2r_{DT}DT\{C_{DT} - [DT - a_{DT/PP}PP - a_{DT/ZP}ZP - AG_{DT/DYN}(DYN)]\}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} AG_{PP}(NO_3, NH_4) &= IF[\arg \min(NO_3, NH_4) = \\ &= NO_3; a_{PP/NO_3}NO_3; a_{PP/NH_4}NH_4], \end{aligned} \quad (13)$$

$$AG_{\varphi_i/DYN}(DYN) = a_{iHM}(u \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi_i}{\partial y}) + a_{iVM}w \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} + a_{iHD}D_H(\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial y^2}), \quad (14)$$

$$\varphi_i = (PP, ZP, NO_3, NH_4, DT),$$

$$\begin{aligned} AG_{PP/T}(T) &= a_{PP/T} \exp[-\alpha_{PP/T}(T - T_{PP}^*)^2], \\ AG_{ZP/T}(T) &= a_{ZP/T} \exp[-\alpha_{ZP/T}(T - T_{ZP}^*)^2]. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, адаптивная модель морской экосистемы, построенная ABC-методом, представляет собой модульные обыкновенные дифференциальные уравнения, правые части которых – логистические функции – обеспе-

чивают одновременную адаптацию всех переменных к суммам приложенных к ним влияний. Закон сохранения баланса влияний в форме (8) проявляется в стремлении к нулю выражений в фигурных скобках в правых частях каждого уравнения в процессе адаптации.

В данной работе принято предположение, что функции влияния, представляющие собой перенос и диффузию, могут быть оценены по формуле (14), поскольку известны из расчетов по гидродинамической модели (в нашем случае имитированы) три компоненты скорости, плотность и коэффициенты турбулентного обмена, а также градиенты и вторые производные моделируемых параметров экосистемы. Предполагается, что при расчетах по численной модели морской среды использованы соответствующие краевые условия. Эти условия должны учитывать динамику верхнего слоя моря в точке, выбранной для локальной адаптации переменных экосистемы к внешним влияниям.

Результаты локальной адаптации переменных экосистемы к динамике морской среды

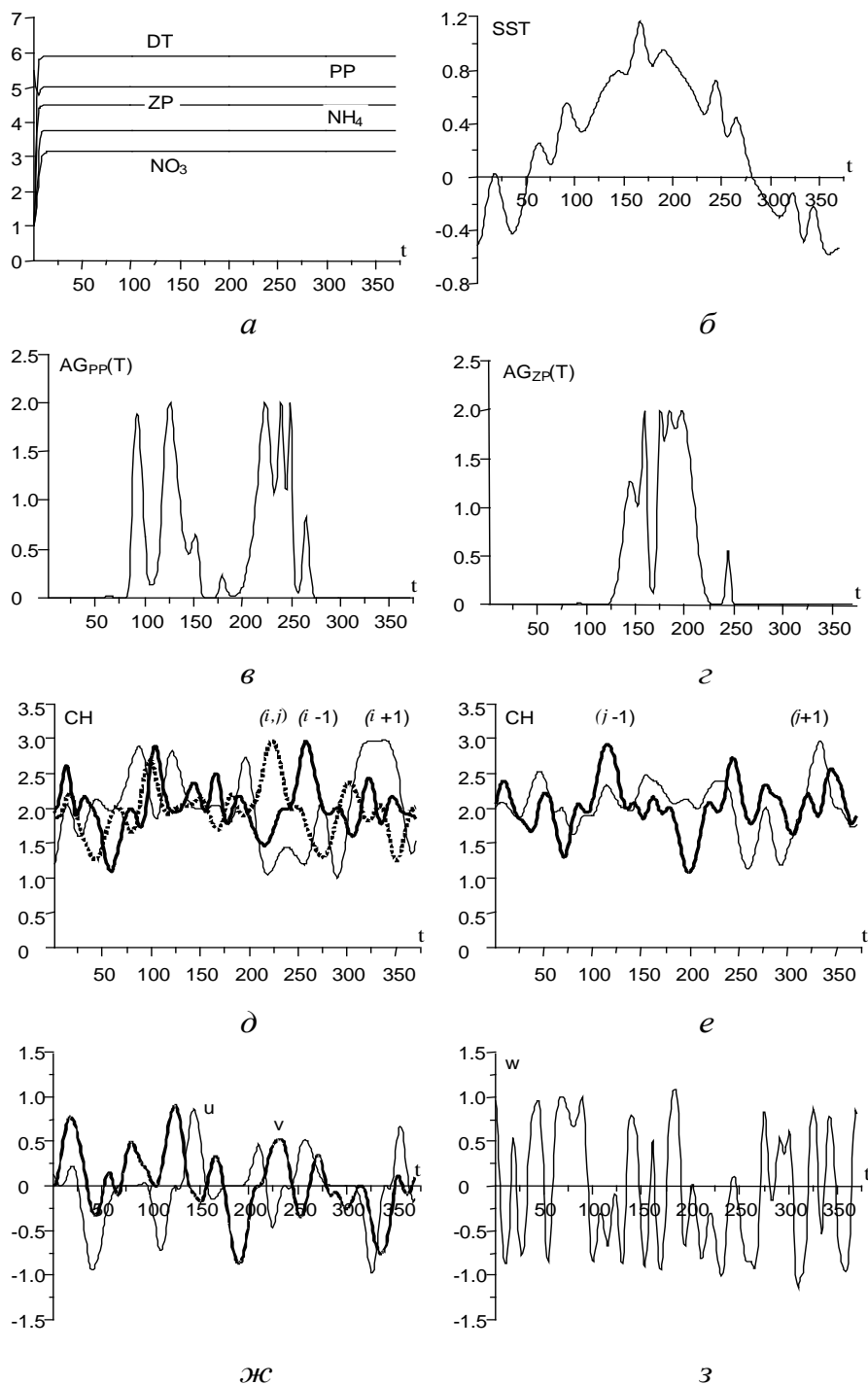
Целью экспериментов была проверка локальной адаптации переменных модели второго порядка (12) – (15) друг к другу и к внешним влияниям. Расчеты временных сценариев процессов проводились в отдельном узле горизонтальной квадратной сетки с шагом h . Предполагалось, что заданы ресурсные емкости морской среды по каждой из переменных модели, в качестве которых могут быть использованы известные из наблюдений средние многолетние значения этих переменных для данного сезона и выбранного района моря. Для удобства анализа переменные экосистемы были представлены в безразмерной форме путем нормировки на удвоенные средние многолетние значения и приведены к общему интервалу изменчивости (0, 10), как показано на рис. 5 и 6.

Стационарное состояние экосистемы при отсутствии внешних влияний определяется выбором постоянных коэффициентов влияний a_{ij} в уравнениях (12). Поскольку эти коэффициенты учитывают характер установившихся реакций (потоков) в системе, существует ряд методов определения коэффициентов в *ABC*-моделях морских экосистем, которые основаны на экспертных оценках [6, 7] или на имеющихся данных наблюдений [8]. В частности, если в качестве уравнения реакции, формирующей значения переменной u_i в экосистеме, принимается однородная функция других переменных

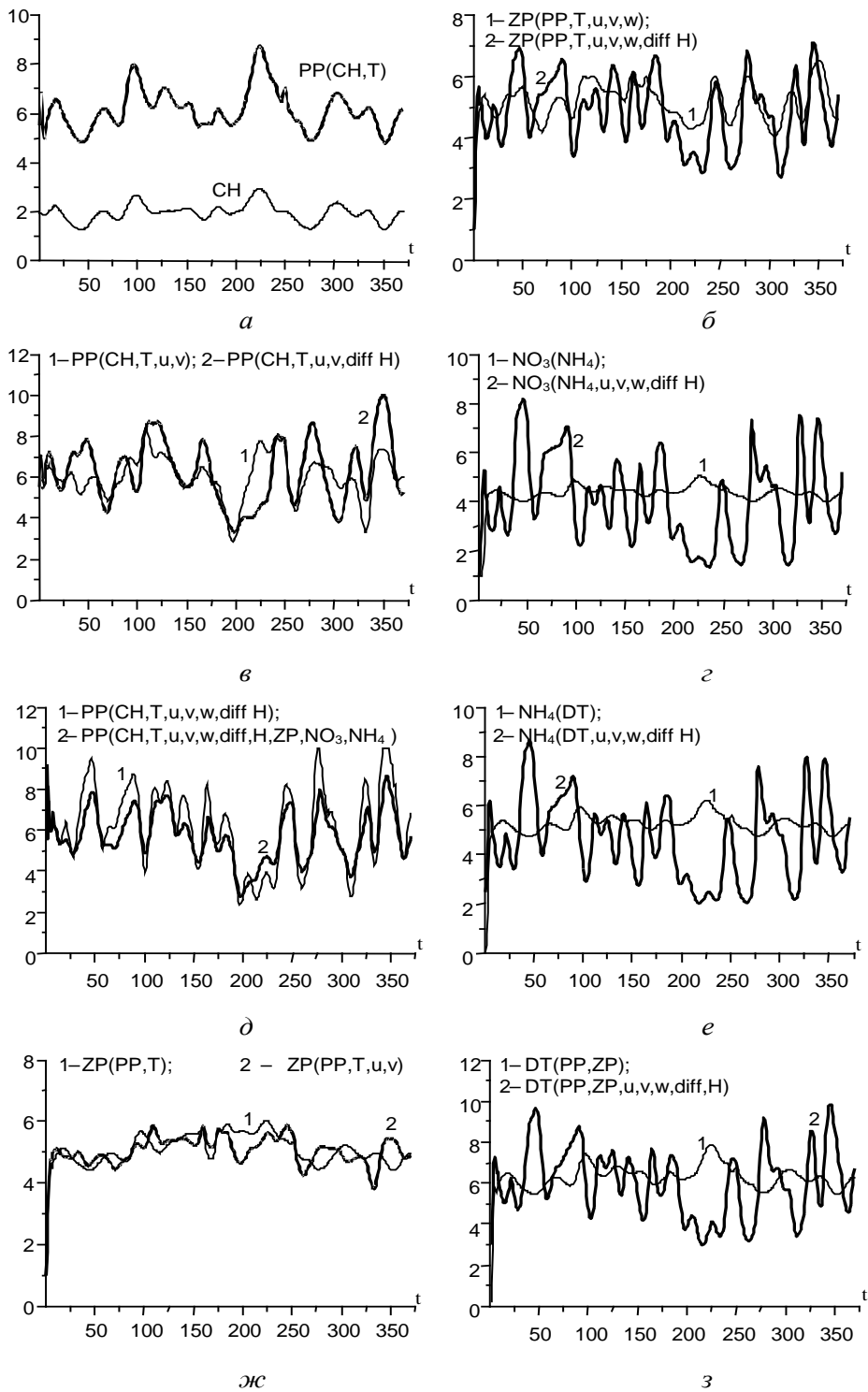
$$u_i = \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j,$$

то по теореме Эйлера об однородных функциях коэффициенты влияний a_{ij} выражаются через частные производные переменных по отношению друг к другу:

$$u_i = \sum_{j \neq i} \frac{\partial u_i}{\partial u_j} u_j. \quad (16)$$



Р и с. 5. Имитированные исходные данные для проведения вычислительного эксперимента, нормированные на $2C_i$: *a* – стационарное состояние экосистемы; *б* – годовой ход температуры моря в точке (i, j) ; *в* – функция агента $AG_{PP}(T)$; *г* – функция агента $AG_{ZP}(T)$; *д* – изменчивость концентраций хлорофилла *a* в точках $(i + 1)$, (i, j) , $(i - 1)$; *е* – то же в точках $(j + 1)$ и $(j - 1)$; *ж* – изменчивость горизонтальной скорости течений в точке (i, j) ; *з* – изменчивость вертикальной скорости в точке (i, j)



Р и с. 6. Результаты локальной адаптации процессов реакций в экосистеме к внутрисистемным и внешним влияниям. Влияющие факторы перечислены в аргументах функций, символом *diff H* обозначено влияние горизонтальной диффузии

Для проведения имитационных экспериментов коэффициенты влияния выбраны из диапазона значений 0,1 – 0,4 с тем условием, чтобы сценарии стационарного состояния экосистемы были наглядно представлены в общих координатах. Эти сценарии показаны на рис. 5, а. Воздействие внешних факторов на экосистему должно привести к отклонениям значений процессов от выбранных стационарных состояний в соответствии с законом адаптивного баланса влияний.

На рис. 5, б приведен использованный в расчетах годовой ход температуры верхнего слоя моря. С учетом выбранной зависимости концентраций фито- и зоопланктона (15) от температуры морской поверхности функции влияния температуры, использованные в соответствующих уравнениях модели, приведены на рис. 5, в, г. Как видно из рис. 5, в, при выборе наиболее благоприятной для фитопланктона температуры $T_{PP}^* = 12^\circ\text{C}$ агент управления $AG_{PP/T}(T)$ воспроизводит два максимума его концентрации: в апреле – мае и в июле – августе, что характерно, например, для условий северо-западного шельфа Черного моря. Для зоопланктона наиболее благоприятной считалась температура $T_{ZP}^* = 18^\circ\text{C}$. Агент управления $AG_{ZP/T}(T)$ воспроизвел для него один максимум, приходящийся на май – июль, который показан на рис. 5, г. В качестве еще одного внешнего фактора, формирующего изменчивость концентрации фитопланктона, были приняты наблюдения концентраций хлорофилла a в 5 узлах рассматриваемой сеточной области. Уравнения модели (12) – (15) решались численно в узле квадратной сетки, который обозначен как (i, j) .

На рис. 5, д, е приведены сценарии концентраций CH : для центрального узла (i, j) ; для узла $(i - 1)$, расположенного к западу от центрального; для узла $(i + 1)$ – к востоку от центрального; для узла $(j - 1)$ – к югу от центрального; для узла $(j + 1)$ – к северу от центрального. В центральном узле (i, j) были имитированы также сценарии трех компонент скорости течений u , v , w (рис. 5, ж, з).

Имитированные данные наблюдений позволили построить сценарии, изображенные на рис. 6. Для того чтобы проследить за адаптацией сценариев фитопланктона к различным влияющим факторам, первоначально в уравнении для PP было сохранено только влияние CH и поверхностной температуры T . Результат адаптации приведен на рис. 6, а. Сценарий PP имел слабо выраженные сезонные максимумы. Затем к влияющим факторам была добавлена адвекция, которая несколько изменила этот сценарий (кривая 1 на рис. 6, в). Еще большее изменение вызвало влияние горизонтальной диффузии фитопланктона (кривая 2 на рис. 6, в). Как известно, состояние экосистемы верхнего слоя моря зависит от вертикального переноса и диффузии. Для того чтобы учесть эти эффекты, необходимы данные о значениях переменных экосистемы по крайней мере на двух горизонтах в окрестности узла (i, j) . В проведенных экспериментах приняты упрощающие предположения: считалось, что вертикальная диффузия мала и ею можно пренебречь. Кроме того, вертикальные градиенты переменных экосистемы были заданы постоянными.

Построенная с учетом всех внешних влияний, включая и вертикальный перенос, кривая 1 на рис. 6, д демонстрирует дальнейшее увеличение измен-

чивости концентрации PP . Кривая 2 на этом же рисунке дает представление о финальном сценарии концентрации фитопланктона, когда к внешним влияниям были добавлены внутрисистемные реакции, несколько сгладившие суммарный эффект внешних влияний.

В той же последовательности было проанализировано влияние внешних и внутрисистемных факторов на формирование сценария развития концентрации зоопланктона. Реакция этого сценария на концентрацию фитопланктона и температуру моря показана на рис. 6, *ж* (кривая 1). Температурные максимумы агентов управления (15), изображенные на рис. 5, *в*, *г*, сглажены на этом сценарии. Некоторый вклад в изменчивость зоопланктона внес учет адвекции (кривая 2 на рис. 6, *ж*) и вертикального переноса (кривая 1 на рис. 6, *б*). Однако наиболее сильным оказалось влияние горизонтальной диффузии (кривая 2 на рис. 6, *б*). Это объясняется выбором относительно больших коэффициентов $a_{\phi HD}$ в формуле (14), которые обеспечивали значительный вклад горизонтальной диффузии в формирование концентраций компонентов экосистемы.

Аналогичное явление наблюдалось и при формировании концентраций нитратов NO_3 , аммония NH_4 и детрита DT . Графики сценариев этих реакций приведены на рис. 6, *з*, *е*, *з*. Кривые 1 на этих рисунках дают представление об адаптации переменных друг к другу под влияниями внутрисистемных связей, кривые 2 – под влиянием динамики морской среды. Сравнивая между собой сценарии, полученные после учета всех влияющих факторов, следует отметить, что в проведенном эксперименте внешние влияния на экосистему преобладали над внутрисистемными. Поэтому все сценарии, за исключением сценария развития фитопланктона, были сформированы в основном динамическими процессами – адвекцией и горизонтальной диффузией. Сценарий развития фитопланктона формировался под непосредственным воздействием имитированных наблюдений хлорофилла a . Кроме того, агент управления $AG_{PP}(NO_3, NH_4)$ выполнял операции ресурсного лимитирования фитопланктона по нитратам и аммонiu. Поэтому сценарий развития фитопланктона заметно отличается от остальных.

Заключение

Адаптивные модели морских экосистем отражают в явном виде основное свойство морских организмов – их стремление приспособиться к изменяющимся условиям окружающей среды. Механизмы отрицательных обратных связей, балансирующие реакции в экосистемах, заложены в структурах уравнений адаптивных моделей как первого, так и второго порядка. Однако по сравнению с моделями первого порядка, получившими широкое распространение в форме уравнений метода системной динамики [10], модели второго порядка, и в частности уравнения метода адаптивного баланса влияний (ABC -метод [5]), дополнительно учитывают жизненно важные для морских организмов ресурсные возможности морской среды. В моделях ABC -метода выполняется закон адаптивного баланса влияний, согласно которому в процессе адаптации переменные экосистемы принимают такие величины, которые до-

полняют алгебраические суммы влияний до значений соответствующих ресурсных емкостей морской среды.

Проведенный анализ численных уравнений адаптивных моделей экосистем показал быструю сходимость итерационных алгоритмов к устойчивым решениям, что в свою очередь обеспечивает режим динамического баланса переменных моделей и приложенных к ним влияющих факторов. Этот вывод был подтвержден имитационным экспериментом с адаптивной моделью морской экосистемы, содержащей в качестве компонентов фито- и зоопланктон, нитраты, аммоний и детрит. Из результатов эксперимента следует, что в адаптивных моделях экосистем целесообразно учитывать внешние воздействия таким же образом, как и внутрисистемные влияния. Это означает, что функции, учитывающие влияние переноса и диффузии водных масс, равно как и других внешних факторов, целесообразно включать в логистические структуры уравнений адаптивных моделей экосистем наряду с функциями, представляющими собой реакции внутри системы. Поскольку внешние влияния изменяют ресурсные возможности прохождения внутрисистемных реакций, закон сохранения баланса влияний обеспечивает локальную подстройку сценариев экосистемы к значениям ресурсных емкостей морской среды.

Проведенные исследования показали, что двухэтапный метод моделирования процессов в морских экосистемах с применением адаптивных моделей для локальной подстройки реакций в экосистеме к внешнему влиянию переноса и диффузии веществ может быть использован как один из возможных методов для описания сложных процессов взаимодействия в моделях морских экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fasham M.J.R., Ducklow H.W., McKelvie S.M.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer // *J. Mar. Res.* – 1990. – 48. – P. 591 – 639.
2. *Oguz T.* Nonlinear response of Black Sea pelagic fish stocks to over-exploitation // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* – 2007. – 345. – P. 211 – 228.
3. *Murray J.D.* *Mathematical Biology II: Spatial Models and Biomedical Applications.* – Springer, 2003. – 830 p.
4. *Свирижев Ю.М., Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
5. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
6. *Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е.* Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – 258 с.
7. *Ivanov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E.* *Coastal Zone Resources Management.* – Kyiv: Akadempriodika, 2012. – 304 p.
8. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.* Ассимиляция данных наблюдений и адаптивный прогноз природных процессов // *Морской гидрофизический журнал.* – 2009. – № 5. – С. 47 – 70.
9. *Тимченко И.Е., Иващенко И.К., Игумнова Е.М., Лазарчук И.П.* Оценка пространственных параметров морской экосистемы методом адаптивного баланса влияний // Там же. – 2011. – № 5. – С. 50 – 65.
10. *Forrester J.W.* *Principles of Systems.* – Cambridge MA: Productivity Press, 1968. – 197 p.

11. *Sterman J.D.* Business dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World. – Irwin MacGraw-Hill, 2000. – 982 p.
12. *Эльсгольц Л.Э.* Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1984. – 420 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 14.05.13
После доработки 24.12.13

АНОТАЦІЯ Розглянуто адаптивні моделі морських екосистем, в яких стабілізуючі зворотні зв'язки забезпечують пристосування модельованих процесів до стану динамічного балансу із зовнішніми впливами на екосистему. Показано, що в подібних моделях закон збереження балансу впливів дозволяє адаптувати змінні екосистеми до оцінок ресурсних можливостей морського середовища. Досліджено баланс впливів при чисельному рішенні рівнянь адаптивних моделей. Запропоновано використовувати подібні моделі для локальної адаптації хіміко-біологічних процесів до даних про перенесення та дифузії речовин, які розраховуються за чисельними моделями динаміки моря. Розглянуто приклад локальної адаптації сценаріїв інтегральної моделі морської екосистеми до імітованих даних про температуру морської поверхні, концентрації хлорофілу *a*, перенесення та дифузії у верхньому шарі моря.

Ключові слова: адаптивні моделі, закон збереження балансу впливів, ресурсна ємність.

ABSTRACT Adaptive models of marine ecosystems in which stabilizing feedbacks provide adaptation of the modeled processes to the state of dynamic balance with external effects on the ecosystem are considered. It is shown that in such models the law of effects' balance conservation permits to adapt the ecosystem variables to the estimates of the marine environment resource capacity of the marine environment. The balance of effects is studied in numerical solution of adaptive models' equations. Such models are proposed to be used for local adaptation of chemical and biological processes to substance transport and diffusion simulated by numerical models of the sea dynamics. The example of local adaptation of the scenarios of the marine ecosystem integral model to the simulated data on sea surface temperature, chlorophyll *a* concentrations, and transport and diffusion in the sea upper layer is considered.

Keywords: adaptive models, law of effects' balance conservation, current capacity.