

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

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

**ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
БИОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРЯ
НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ
И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Предложен метод оценки коэффициентов влияния в адаптивной модели экосистемы верхнего слоя моря, основанный на данных о средних скоростях биохимических взаимодействий в морской среде. На примере простой схемы причинно-следственных связей между концентрациями фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и кислорода показана применимость полученных формул для расчета нормированных коэффициентов влияния, которые обеспечивают устойчивое решение уравнений адаптивной модели экосистемы. Модель содержала агенты ресурсного лимитирования концентраций зоопланктона и кислорода, а также агенты, которые контролировали влияние температуры верхнего слоя моря на изменение концентраций зоопланктона и биоресурса. Метод применен для построения пространственных распределений биохимических параметров района западной части Черного моря по спутниковым наблюдениям температуры моря и концентрации хлорофилла *a*. Приведены распределения концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и кислорода для этого района, дающие представление о пространственно-временной изменчивости этих полей. Показано, что совместное использование спутниковых наблюдений и архивных данных о средних значениях моделируемых процессов позволяют применять адаптивные модели морских экосистем для оценки пространственных распределений параметров экосистемы верхнего слоя моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *метод адаптивного баланса влияний, нормированные коэффициенты влияния, распределения биохимических полей*

Введение. Исследование биохимических полей верхнего слоя моря предполагает построение моделей для совместного описания биологических, гидрохимических, геофизических и гидрофизических процессов в морской среде. Существует различные подходы к созданию экосистем верхнего слоя моря, которые различаются между собой способами построения уравнений модели, объединяющей физические и биогеохимические процессы [1 – 3]. Одним из новых подходов к построению моделей морских экосистем является применение уравнений логистического типа, используемых в методе адаптивного баланса влияний. Метод был опубликован в монографии [4] и получил дальнейшее развитие в ряде последующих монографий и научных статей сотрудников отдела системного анализа Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины – МГИ РАН [3, 5]. В отличие от широко известного метода системной динамики (Форрестер, Медоузы и Сандерс, Стерман, Гилберт и Тройтч и др.) метод адаптивного баланса влияний оперирует с логистическими уравнениями модульного типа, которые имеют квадратичные стабилизирующие обратные связи между переменными модели и скоростями их изменения. Нами показано, что такие уравнения устойчиво сохраняют материальные балансы реакций превращения ресурсов экосистемы в ее продукты и обладают высокой чувствитель-

ностью к внешним управлениям [5]. Это позволяет применять в них нелинейные агенты управления, принимающие локальные решения [4, 5]. В подобных уравнениях сбалансированы обратные связи между переменными и скоростями их изменения, которые имеют место в процессе химико-биологических реакций взаимодействия компонентов экосистемы. По сравнению с традиционными подходами к описанию процессов в экосистемах адаптивный подход позволяет контролировать ресурсные возможности прохождения реакций взаимодействия процессов в морской среде.

Основная проблема моделирования экосистем заключается в параметризации причинно-следственных зависимостей между переменными модели: для этого приходится привлекать огромное количество эмпирических связей и коэффициентов, которые существенно усложняют уравнения модели и приводят к неизбежным погрешностям в результатах моделирования. Применение адаптивных моделей позволяет упростить эту проблему за счет использования в логистических уравнениях метода адаптивного баланса влияний коэффициентов влияний, оцениваемых по данным наблюдений.

Авторы разработали способы определения коэффициентов уравнений адаптивных моделей по данным наблюдений с использованием методов анализа иерархий Саати и фильтра Калмана [3 – 5]. В настоящей работе рассматривается еще один из возможных способов оценки коэффициентов влияний по архивным данным наблюдений, основанный на информации о средних многолетних значениях переменных экосистемы. Метод проиллюстрирован на примере оценки пространственных распределений концентрации фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и растворенного кислорода в верхнем слое акватории западной части Черного моря по данным спутниковых наблюдений.

Метод построения адаптивной модели экосистемы и алгоритм оценки нормированных коэффициентов влияний. Пусть для построения модели экосистемы, отвечающей поставленной цели моделирования, использовано множество взаимосвязанных процессов, представленных функциями $\{u_i\}$, принимающими значения из сегментов $0 \leq u_i \leq 2C_i$, где C_i – средние значения процессов. Процессы u_i оказывают внутрисистемные влияния друг на друга в соответствии с причинно-следственными связями, которые предполагаются известными. Эти связи формируют материальные балансы моделируемых субстанций и могут быть представлены соотношениями:

$$u_i = \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij} u_j + A_i, \quad (1)$$

где a_{ij} – коэффициенты внутрисистемных влияний, n – число процессов, A_i – внешние влияния, приложенные к экосистеме.

Будем считать, что существует стационарное состояние равновесия, в котором при отсутствии внешних влияний переменные модели экосистемы принимают свои средние значения C_i :

$$C_i = \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij} C_j. \quad (2)$$

Внешние влияния A_i вызывают отклонения переменных от этих средних значений, причем уравнения модели экосистемы должны сохранять динамические балансы масс моделируемых субстанций (1) и учитывать возможные пределы их изменчивости $0 \leq u_i \leq 2C_i$. Влияние выражает собой реак-

цию преобразования ресурса u_j в продукт u_i , в результате которого происходит приращение или уменьшение количества продукта на то число единиц, которое обеспечено имеющимся количеством ресурса и условиями прохождения реакции. В [3 – 5] показано, что система уравнений метода адаптивного баланса влияний (АВС-метода), построена таким образом, чтобы сохранялись динамические балансы масс моделируемых субстанций. С этой целью предложена следующая общая система уравнений:

$$\frac{du_i}{dt} = r_i u_i [F_i^- - F_i^+], \quad (3)$$

в которой r_i – удельные скорости изменения переменных, а F_i^- и F_i^+ – монотонно убывающий и монотонно растущий базовые функционалы от разности значений левых и правых частей динамических балансов (1). Функционалы связаны между собой дополнительными условиями: $F_i^- + F_i^+ = 2C_i$, которые балансируют обратные связи в уравнениях модели (3) с учетом ресурсного лимитирования внутрисистемных реакций $u_i \leq 2C_i$. Функционалы F_i^+ определены следующим образом:

$$F_i^+ = F_i^+(u_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} u_j - A_i) = u_i - \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} a_{ij} u_j - A_i. \quad (4)$$

Поэтому имеет место модульная система логистических уравнений адаптивной модели:

$$\frac{du_i}{dt} = 2u_i \left[C_i - \left(u_i - \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij} u_j - A_i \right) \right] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Материальные балансы внутрисистемных и внешних влияний сохраняются в форме приращений количества продуктов реакций по отношению к их средним значениям C_i

$$u_i = C_i + \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij} u_j + A_i \quad (6)$$

при условии, что внутрисистемные и внешние влияния не выводят переменные за пределы этой области:

$$\left| \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij} u_j \right| \leq C_i \quad (7)$$

$$u_i = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)]. \quad (8)$$

Основной проблемой практического использования адаптивных моделей морских экосистем является определение коэффициентов влияний a_{ij} по данным наблюдений. Рассматривая при отсутствии внешних влияний условия (1) как однородные функции, можно применить к ним теорему Эйлера [6], согласно которой коэффициенты влияний выражают собой скорости изменения продуктов реакций в экосистеме по образующим их ресурсам $\partial u_i / \partial u_j$:

$$\frac{du_i}{dt} = 2u_i \left[C_i - \left(u_i - \sum_{j=1, i \neq j}^{n-1} \frac{\partial u_i}{\partial u_j} u_j - A_i \right) \right] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

В силу условий (2) коэффициенты влияний характеризуют средние скорости изменения продуктов реакций u_i по отношению к ресурсам u_j . Поэтому для них можно получить следующие приближенные оценки:

$$a_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{u}_j} = \frac{\partial C_i}{\partial C_j} \approx \frac{C_i}{C_j}. \quad (10)$$

Однако при подобной аппроксимации коэффициентов необходимо исключить неустойчивость решений уравнений (9), которая может возникнуть, если будет нарушено условие (7). С этой целью должна быть выполнена нормировка оценок коэффициентов положительных a_{ij}^+ и отрицательных a_{ij}^- влияний:

$$a_{ij}^+ \leq \frac{C_i}{2mC_j} \quad (1 \leq j \leq m); \quad a_{ij}^- \leq \frac{C_i}{2(n-m)C_j} \quad (m+1 \leq j \leq n). \quad (11)$$

В общем случае коэффициенты влияний (10) должны быть нормированы на удвоенные суммы этих коэффициентов, имеющих одинаковые знаки. Тогда уравнения (9) принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} = & 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \frac{1}{2} \sum_{j=1, j \neq i}^m (C_j \sum_{j=1, j \neq i}^m C_j^{-1})^{-1} u_j + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{2} \sum_{j=m+1, j \neq i}^{n-m} (C_j \sum_{j=m+1, j \neq i}^{n-m} C_j^{-1})^{-1} u_j - A_i \right] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для того чтобы учесть ресурсное лимитирование процессов роста продукта, например, при одновременном использовании группы ресурсов $\{u_p\}$ ($s+1 \leq p \leq m$), в уравнениях (15) или (16) необходимо использовать логические операторы (агенты управления) [3, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} = & 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \frac{1}{2} \sum_{j=1, j \neq i}^s C_j \left(\sum_{j=1, j \neq i}^s C_j^{-1} \right)^{-1} u_j - \right. \right. \\ & \left. \left. - AG_i \arg \min(a_{is+1} u_{s+1}, \dots, a_{im} u_m) + \frac{1}{2} \sum_{j=m+1, j \neq i}^{n-m} C_j \left(\sum_{j=m+1, j \neq i}^{n-m} C_j^{-1} \right)^{-1} u_j - A_i \right] \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $AG_i \arg \min(a_{is+1} u_{s+1}, \dots, a_{im} u_m) = IF(a_{ip} u_p = M_p; a_{ip} u_p; 0)$,

$M_p = \min(a_{is+1} u_{s+1}, \dots, a_{im} u_m)$,

$$a_{ip} = (2C_p \sum_{p=s+1, j \neq i}^m C_p^{-1})^{-1}. \quad (14)$$

Если рассматривать временные сценарии переменных экосистемы в отдельной точке морской среды в дискретные моменты времени t_k , разделенные интервалами $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, уравнения АВС-модели экосистемы (4), при дополнительном условии $2\Delta t \cdot r_i \cdot C_i = 1$ представленные в конечных разностях, принимают вид:

$$u_i^{k+1} = 2u_i^k \left[1 - \frac{1}{2C_i} \left(u_i^k - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} u_j^k - A_i^k \right) \right]. \quad (15)$$

Предлагаемый метод построения адаптивных моделей морских экосистем позволяет ассимилировать данные наблюдений путем непосредственного включения их в соответствующие уравнения модели экосистемы.

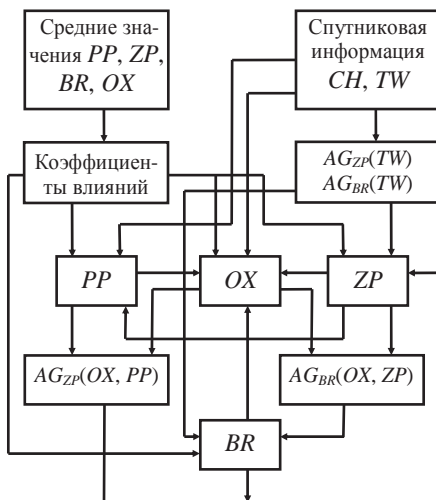
Уравнения адаптивной модели экосистемы верхнего слоя моря с нормированными коэффициентами влияний. Рассмотрим применение предложенного метода при построении адаптивной модели верхнего слоя

моря. Поскольку задача данного исследования заключалась в построении распределений параметров верхнего слоя моря по данным спутниковых наблюдений, была использована простейшая схема причинно-следственных связей в экосистеме, позволяющая распространить на них влияние спутниковых наблюдений полей температуры морской поверхности и концентрации хлорофилла a . В качестве компонентов u_i и u_j соотношений (1) использованы концентрации фитопланктона PP , зоопланктона ZP , растворенного кислорода OX и биоресурса BR .

В рамках данной модели BR – интегральный индекс, характеризующий концентрацию всех живых объектов экосистемы, потребляющих фито-, зоопланктон и кислород. Индекс BR не несет в себе информацию о конкретных объектах, лежащих выше зоопланктона в пищевой цепи, так как такая задача не решается в рамках используемой в статье упрощенной модели экосистемы. Этот индекс введен в модель экосистемы с целью оценить влияние распределений хлорофилла a и поверхностной температуры моря че-

рез концентрации фито- и зоопланктона на следующий интегральный трофический уровень экосистемы.

В модели экосистемы присутствовали агенты ресурсного лимитирования концентраций гидробионтов пищевой цепи $AG_{ZP}(OX, PP)$ и $AG_{BR}(OX, ZP)$, а также агенты $AG_{ZP}(TW)$ и $AG_{BR}(TW)$, учитывающие влияние сезонного хода температуры моря на концентрации зоопланктона и биоресурса. В качестве внешних влияний A_i использованы данные спутниковых наблюдений концентраций хлорофилла a CH и поверхностной температуры TW . Схема внутрисистемных и внешних влияний (концептуальная модель) экосистемы приведена на рис.1.



Р и с . 1 . Схема причинно-следственных связей адаптивной модели экосистемы верхнего слоя моря.

Используя введенные на этой системе обозначения для переменных и агентов управления, получим следующую систему уравнений адаптивной модели экосистемы:

$$\begin{aligned} \frac{dPP}{dt} &= 2r_{PP}PP[C_{PP} - (PP - a_{PP/CH}CH + a_{PP/ZP}ZP)], \\ \frac{dOX}{dt} &= 2r_{OX}OX\{C_{ox} - [OX + a_{OX/BR}BR + a_{OX/ZP}ZP - a_{OX/PP}PP + a_{OX/TW}TW]\}, \\ \frac{dZP}{dt} &= 2ZP\{5 - [ZP + a_{ZP/BR}BR - AG_{ZP}(OX, PP) - AG_{ZP}(TW)]\}, \\ AG_{ZP}(OX, PP) &= IF[M_{ZP} = a_{ZP/OX}OX; a_{ZP/OX}OX; 0] + \\ &+ IF[M_{ZP} = a_{ZP/PP}PP; a_{ZP/PP}PP; 0], \\ M_{ZP} &= \arg \min[a_{ZP/OX}OX(t); a_{ZP/PP}PP(t)], \end{aligned} \quad (16)$$

$$AG_{ZP}(TW) = a_{ZP/TW} \exp[-\alpha_{ZP}(TW - TW_{ZP}^*)^2],$$

$$\frac{dBR}{dt} = 2BR\{5 - [BR - AG_{BR}(OX, ZP) - AG_{BR}(TW)]\},$$

$$AG_{BR}(OX, ZP) = IF[M_{BR} = a_{BR/OX} OX; a_{BR/OX} OX; 0] +$$

$$+ IF[M_{BR} = a_{BR/ZP} ZP; a_{BR/ZP} ZP; 0],$$

$$M_{BR} = \arg \min[a_{BR/OX} OX(t); a_{BR/ZP} ZP(t)],$$

$$AG_{BR}(TW) = a_{BR/TW} \exp[-\alpha_{BR}(TW - TW_{BR}^*)^2].$$

В уравнениях (16) агенты $AG_{ZP}(OX, PP)$ и $AG_{BR}(OX, ZP)$ выполняли ресурсное лимитирование роста концентраций зоопланктона и биоресурса соответственно, а агенты $AG_{ZP}(TW)$ и $AG_{BR}(TW)$ контролировали влияние температуры верхнего слоя моря на изменение их концентраций. Значения $TW_{ZP}^* = TW_{BR}^* = 26$ °С устанавливали наиболее благоприятные температурные условия для роста концентраций зоопланктона и биоресурса. Влияние динамики верхнего слоя моря косвенным образом учтено в уравнении для концентрации фитопланктона, поскольку в качестве внешнего источника в этом уравнении использованы спутниковые измерения концентрации хлорофилла CH , сформированной под влиянием адвекции и диффузии.

Применение адаптивной модели экосистемы западной половины Черного моря. Модель экосистемы была применена к расчету пространственно-временных распределений концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и кислорода для западного района Черного моря. При инициализации модели использованы данные литературных источников, дающие примерные оценки средних значений C_{PP} , C_{ZP} , C_{BR} , C_{OX} соответствующих полей концентраций. Эти оценки и вычисленные на их основе коэффициенты влияний приведены в табл.1.

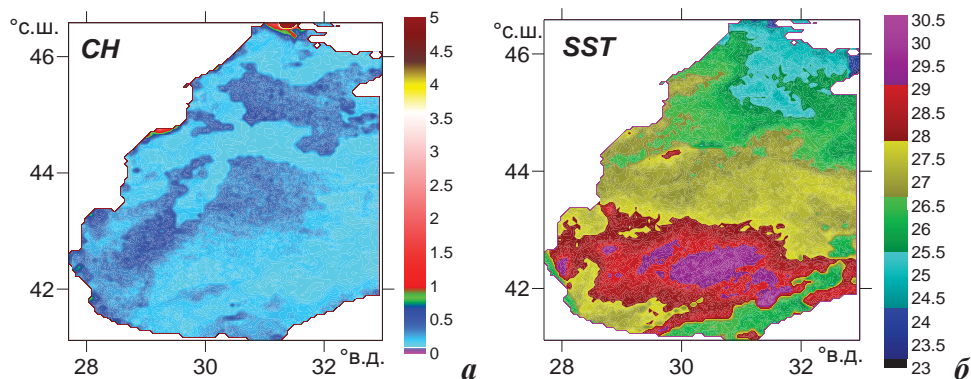
Использованные в работе спутниковые данные взяты из Базы спутниковых данных биооптических характеристик Черного моря, полученных с цветковых сканеров *SeaWiFS*, *MODIS* и *MERIS* (спутник *Aqua*), которая создана в МГИ РАН Суслиным В.В., Чуриловой Т.Я., Баянкиной Т.М. и Пряхиной С.Ф. [7 – 8]. Пропуски в данных в отдельных точках заполнялись путем осреднения имевшихся в этих точках наблюдений за двухнедельный период времени (за сутки до и сутки после дня вычислений). Осредненные за двухнедельный период времени с центром на 15 августа 2015 г. пространственные распределения полей хлорофилла a и поверхностной температуры моря приведены на рис.2.

Таблица 1. Средние значения в г/м³ и оценки коэффициентов влияний.

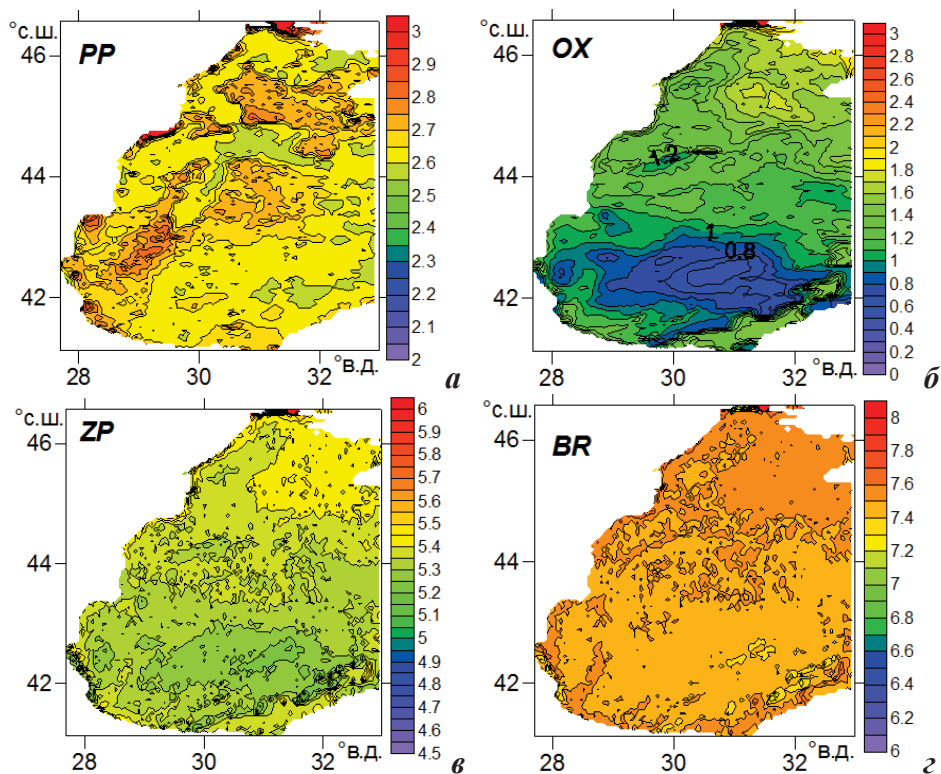
	C_i	a_{ij}	PP	ZP	BR	OX
C_{PP}	6,0	PP	1	0,5	–	–
C_{ZP}	0,2	ZP	0,27	1	0,5	0,23
C_{BR}	0,1	BR	–	0,33	1	0,17
C_{OX}	7,0	OX	0,5	0,5	–	1

Адаптивная модель экосистемы (16) с коэффициентами влияний из табл.1 была последовательно использована во всех узлах сеточной области, в которой содержались значения полей поверхностной температуры и концентрации хлорофилла (рис.2). Пространствен-

ные распределения моделируемых параметров построены в узлах прямоугольной сетки с шагом $0,035^\circ$ по долготе и $0,025^\circ$ по широте. Для удобства сопоставления этих распределений все они были приведены к единой безразмерной шкале (0, 10) путем линейного преобразования. Полученные пространственные распределения параметров экосистемы показаны на рис.3.



Р и с . 2 . Используемые в расчетах поля концентраций хлорофилла a ($\text{мг}/\text{м}^3$) (а) и поверхностной температуры ($^\circ\text{C}$) (б), построенные по спутниковым данным.



Р и с . 3 . Пространственная изменчивость безразмерных параметров морской экосистемы, рассчитанных по модели (10) на 227-е сутки 2015 г.: фитопланктон (а), кислород (б), зоопланктон (в), биоресурс (г).

Распределения концентрации фитопланктона определялись исключительно данными спутниковых наблюдений по концентрации хлорофилла *a*. Поэтому карты изолиний этих полей (рис.2, *a* и 3, *a*) практически повторяют друг друга. Насыщенность верхнего слоя моря кислородом зависит от целого ряда факторов: уровня его эвтрофированности, температуры, активности адвективных процессов, уровня развития биосистемы, в частности – фитопланктона и др. [9 – 11]. Полученное распределение концентрации кислорода (рис.3, *б*) сформировано под влиянием данных наблюдений по хлорофиллу и температуре. Сравнивая рис.2, *б* и рис.3, *б*, можно заметить, что зонам высокой концентрации кислорода соответствуют зоны низких температур и наоборот. Заметно также, что распределения концентраций зоопланктона (рис.3, *в*) и биоресурса (рис.3, *г*) находились под влиянием агентов ресурсного лимитирования (рис.1), которые контролировали распределения кислорода и фитопланктона.

Таким образом, результаты вычислительных экспериментов подтвердили применимость предложенного метода для распространения спутниковой информации о полях температуры и концентрации хлорофилла *a* на другие поля экосистемы верхнего слоя моря, если известны их средние значения.

Заключение. Апробация модели заключалась в проверке возможности распространить спутниковую информацию о полях температуры и концентрации хлорофилла *a* на другие биохимические поля на основе упрощенной адаптивной модели экосистемы, содержащей агенты ресурсного лимитирования, с помощью нового метода определения коэффициентов влияния. Эта цель была достигнута, так как сравнительный анализ полученных распределений концентраций моделируемых субстанций показал, что они полностью соответствуют использованной в модели схеме причинно-следственных связей между ними, а коэффициенты влияний обеспечивают устойчивость решений и чувствительность модели к усваиваемой спутниковой информации. Коэффициенты влияний в адаптивных моделях заменяют собой сложные функции, описывающие химико-биологическое взаимодействие процессов в традиционных моделях экосистем. Это существенно упрощает модели, но заставляет искать способы оценки коэффициентов влияний по априорной информации. Предложенный в данной работе метод сохраняет балансовые соотношения, выражающие реакции взаимодействия процессов в экосистемах. Если известны средние значения процессов, оценки коэффициентов влияний оказывается возможным выразить через их нормированные отношения.

Работа выполнена в ходе проведения плановых исследований ФГБУН МГИ РАН по проекту № 007-00694-16 ПР «Фундаментальная океанология».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fasham M., Ducklow H., McKelvie S.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the ocean mixed layer // *J. Mar. Res.*– 1990.– № 48.– P.591-639.
2. *Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeyev V.L., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Ratner Yu.B.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // *Ocean Sci.*– 2011.– 7.– P.629-649.
3. *Тимченко И.Е., Лазарчук И.П., Иващенко И.К., Игумнова Е.М.* Моделирование полей экосистемы верхнего слоя моря методом адаптивного баланса влияний // *Морской гидрофизический журнал.*– 2016.– № 1(187).– С.73-90.

4. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития.– Севастополь, 2000.– 225 с.
5. Ivavov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E. Coastal Zone Resources Management. – Kyiv: Akadempriodika, 2012.– 304 p.
6. Ильин В.А., Позняк В.Г. Основы математического анализа. В 2-х частях. Часть 1.– М.: Физматлит, 2005.– 648 с.
7. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Баянкина Т.М., Пряхина С.Ф. База спутниковых данных биооптических характеристик Черного моря, полученных с цветковых сканеров SeaWiFS, MODIS и MERIS // Свидетельство о регистрации баз данных № 2016621256. Заявка № 2016620979. Дата государственной регистрации в Реестре баз данных 15.09.2016 г.
8. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480-560 nm bands from ocean colour scanners // Int. J. Remote Sens.– 2016.– v.37, № 18.– P.4380-4400.
9. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Ли Р.И. Вертикальное распределение хлорофилла и флуоресценции в Черном море // Морской экологический журнал.– 2005.– 4, № 1.– С.15-45.
10. Зотов А.Б., Руснак Е.М. Связь индексов поверхности сообществ с валовой первичной продукцией, концентрацией хлорофилла "а", численностью, биомассой и поверхностью сообществ фитопланктона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2005.– вып.12.– С.554-560.
11. Емельянов В.А., Митропольский А.Ю., Наседкин Е.И. и др. Геоэкология черноморского шельфа Украины.– Киев: Академперіодика, 2004.– 296 с.

Материал поступил в редакцию 23.04.2017 г.
После доработки 09.07.2017 г.

I.E.Timchenko, I.P.Lazarchuk, E.M.Igumnova

ESTIMATION OF SPACE DISTRIBUTIONS OF BIOCHEMICAL PARAMETERS OF THE UPPER SEA LAYER BASED ON THE ADAPTIVE MODEL OF ECOSYSTEM AND SATELLITE OBSERVATIONS

A method is proposed to estimate the coefficients of influence in the adaptive model of ecosystem in the upper sea layer, based on average rates of biochemical interactions in the marine environment. As an example a simple casual relationships between the concentrations of phytoplankton, zooplankton, bioresource and oxygen is used. To calculate the normalized coefficients of influence that provide a stable solution to the equations of adaptive model of ecosystem the obtained equations are applicable. The model contained agents of resource limitation of zooplankton and oxygen concentrations, as well as agents that controlled the effect of upper sea layer temperature on the changes in zooplankton and bioresource concentrations. The method is used to construct spatial distributions of biochemical parameters in the west Black Sea from satellite observations of sea temperature and chlorophyll a concentration. The distributions of phytoplankton, zooplankton, bioresource and oxygen concentrations for this region are given, that represent its spatio-temporal variability. It is shown that the joint use of satellite observations and archival data on the mean values of the simulated processes make it possible to apply adaptive models of marine ecosystems to estimate the spatial distributions of ecosystem parameters in the upper sea layer.

KEYWORDS: method of adaptive balance of influence, normalized coefficients of influence, distribution of biochemical fields