

Математическое моделирование морских систем

УДК: 551.46.02

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

Оценка пространственных распределений параметров морской экосистемы методом адаптивного баланса влияний

Предложен метод построения карт параметров морской экосистемы, основанный на адаптации пространственных профилей, рассчитанных по модели экосистемы, к данным наблюдений вдоль траекторий полета спутника. Для получения адаптивных оценок полей использованы дифференциальные уравнения метода адаптивного баланса влияний, в которых скорости изменения параметров заменены их пространственными производными. Метод применен для оценки пространственных распределений концентраций кислорода, фито-, зоопланктона и других гидробионтов (биоресурса) по спутниковым данным о полях поверхностной температуры и концентрации хлорофилла в северо-западной части Черного моря. Делается вывод о перспективности предложенного подхода для обработки спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: ABC-метод, северо-западная часть Черного моря.

Введение

Устойчивое развитие прибрежной зоны моря предполагает создание информационных технологий контроля над состоянием морских биоресурсов и управления их потреблением. Системный подход к этой проблеме заключается в рациональном использовании всей доступной информации для прогнозирования возможных сценариев развития процессов в прибрежных морских экосистемах путем ассимиляции данных наблюдений в динамических моделях [1]. Одним из перспективных способов решения проблемы является использование известных из опыта научных исследований причинно-следственных зависимостей между процессами в морских экосистемах, корректируемых данными наблюдений. Эти соображения положены в основу метода адаптивного баланса влияний (ABC-метода) [2], который был применен в ряде исследований при построении интегральных моделей процессов в морских экосистемах и эколого-экономических системах прибрежной зоны моря [3].

Используемый в ABC-методе принцип адаптивного баланса влияний обеспечивает непрерывную адаптацию временных сценариев процессов в морской экосистеме, которые связаны между собой причинно-следственными и, следовательно, корреляционными зависимостями. Наблюдаемые и ненаблюдаемые (рассчитываемые по модели) пространственные распределения параметров экосистемы также связаны между собой пространственными корреляционными функциями. Поэтому ABC-модели должны быть в равной степени применимы как к временным процессам развития в морских экосисте-

© И.Е. Тимченко, И.К. Иващенко, Е.М. Игумнова, И.П. Лазарчук, 2011

мах, наблюдаемым в отдельных точках полей, так и к их пространственным реализациям. Располагая, например, картой поверхностной температуры моря, можно учесть в пространственном варианте *ABC*-модели влияние распределения температуры на распределения концентраций кислорода, зоопланктона и других переменных экосистемы.

Так как спутниковые наблюдения являются основным источником информации о состоянии морской поверхности, эти соображения открывают возможность оценки вдоль траектории полета ненаблюдаемых (или трудно наблюдаемых) распределений параметров экосистемы путем адаптации их модельных значений к данным дистанционного зондирования. Настоящая работа посвящена практическим аспектам реализации пространственного варианта упрощенной *ABC*-модели морской экосистемы для построения карт распределений концентраций кислорода, зоопланктона и биоресурса по данным дистанционного зондирования полей фитопланктона (хлорофилла) и поверхностной температуры моря.

Метод адаптивного баланса влияний

Системный принцип адаптивного баланса влияний [4] постулирует стремление всех природных систем к состоянию динамического равновесия друг с другом и с приложенными к ним внешними воздействиями. Существование равновесия объясняется балансом положительных и отрицательных обратных связей, которые формируются внутри системы за счет причинно-следственных отношений между процессами. На основе этого принципа в работе [2] предложен метод адаптивного баланса влияний для моделирования сложных систем, который построен на двух концепциях:

1. Существует универсальное модульное уравнение, выражающее скорость изменения любого из моделируемых процессов в форме управляемого баланса тенденций роста и убывания этого процесса.

2. Объединение модульных уравнений в систему динамических уравнений модели должно обеспечивать стремление решений этих уравнений к стационарному состоянию, которое определяется внутрисистемными связями и внешними влияниями, приложенными к системе.

В соответствии с первой концепцией в правую часть универсального модульного уравнения *ABC*-метода должны быть введены две базовые функции влияния $F^{(-)}(x)$ и $F^{(+)}(x)$. Эти функции сдерживают как рост, так и убывание моделируемого процесса x , направляя его сценарий к устойчивому стационарному значению

$$\frac{dx}{dt} = F^{(-)}(x)x - F^{(+)}(x)x. \quad (1)$$

Для этого достаточно потребовать, чтобы с ростом x базовая функция $F^{(-)}(x)$ монотонно убывала, а базовая функция $F^{(+)}(x)$ монотонно росла. Для обеспечения общего баланса необходимо поставить дополнительное условие нормировки базовых функций влияния:

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

С учетом этого условия универсальное уравнение *ABC*-метода для процесса x принимает форму

$$\frac{dx}{dt} = x[1 - 2F^{(+)}(x)], \quad (3)$$

где $F^{(+)}(x)$ – любая монотонно растущая функция. Если использовать наиболее простую базовую функцию влияния, выбрав ее в виде $F^{(+)}(x) = x$, уравнение (3) переписывается следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = x[1 - 2x]. \quad (4)$$

В этой форме оно представляет собой частный случай нелинейного уравнения Бернулли (при $p = -1$, $q = 2$, $n = 2$), или логистического уравнения [5]:

$$\frac{dx}{dt} + p(t)x + q(t)x^n = 0.$$

Нетрудно показать, что решение уравнения стремится к постоянному равновесному значению $x = 0,5$. Используя схему Эйлера, запишем конечно-разностный аналог уравнения (4) в виде, совпадающем с известной итерационной формулой логистического уравнения:

$$x(n) = rx(n-1)[1 - x(n-1)], \quad r = 2. \quad (5)$$

Как известно, при $r = 2$ итерационный процесс (5) сходится к единственному аттрактору – стационарному состоянию процесса при $x = 0,5$ [5]. На рис. 1, *а* приведены изменения значений левой и правой частей уравнения (5) с ростом n . Стационарному состоянию – решению уравнения (4) – соответствует точка пересечения двух графиков. В процессе решения уравнения происходит быстрое стремление точки, изображающей решение, к аттрактору (показано последовательностью стрелок). На рис. 1, *б* приведен временной сценарий процесса x , который также демонстрирует быструю сходимости решения к стационарному состоянию при $x = 0,5$ уже на 5-й, 6-й итерации.

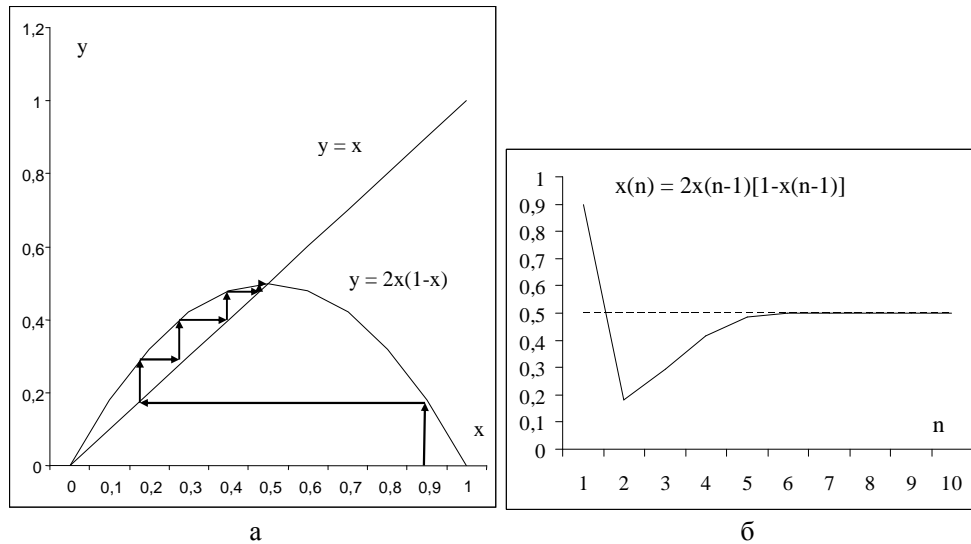
Вторая концепция *ABC*-метода должна быть применена для объединения в систему всех процессов, отвечающих цели моделирования. Для этого в аргументы базовых функций влияния $F^{(+)}(x)$ модульных уравнений каждого процесса добавляются суммы всех других процессов, взвешенных с некоторыми коэффициентами влияний a_{ij} . Поэтому общая система динамических уравнений *ABC*-модели и ее конечно-разностная аппроксимация принимают следующий вид:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left[1 - 2 \left(x_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} x_j - f_i \right) \right] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (i \neq j), \quad (6)$$

$$x_{ik} = 2x_{ij} \left[1 - \left(x_{ij} - \sum_{m=1}^{n-1} a_{im} x_{mj} - f_{ij} \right) \right] \quad (i, m = 1, 2, \dots, n), \quad (i \neq m), \quad (7)$$

$$(k = j + 1), \quad (j = 0, 1, 2, 3 \dots), \quad t_k - t_j = 1,$$

где f_i и f_{ij} – функции внешних влияний, приложенных к системе.



Р и с. 1. Сходимость решения уравнения системного модуля к стационарному значению: *а* – графики левой и правой частей уравнения (5); *б* – временной сценарий процесса $x(n)$

Как показывают исследования [1 – 4, 6], системы уравнений вида (7) при правильном выборе коэффициентов влияний обладают быстрой сходимостью к стационарным решениям. Это свойство *ABC*-модели позволяет отслеживать динамику внешних воздействий, приложенных к моделируемой системе, если характерные масштабы изменчивости внешних влияний значительно больше выбранных шагов вычислительного алгоритма модели.

Существуют различные методы экспертных оценок коэффициентов влияний, которые используются при построении моделей конкретных систем. Наиболее объективными являются статистические приемы оценки коэффициентов, основанные на использовании системы уравнений оптимальной интерполяции Колмогорова [7]. Для статистической оценки коэффициентов уравнений *ABC*-модели (6) предположим, что функции внешних влияний f_i представляют собой случайные колебания f' около нулевого среднего значения. Они вызывают отклонения x'_i сценариев процессов от их значений

в стационарном состоянии системы \bar{x}_i , которое наступает, когда внешние влияния f_i отсутствуют.

Введем в рассмотрение коэффициенты взаимной корреляции

$$R_{kl} = E\{x'_k x'_l\}, \quad G_{mn} = E\{x'_m f'_n\}. \quad (8)$$

Изменчивость коэффициентов влияний является следствием нестационарности моделируемых процессов развития и внешних воздействий, приложенных к системе. Рассматривая коэффициенты a_{ij} как стационарные состояния *ABC*-модели системы коэффициентов влияний, получим следующие уравнения:

$$\frac{da_{ij}}{dt} = a_{ij} \left[1 - 2 \left(a_{ij} - \frac{G_{ij}}{R_{jj}} + \frac{R_{ij}}{R_{jj}} + \sum_{p=1}^{n-1} a_{ip} \frac{R_{pj}}{R_{jj}} \right) \right] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (i \neq j). \quad (9)$$

Уравнения (9) позволяют оценивать коэффициенты влияний через корреляционные матрицы наблюдаемых процессов и внешних воздействий. Следовательно, располагая архивными данными наблюдений о процессах развития x_i и внешних влияниях f_i , с их помощью можно объективно оценить коэффициенты влияний a_{ij} .

Применение *ABC*-метода для оценки пространственных распределений параметров морской экосистемы

В работах [1 – 4, 6] можно найти примеры использования *ABC*-метода для построения временных сценариев процессов в интегральных моделях морских экосистем. В этих работах рассматривалась реакция модели экосистемы на временные сценарии внешних воздействий, в качестве которых обычно выступают годовой ход температуры верхнего слоя моря, его освещенность, скорость приводного ветра и т. д. Модульные уравнения *ABC*-метода связывали между собой физические скорости изменения интегральных параметров экосистемы со значениями этих параметров и внешними влияниями.

Рассмотренные выше концепции *ABC*-метода не препятствуют его использованию для получения профилей пространственных распределений параметров морской экосистемы. Отличием *ABC*-модели, предназначенной для расчета пространственных распределений, является зависимость ее переменных не от времени t , а от пространственной координаты l . В этом варианте модель отражает адаптивный баланс (согласованность) пространственных сценариев (профилей) моделируемых процессов между собой и с заданными профилями внешних влияний.

Поясним эту идею на примере упрощенной модели морской экосистемы. Поставим своей целью получить оценки пространственных распределений биоресурса по данным о концентрации хлорофилла и поверхностной температуры моря. Обозначим через $BR(l)$ концентрацию биоресурса вдоль

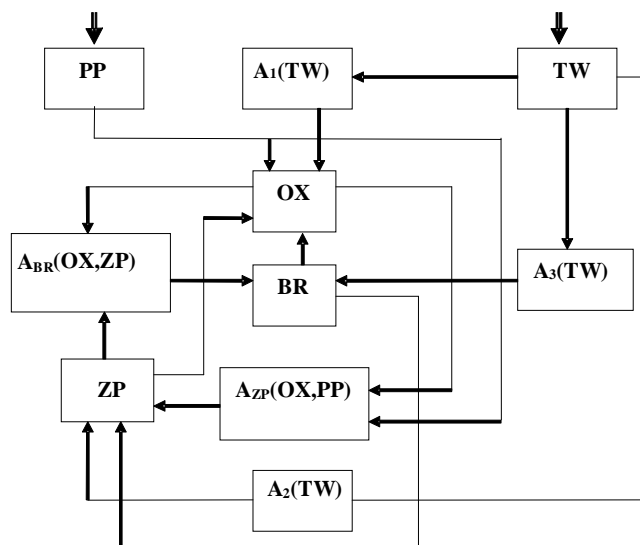
направления (траектории) l на поверхности моря. *ABC*-модель морской экосистемы, используемая для оценки этого параметра, должна содержать в своем составе основные процессы, обеспечивающие существование биоресурса в поверхностном слое.

В качестве этих параметров экосистемы используем средние по верхнему слою моря значения концентраций фитопланктона PP , зоопланктона ZP , кислорода OX и биоресурса BR , под которым будем понимать концентрацию всех живых организмов, расположенных выше зоопланктона в пищевой цепи. В качестве внешнего воздействия на экосистему будем рассматривать температуру верхнего слоя моря TW . В целях упрощения исключим из рассмотрения биогены и углекислый газ.

Используем наблюдения поля концентрации хлорофилла $CH(l)$ в правой части уравнения для фитопланктона, полагая, что они представляют собой конечный результат влияния на концентрацию фитопланктона всех неучитываемых в модели процессов. Кроме того, учтем влияние поверхностной температуры моря на состояние экосистемы, поскольку эти данные обычно доступны для анализа. Наблюдения температуры и концентрации хлорофилла могут быть сняты, например, с карт соответствующих полей, построенных по данным дистанционного зондирования морской поверхности [8].

Для более реалистичного описания условий формирования процессов в экосистеме в структуру ее модели должны быть включены агенты управления [3, 4, 6]. Введем агенты ресурсного лимитирования концентраций зоопланктона по фитопланктону и кислороду $A_{ZP}(PP, OX)$, биоресурса по зоопланктону и кислороду $A_{BR}(ZP, OX)$, а также агенты, обеспечивающие зависимость концентраций кислорода, зоопланктона и биоресурса от температуры моря.

Концептуальная модель экосистемы представлена схемой причинно-следственных связей (рис. 2).



Р и с. 2. Адаптивная модель для оценки пространственных распределений параметров экосистемы по данным дистанционного зондирования температуры и концентрации хлорофилла в верхнем слое моря

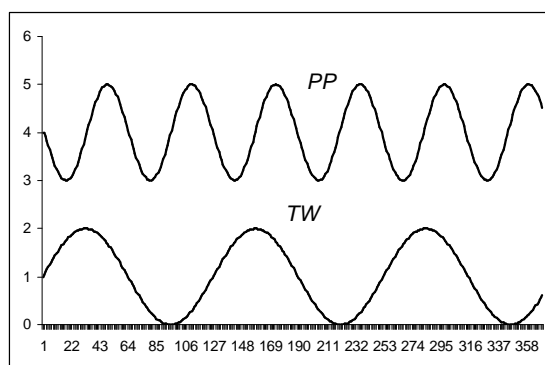
Этой концептуальной модели соответствует следующая система уравнений пространственной (вдоль направления l на морской поверхности) ABC -модели:

$$\begin{aligned}
 \frac{dPP}{dl} &= PP\{1 - 2[PP - a_{PP/CH}CH(l)]\}, \\
 \frac{dOX}{dl} &= OX\{1 - 2[OX + a_{OX/BR}BR + a_{OX/ZP}ZP - a_{OX/PP}PP + a_{OX/TW}TW]\}, \\
 \frac{dZP}{dl} &= ZP\{1 - 2[ZP + a_{ZP/BR}BR - A_{ZP}(PP, OX) - a_{ZP/TW} \exp[-\alpha_{ZP}(TW - TW_{ZP}^*)^2]]\}, \\
 \frac{dBR}{dl} &= BR\{1 - 2[BR - A_{BR}(ZP, OX) - a_{BR/TW} \exp[-\alpha_{BR}(TW - TW_{BR}^*)^2]]\}, \\
 A_{ZP}(PP, OX) &= a_{ZP/PP}PP(l)A_{ZP/PP}(l) + a_{ZP/OX}OX(l)A_{ZP/OX}(l), \\
 a_{ZP/PP}PP(l) &= IF[M_{ZP}(l) = PP(l); a_{ZP/PP}PP(l); 0], \\
 A_{ZP/PP}(l) &= IF[PP(l) < PP_c; 0; 1], \\
 a_{ZP/OX}OX(l) &= IF[M_{ZP}(l) = OX(l); a_{ZP/OX}OX(l); 0], \\
 A_{ZP/OX}(l) &= IF[OX(l) < OX_c; 0; 1], \\
 M_{ZP} &= \arg \min\{PP(l); OX(l)\}, \\
 A_{BR}(ZP, OX) &= a_{BR/ZP}ZP(l)A_{BR/ZP}(l) + a_{BR/OX}OX(l)A_{BR/OX}(l), \\
 a_{BR/ZP}ZP(l) &= IF[M_{BR}(l) = ZP(l); a_{BR/ZP}ZP(l); 0], \\
 A_{BR/ZP}(l) &= IF[ZP(l) < ZP_c; 0; 1], \\
 a_{BR/OX}OX(l) &= IF[M_{BR}(l) = OX(l); a_{BR/OX}OX(l); 0], \\
 A_{BR/OX}(l) &= IF[OX(l) < OX_c; 0; 1], \\
 M_{BR} &= \arg \min\{ZP(l); OX(l)\}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

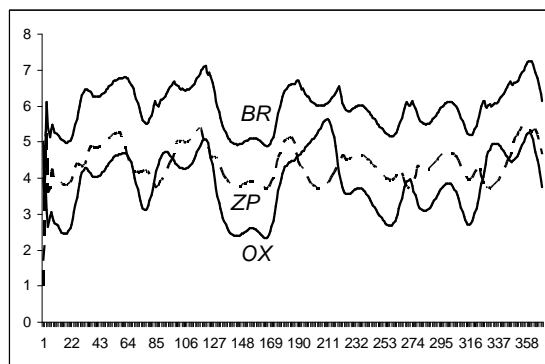
В модели установлены нижние предельно допустимые концентрации фитопланктона PP_c , зоопланктона ZP_c и кислорода OX_c . Если лимитирующий параметр в данной точке пространственного сценария опускался ниже предельно допустимого значения, агенты управления обращали его в нуль. Наиболее благоприятные для развития зоопланктона и биоресурса значения температуры верхнего слоя моря обозначены TW_{ZP}^* и TW_{BR}^* соответственно.

Вычислительные эксперименты с моделью экосистемы

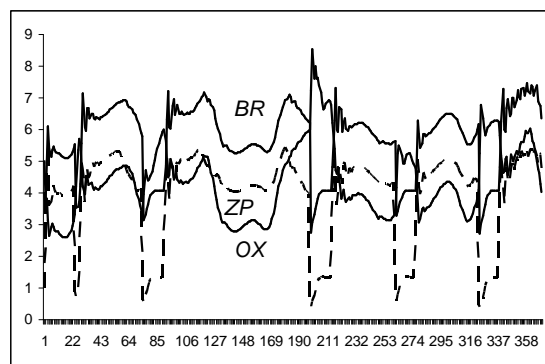
В первом вычислительном эксперименте выполнено тестирование модели экосистемы в условиях, когда пространственные профили измерений поверхностной температуры и концентрации хлорофилла представляют собой простые гармонические функции (рис. 3, *a*).



a



б



в

Р и с. 3. Результаты тестовых экспериментов по расчету пространственных распределений ненаблюдаемых параметров экосистемы с помощью *ABC*-модели: *a* – внешние влияния; *б* – реакция модели без учета зоны гомеостаза по фитопланктону; *в* – реакция модели с учетом зоны гомеостаза. По горизонтальным осям – безразмерные шаги по времени, по вертикальным – безразмерные значения переменных

Все переменные модели приведены к единой безразмерной шкале изменчивости (0,10) при помощи линейного преобразования и нормировки на максимальные значения реальных размерных переменных [2]. Коэффициенты влияний в динамических уравнениях модели выбраны из интервала значений (0,1; 0,5). Установим следующие параметры модели: $a_{ZP/TW} = a_{BR/TW} = 2$, $\alpha_{ZP} = \alpha_{BR} = 0,001$, $TW_{ZP}^* = TW_{BR}^* = 4,5 \cdot 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$. Нижние предельно допустимые концентрации не были установлены: $PP_c = ZP_c = OX_c = 0$.

Пространственные сценарии, полученные с помощью модели в этом эксперименте, показаны на рис. 3, б. Прежде всего, обращает на себя внимание сложный характер изменчивости этих сценариев по сравнению с теми простыми гармоническими функциями внешних влияний, которые были поданы на вход вычислительного алгоритма модели. Доминирующее влияние на формирование сценария развития концентрации кислорода имело пространственное распределение температуры. Вторым влияющим фактором – выделение кислорода фитопланктоном – значительно усложнил этот сценарий.

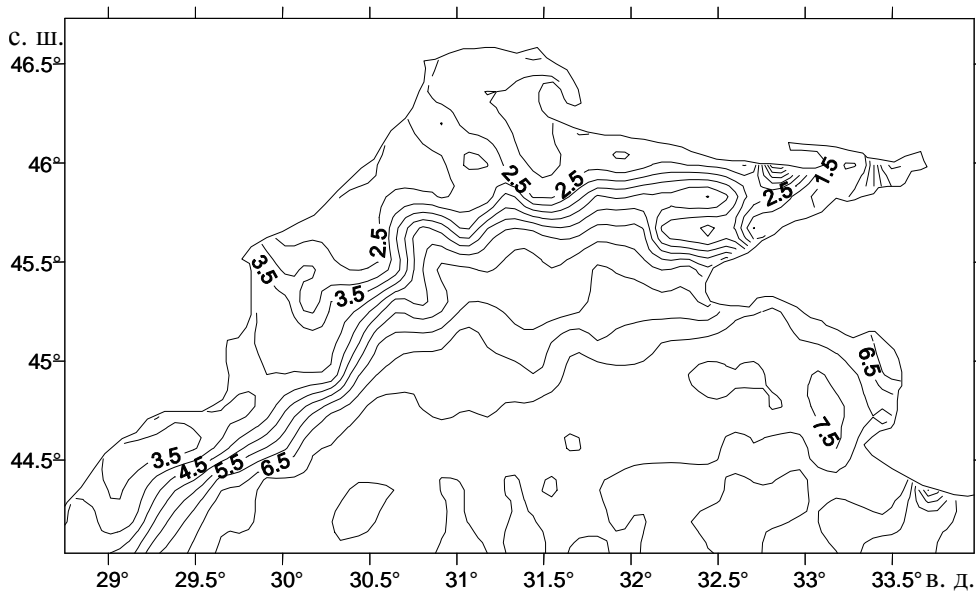
При формировании пространственного распределения зоопланктона ведущая роль принадлежала агенту лимитирования $A_{ZP}(PP, OX)$, который ориентировал текущее значение концентрации $ZP(l)$ на минимальное из двух значений $PP(l)$ или $OX(l)$. Подобным же образом происходило формирование пространственного сценария развития концентрации биоресурса. Агент лимитирования $A_{BR}(ZP, OX)$ выбирал минимальное из двух значений $ZP(l)$ или $OX(l)$, о чем свидетельствуют, например, сценарии на рис. 3, б для участка траектории (190, 220). На этом участке концентрация зоопланктона была ниже концентрации кислорода, вследствие чего сценарий развития биоресурса был подчинен сценарию развития зоопланктона.

Во втором эксперименте было поставлено дополнительное условие: концентрация фитопланктона не должна опускаться ниже предельно допустимого значения $PP_c = 3,3$. Как следует из рис. 3, а, при этом условии агент $A_{ZP/PP}(l)$ в уравнении для концентрации зоопланктона должен был резко ограничивать значение этой концентрации, что привело к дальнейшему усложнению всех рассчитываемых пространственных сценариев. Об этом свидетельствует рис. 3, в, на котором зонам низкой концентрации фитопланктона соответствуют зоны существенного падения концентраций зоопланктона и биоресурса, сопровождаемые подъемами концентрации кислорода.

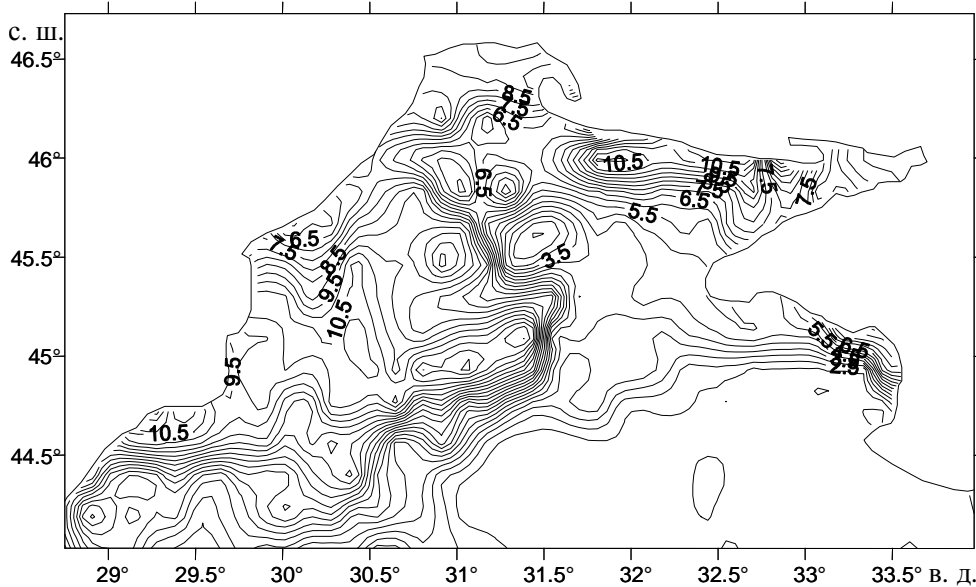
Оценка пространственных распределений параметров морской экосистемы по данным дистанционного зондирования морской поверхности

Рассмотренная выше *ABC*-модель морской экосистемы (10) была применена при проведении вычислительных экспериментов с использованием данных дистанционного зондирования северо-западного района Черного моря, полученных со спутника в феврале 2008 г. [8] (рис. 4). Данные наблюдений

представляли собой измерения полей концентрации хлорофилла и поверхностной температуры моря в узлах квадратной сетки, покрывающей район.



a



б

Р и с. 4. Используемые в расчетах поля концентраций поверхностной температуры (°C) – *a* и хлорофилла (мг/м³) – *б*, построенные по данным дистанционного зондирования морской поверхности

Для объективной оценки коэффициентов влияний в уравнениях модели экосистемы по формулам (8), (9) необходимо располагать рядами наблюдений всех параметров экосистемы вдоль некоторой траектории полета спутника. С определенной погрешностью для этой цели могли быть использованы временные ряды наблюдений в отдельной точке поля, если принять, например, гипотезу Тейлора о существовании связи между пространственными и временными корреляционными функциями случайных полей [9]. В реальности такие данные требуют постановки специальных подспутниковых экспериментов.

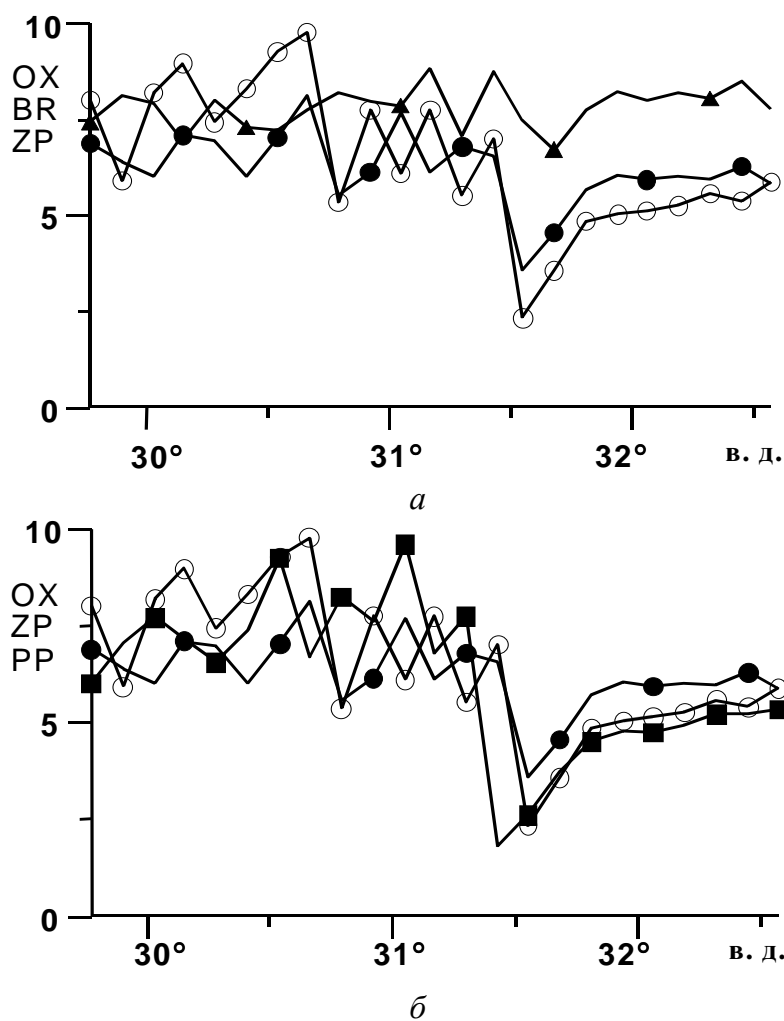
Ввиду отсутствия упомянутых наблюдений коэффициенты влияний были выбраны из соображений компромисса между чувствительностью модели (10) к используемым спутниковым измерениям полей CH и TW и устойчивостью вычислительного алгоритма модели. Используемые в расчетах значения коэффициентов приведены в таблице.

Т а б л и ц а

$a_{MM/NN}$	PP	OX	ZP	BR	CH	TW
PP	1	0,6	-0,4	0	0,5	-0,3
OX	0,6	1	-0,2	-0,2	0	-0,2
ZP	0	0,4	1	-0,4	0	0,1
BR	0	0,4	0,4	1	0	0,1

Косвенным подтверждением обоснованности подобного выбора могут служить известные из литературных источников зависимости концентраций зоопланктона и биоресурса на северо-западном шельфе Черного моря от условий питания и концентрации кислорода в зимнее время [10].

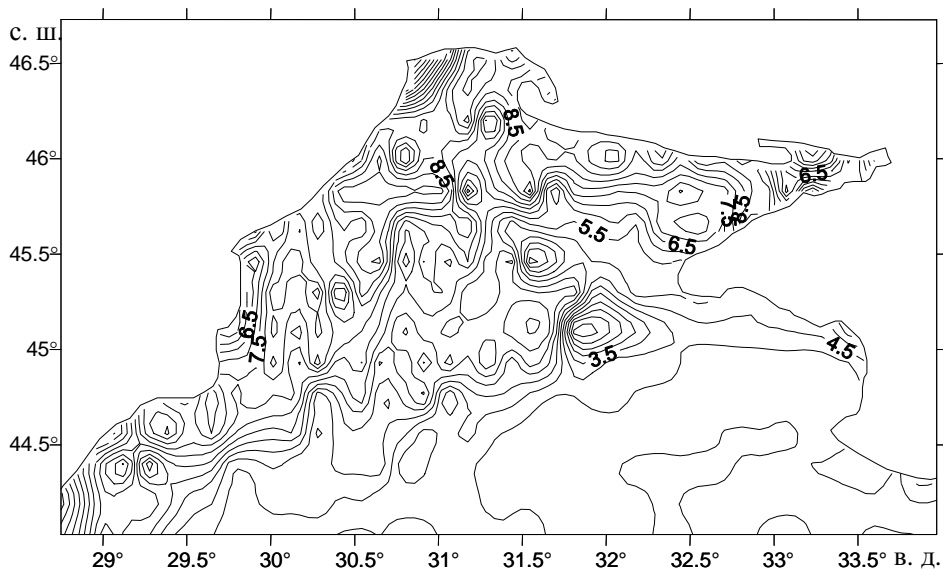
Для удобства графического изображения результатов расчетов все моделируемые процессы, а также данные наблюдений были приведены к единой безразмерной шкале изменчивости (0,10). В первой серии вычислительных экспериментов построены профили пространственных распределений параметров экосистемы вдоль отдельных направлений. Примеры полученных профилей этих параметров, рассчитанных на широте $45^{\circ} 47'$, показаны на рис. 5. Для упрощения при проведении расчетов границы зон гомеостаза для живых объектов экосистемы не устанавливались. Однако агенты лимитирования концентраций зоопланктона $A_{ZP}(PP, OX)$ и биоресурса $A_{BR}(ZP, OX)$ были включены.



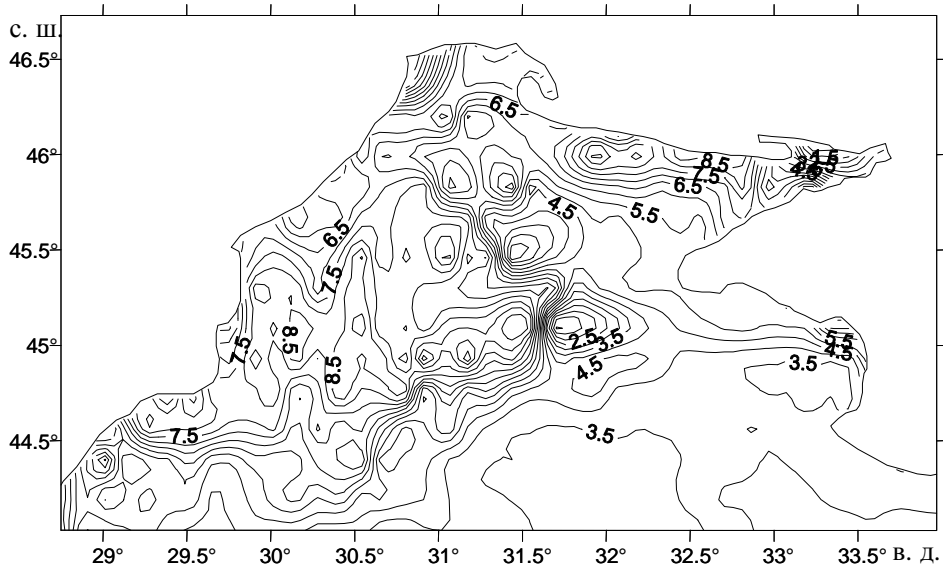
Р и с. 5. Пространственные распределения параметров экосистемы на широте $45^{\circ} 47'$, рассчитанные по модели (10) с использованием данных наблюдений, приведенных на рис. 4: \circ – OX; \bullet – ZP; \blacktriangle – BR; \blacksquare – PP

Сопоставляя пространственную изменчивость концентраций кислорода, фито- и зоопланктона, а также биоресурса на широте $45^{\circ} 47'$ с исходными полями температуры и концентрации хлорофилла (рис. 4), можно видеть, что они находятся в качественном согласии с распределениями исходных полей. Результаты действия агентов лимитирования можно проследить по профилям, изображенным на рис. 5. Так, например, график концентрации зоопланктона на рис. 5, б отчетливо следует за минимальным значением фитопланктона или кислорода. Отсутствие большого разброса значений параметров относительно общего для них среднего свидетельствует о том, что использованные в модельных расчетах коэффициенты влияния (таблица) были выбраны правильно.

Во второй серии экспериментов адаптивная модель экосистемы (10) с коэффициентами влияний из таблицы была последовательно использована на всех широтных разрезах полей поверхностной температуры и концентрации хлорофилла (рис. 4). Это позволило построить карты пространственных распределений параметров экосистемы (рис. 6, 7).

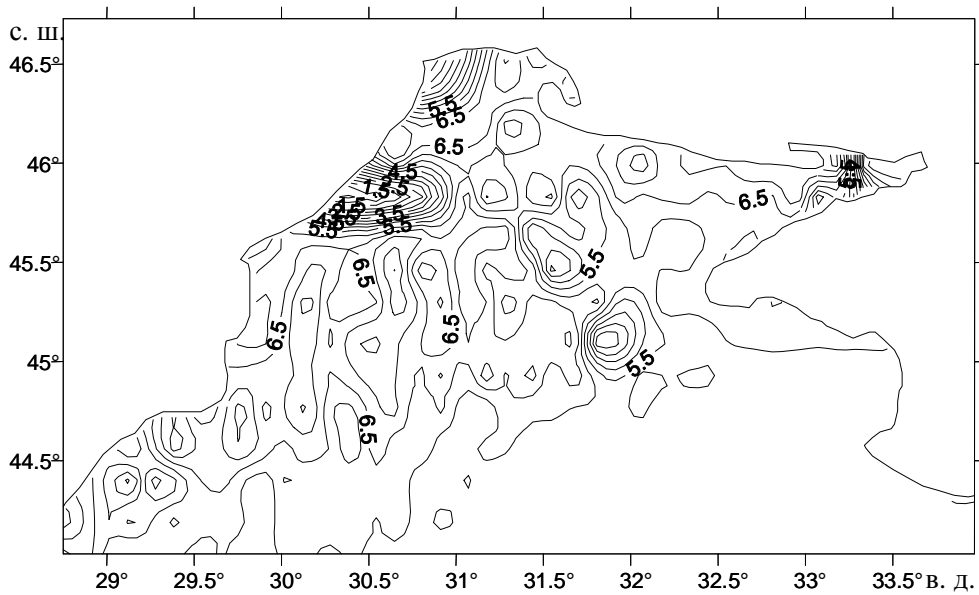


a

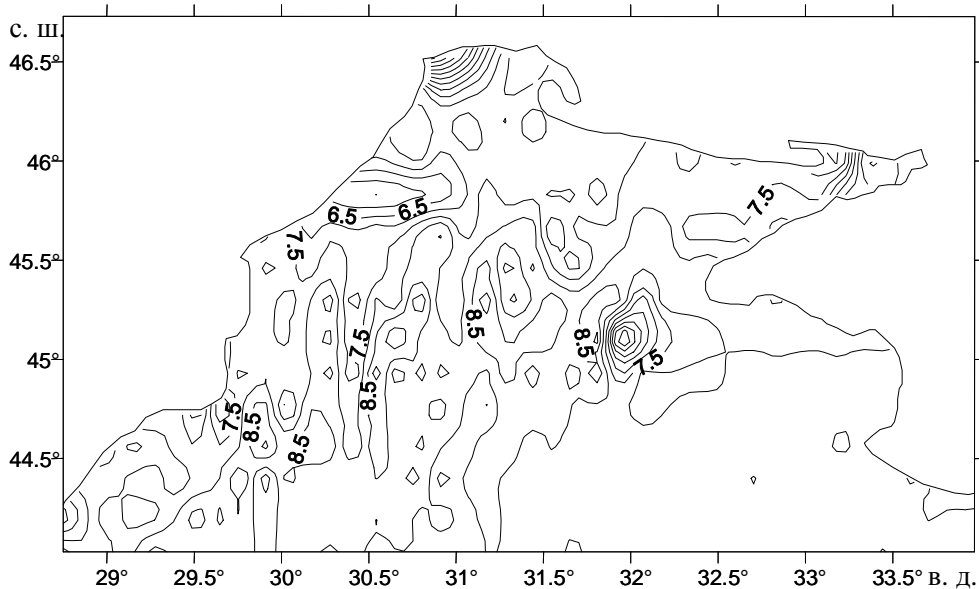


б

Р и с. 6. Карты безразмерных значений концентраций кислорода (*a*) и фитопланктона (*б*), построенные методом адаптивного баланса влияний при помощи модели экосистемы (10). Поправочный коэффициент для перехода к реальным значениям по фитопланктону $PP \cdot 10^{-1}$ ммоль N/m^3



a



б

Р и с. 7. Карты безразмерных значений концентраций зоопланктона (*a*) и биоресурса (*б*), построенные методом адаптивного баланса влияний при помощи модели экосистемы (10)

В соответствии с моделью (10) распределения концентрации фитопланктона определялись исключительно данными спутниковых наблюдений по концентрации хлорофилла. Поэтому карты этих полей (рис. 4, *б*; 6, *б*) практически идентичны. Иная ситуация характерна для распределений концентра-

ции кислорода, т. к. они одновременно находились под влиянием хлорофилла и температуры. Поэтому карта концентрации кислорода (рис. 6, *a*), отражающая влияние изолиний температурного поля, заметно отличается от карты концентрации фитопланктона.

Карта концентрации зоопланктона (рис. 7, *a*) сформирована под влиянием агента лимитирования этих концентраций по фитопланктону и кислороду. Она еще более отличается от рассмотренных выше карт, поскольку на фоне незначительной по амплитуде изменчивости случайного характера она содержит несколько локальных зон экстремальных значений. В частности, эти зоны, расположенные в районах 46° с. ш., $30,5^\circ$ в.д. и 45° с. ш., 32° в. д., прослеживаются и на карте концентрации биоресурса (рис. 7, *b*). Таким образом, предложенный алгоритм получения оценок пространственных полей позволил провести пересчет данных наблюдений поверхностной температуры и концентрации хлорофилла в иные – ненаблюдаемые параметры экосистемы.

Заключение

В соответствии с системной концепцией адаптивного баланса влияний изменчивость полей экосистемы является результатом ее стремления приспособиться к переменным внешним воздействиям. Поэтому пространственно-временные поля параметров морских экосистем находятся в динамическом равновесии друг с другом и с внешними влияниями, приложенными к экосистеме. Характер пространственно-временной изменчивости полей существенно зависит от условий среды обитания живых организмов, т. е. от ресурсного обеспечения их существования и развития. Этим объясняется сложный вид временных сценариев развития процессов в экосистемах и профилей пространственных распределений параметров.

Рассмотренный в данной работе метод адаптивного баланса влияний учитывает свойства взаимной адаптации процессов в сложных природных системах, т. к. в нем используются уравнения логистического типа, обладающие быстрой сходимостью к устойчивым решениям. Особенностью этого метода является возможность определять коэффициенты логистических уравнений по данным наблюдений, применяя экспертный или аналитический (вероятностный) подход. Поэтому *ABC*-метод позволяет ввести переменные коэффициенты в уравнениях модели, адаптируемые к данным наблюдений, что должно существенно повысить качество моделирования. Резюмируя сказанное, сформулируем основные выводы.

1. Профили пространственных распределений параметров морской экосистемы формируются под влиянием сложных нелинейных взаимодействий, которые обусловлены причинно-следственными связями и ресурсными ограничениями процессов развития.

2. Взаимная адаптация переменных в *ABC*-моделях позволяет заменить производные по времени в интегральных моделях морских экосистем их пространственными аналогами для того, чтобы рассчитать профили пространственных распределений параметров экосистемы, согласованные с данными наблюдений, вдоль выделенных направлений.

3. Предложенный способ построения карт параметров морской среды целесообразно использовать при анализе данных дистанционного зондирования морской поверхности, поскольку он дает возможность распространить спутниковую информацию на другие – ненаблюдаемые поля, имеющие причинно-следственные связи с наблюдаемыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.И., Игумнова Е.М. Ассимиляция данных наблюдений и адаптивный прогноз природных процессов // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 6. – С. 47 – 70.
2. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
3. Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е. Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – 258 с.
4. Тимченко И.И., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 520 с.
5. Sprott J.C. Chaos and Time-Series Analysis. – Oxford University Press, 2003. – 528 p.
6. Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Моделирование эколого-экономических систем. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 320 с.
7. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Серия матем. – 1941. – Вып. 5. – С. 3 – 13.
8. Пухтяр Л.Д., Станичный С.В., Тимченко И.Е. Оптимальная интерполяция данных дистанционного зондирования морской поверхности // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 4. – С. 34 – 50.
9. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. В 2-х тт. – М.: Наука, 1965, 1967. – 640 с., 720 с.
10. Ковалев А.В., Финенко З.З., Островская Н.А. и др. Планктон Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1993. – 280 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 07.05.10
После доработки 31.05.10

АНОТАЦІЯ Запропоновано метод побудови карт параметрів морської екосистеми, заснований на адаптації просторових профілів, які були розраховані за моделлю екосистеми, до даних спостережень уздовж траєкторій польоту супутника. Для отримання адаптивних оцінок полів використані диференціальні рівняння методу адаптивного балансу впливів, у яких швидкості зміни параметрів замінені їх просторовими похідними. Метод застосований для оцінки просторових розподілів концентрацій кисню, фіто-, зоопланктону та інших гідробіонтів (біоресурсу) за супутниковими даними про поля поверхневої температури і концентрації хлорофілу в північно-західній частині Чорного моря. Робиться висновок про перспективність запропонованого підходу для обробки супутникових спостережень.

Ключові слова: ABC-метод, північно-західна частина Чорного моря.

ABSTRACT Proposed is the method of mapping the marine ecosystem parameters based on adaptation of spatial profiles (calculated by the ecosystem model) to the observation data along a satellite trajectory. To obtain the adaptive estimates of fields, differential equations of the method of adaptive balances of causes in which the rates of the parameters' changes are replaced with their spatial derivatives are used. The method is applied for assessing spatial distribution of concentrations of oxygen, phyto-, zooplankton and other hydrocoles (bio-resources) based on satellite data on surface temperature fields and chlorophyll concentration in the northwestern part of the Black Sea. The conclusion on prospects of the proposed approach for processing satellite observations is drawn.

Keywords: ABC-method, northwestern part of the Black Sea.