

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

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

СОГЛАСОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭКОСИСТЕМЫ С ДАННЫМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрен метод построения карт параметров морской экосистемы по данным спутниковых наблюдений хлорофилла и температуры в верхнем слое акватории северо-западного шельфа Черного моря в феврале 2007 г. Интегральная модель экосистемы верхнего слоя моря, построенная методом адаптивного баланса влияний, использована в пространственном варианте этого метода для согласования рассчитываемых по модели значений концентраций фитопланктона, зоопланктона, кислорода и биоресурса со спутниковыми данными вдоль отдельных профилей в этих полях. Построены карты пространственных распределений параметров экосистемы для данного района.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *ABC-метод, северо-западный шельф Черного моря.*

Спутниковые наблюдения являются основным источником информации о пространственных распределениях температуры морской поверхности, возвышений уровня моря, концентрации хлорофилла и других параметров. Ассимиляция спутниковых наблюдений в динамических моделях морской среды позволяет построить карты гидрофизических полей, распространяя спутниковую информацию вглубь океана. Особый интерес представляют поля поверхностной температуры моря и концентраций хлорофилла в верхнем слое, с которыми связаны параметры морской экосистемы. Использование спутниковой информации в соответствующей модели экосистемы открывает возможность оценки не наблюдаемых (или трудно наблюдаемых) распределений параметров экосистемы.

Одним из перспективных методов согласования пространственных распределений параметров экосистемы с данными дистанционного зондирования может стать метод адаптивного баланса влияний (*ABC-метод*) [1]. Этот метод обеспечивает непрерывную адаптацию сценариев процессов в морской экосистеме друг к другу и к внешним влияниям, приложенным к системе. Поэтому *ABC-модели* должны быть в равной степени применимы как к временным процессам развития, наблюдаемым в отдельных точках полей, так и к пространственным реализациям этих полей.

В настоящей работе мы рассмотрим один из примеров реализации пространственного варианта интегральной *ABC-модели* морской экосистемы для построения карт распределений концентраций кислорода, зоопланктона и биоресурса по данным дистанционного зондирования полей хлорофилла и поверхностной температуры в северо-западной части Черного моря.

Применение *ABC-метода* для оценки пространственных распределений параметров морской экосистемы. *ABC-метод* может быть исполь-

зован для получения профилей пространственных распределений параметров морской экосистемы, если выразить в его уравнениях зависимость пространственных градиентов параметров от переменных экосистемы. На практике для этого требуется лишь замена производных от параметров по времени t производными вдоль выбранного в поле направления l . В этом варианте ABC -модель отражает адаптивный баланс (согласованность) пространственных сценариев (профилей) моделируемых процессов между собой и с заданными профилями внешних влияний.

Поставим своей целью построить оценки пространственных распределений биоресурса по данным о концентрации хлорофилла и поверхностной температуры моря. Обозначим $BR(l)$ – концентрацию биоресурса вдоль направления (траектории) l на поверхности моря. Интегральная ABC -модель морской экосистемы, используемая для оценки этого параметра, должна содержать в своем составе основные процессы, обеспечивающие существование биоресурса в поверхностном слое [2 – 3].

Будем считать, что состояние экосистемы характеризуется средними по верхнему слою моря значениями 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 правой части уравнения для фитопланктона будем использовать наблюдения поля концентрации хлорофилла $CH(l)$, полагая, что они оказывают определяющее влияние на концентрацию фитопланктона по сравнению с другими, не учитываемыми в модели процессами.

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 [4].

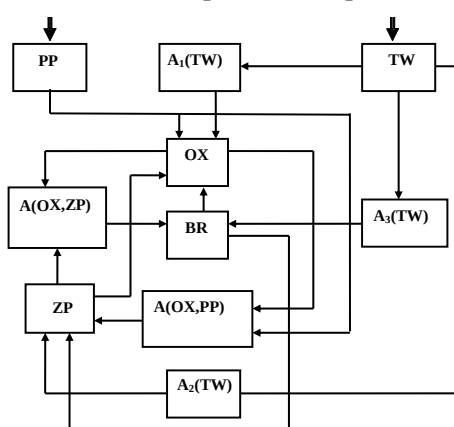


Рис. 1. Концептуальная модель для оценки пространственных распределений параметров экосистемы по данным дистанционного зондирования температуры и концентрации хлорофилла в верхнем слое моря.

Известно, что химические и биологические параметры экосистемы формируются при одновременном влиянии на них сразу нескольких факторов. Например, концентрация зоопланктона зависит от концентрации фитопланктона, кислорода и других характеристик морской среды, выступающих в роли ресурсов развития зоопланктона. Поэтому для более реалистичного описания условий формирования процессов в экосистеме в структуру ее модели должны быть включены агенты управления, учитывающие ресурсные ограничения развития этих процессов [1 – 3].

Будем использовать агенты ресурсного лимитирования концентраций зоопланктона по фитопланктону

и кислороду $A_{ZP}(PP, OX)$, а также биоресурса по зоопланктону и кислороду $A_{ZP}(ZP, OX)$. Кроме того, введем агентов, обеспечивающих зависимость концентраций кислорода, зоопланктона и биоресурса от температуры моря. При этих условиях концептуальная модель экосистемы может быть представлена схемой причинно-следственных связей, изображенной на рис.1.

Этой концептуальной модели соответствует следующая система уравнений пространственной ABC-модели вдоль направления l на морской поверхности [1 – 3]

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

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 опускается ниже предельно допустимого значения, агенты управления обращают его в нуль. Наиболее благоприятные для развития зоопланктона и биоресурса значения температуры верхнего слоя моря обозначены TW_{ZP}^* и TW_{BR}^* соответственно.

Тестирование вычислительного алгоритма модели экосистемы. В первом вычислительном эксперименте было выполнено тестирование модели экосистемы в условиях, когда пространственные профили измерений поверхностной температуры и концентрации хлорофилла представляют собой простые гармонические функции, изображенные на рис.2, а. Переменные мо-



Рис. 2. Результаты тестовых экспериментов по расчету пространственных распределений ненаблюдаемых параметров экосистемы с помощью АВС-модели.

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

Распределения параметров экосистемы, полученные в этом эксперименте, показаны на рис.2, б. Прежде всего, обращает на себя внимание сложный характер изменчивости этих сценариев по сравнению теми простыми гармоническими функциями внешних влияний, которые были поданы на вход вычислительного алгоритма модели. Доминирующее влияние на формирование сценария концентрации кислорода имело пространственное распределение температуры. Второй влияющий фактор – выделение кислорода фитопланктоном значительно усложнил этот сценарий.

Агент лимитирования $A_{ZP}(PP, OX)$ играл ведущую роль при формировании пространственного распределения зоопланктона, поскольку он ориентировал текущее значение концентрации $ZP(l)$ при движении в поле вдоль имитированной траектории на минимальное из двух значений: $PP(l)$ и $OX(l)$. Подобным же образом происходило формирование пространственного сценария концентрации биоресурса. Агент лимитирования $A_{BR}(ZP, OX)$ выбирал минимальное из двух значений $ZP(l)$ и $OX(l)$, о чем свидетельствуют, например, сценарии на рис.2, б для участка траектории (190, 220). На этом участке концентрация зоопланктона была ниже концентрации кислорода, вследствие чего сценарий биоресурса был подчинен сценарию зоопланктона.

Более сложные сценарии были получены во втором эксперименте, когда было поставлено дополнительное условие: концентрация фитопланктона не должна опускаться ниже предельно допустимого значения $PP_c = 3,3$. Как следует из рис.2, 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 значительному усложнению всех рассчитываемых пространственных сценариев. Об этом свидетельствует рис.2, в, на котором к зонам низкой концентрации фитопланктона приурочены зоны существенного падения концентраций зоопланктона и биоресурса, сопровождаемые подъемами значений концентрации кислорода.

Согласование модельных распределений параметров морской экосистемы по данным дистанционного зондирования морской поверхности. Рассмотренная выше *ABC*-модель морской экосистемы (1) была применена при проведении вычислительных экспериментов с использованием данных дистанционного зондирования северо-западного района Черного моря. Для поверхностной концентрации хлорофилла и температуры использовались сезонные данные спутниковых измерений в Черном море, полученные с помощью сканирующего оптического спектрометра *MODIS (Aqua)*. Данные второго уровня обработки [4], полученные из архива *GSFC* (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), были представлены в узлах квадратной сетки с шагом 10 км., покрывавшей район.

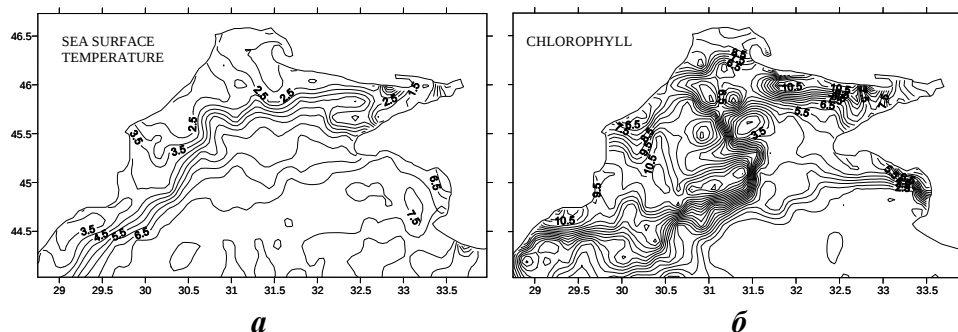
Применение *ABC*-моделей связано с заданием коэффициентов влияний, которые входят в уравнения моделей и учитывают взаимные связи между моделируемыми процессами. Для объективной оценки коэффициентов влияний в уравнениях модели экосистемы необходимо располагать рядами наблюдений всех параметров экосистемы вдоль некоторой траектории пролета спутника. С определенной погрешностью для этой цели могли бы 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 [5]. В реальности это едва ли выполнимо, так как такие данные требуют постановки специальных под спутниковых экспериментов.

При проведении расчетов по модели (1) коэффициенты влияний были выбраны из соображений компромисса между чувствительностью модели к используемым спутниковым измерениям полей *CH* и *TW* и устойчивостью вычислительного алгоритма модели. Косвенным подтверждением обоснованности подобного выбора могут служить известные из литературных источников зависимости концентраций зоопланктона и биоресурсов на северо-западном шельфе Черного моря от условий питания и концентрации кислорода в зимнее время года [6]. Используемые в расчетах значения коэффициентов приведены в табл.1.

Поля концентраций поверхностной температуры и хлорофилла, построенные по данным дистанционного зондирования морской поверхности, показаны на рис.3. Эти данные были использованы в вычислительных экспериментах по оценке пространственных распределений параметров морской экосистемы *ABC*-методом.

Таблица 1. Значения коэффициентов влияний, использованные в расчетах.

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



Р и с . 3 . Используемые в расчетах поля концентраций поверхностной температуры (а) и хлорофилла (б), построенные по данным дистанционного зондирования морской поверхности.

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 были построены профили пространственных распределений параметров экосистемы вдоль отдельных направлений. Были выполнены два варианта расчетов: без установления границ зон гомеостазиса для живых объектов экосистемы и с установленными границами. Агенты лимитирования концентраций зоопланктона $A_{ZP}(PP, OX)$ и биоресурса $A_{ZP}(PP, OX)$ были включены в каждом из этих вариантов. Примеры полученных зональных профилей этих параметров, рассчитанные на широте $45^{\circ}47'$, показаны на рис.4 и 5.

Для учета границ зон гомеостазиса живых организмов в модели (1) были установлены предельные значения концентраций для фито-, зоопланктона и кислорода $PP_c = ZP_c = OX_c = 6$. При достижении этих величин концентраций агенты управления в модели начинали имитировать вымирание соответствующих объектов экосистемы, резко понижая их концентрации в морской среде.

Сопоставляя пространственную изменчивость концентраций кислорода, фито- и зоопланктона, а так же биоресурса на широте $45^{\circ}47'$ с исходными полями температуры и концентрации хлорофилла, изображенными на рис.3, можно видеть, что они находятся в качественном согласии с распределениями исходных полей. Результаты действия агентов лимитирования можно проследить по профилям, изображенным на рис.4. Так, например, график концентрации зоопланктона на рис.4, б отчетливо следует за минимальным из двух ресурсных для него значений: фитопланктона или кислорода. Отсутствие значительного разброса величин параметров относительно общего для них среднего значения свидетельствует о том, что использованные в модельных расчетах коэффициенты влияний (табл.1) были выбраны правильно. Как и ожидалось, учет границ зон гомеостазиса привел к увеличению пространственной изменчивости параметров экосистемы.

Вторая серия экспериментов имела целью построение карт пространственных распределений параметров экосистемы по данным дистанционного зондирования, изображенным на рис.3. Модель экосистемы (1) была последовательно применена с этими данными наблюдений на всех широтных раз-

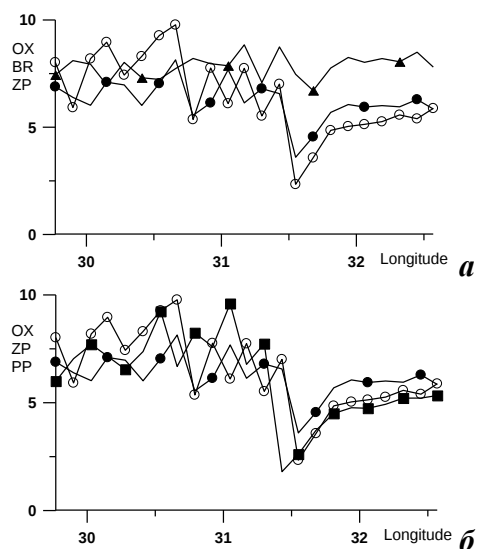


Рис. 4. Пространственные распределения параметров экосистемы на широте 45°47', рассчитанные по модели (1) с использованием данных наблюдений, приведенных на рис.3, без учета границ зон гомеостазиса живых организмов: (а) ○ – OX; ● – ZP; ▲ – BR; (б) ○ – OX; ● – ZP; ■ – PP.

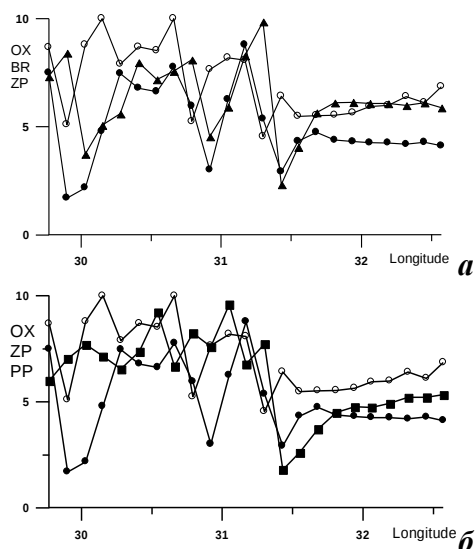


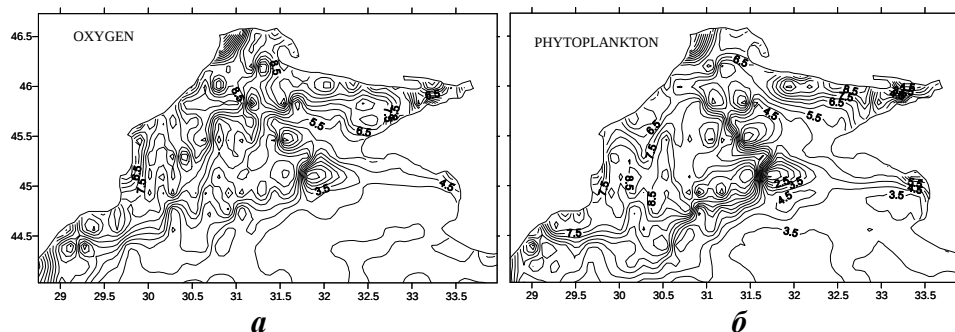
Рис. 5. Пространственные распределения параметров экосистемы на широте 45°47', рассчитанные по модели (1) с использованием данных наблюдений, приведенных на рис.3, с учетом границ зон гомеостазиса живых организмов: (а) ○ – OX; ● – ZP; ▲ – BR; (б) ○ – OX; ● – ZP; ■ – PP.

резах полей поверхностной температуры и концентрации хлорофилла. Построенные карты пространственных распределений параметров экосистемы приведены на рис.

В соответствии с моделью (1) распределения концентрации фитопланктона определялись исключительно данными спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла. Поэтому карты этих полей (рис.3, б и рис.6, б) практически идентичны. Иная ситуация была характерна для распределений концентрации кислорода, так как они одновременно находились под влиянием данных наблюдений по хлорофиллу и температуре. Поэтому карта концентраций кислорода, приведенная на рис.6, а, заметно отличается от карты концентраций фитопланктона и отражает на себе влияние изолиний температурного поля.

Карта концентраций зоопланктона, сформированная под влиянием агента лимитирования этих концентраций по фитопланктону и кислороду, показана на рис.7, а. 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 районе 46° с.ш., 30,5° в.д., а также в районе 45° с.ш., 32° в.д., прослеживаются и на карте концентрации биоресурса, приведенной на рис.7, б.

Влияние учета границ зон гомеостазиса демонстрируют карты зоопланктона и биоресурса, приведенные на рис.8. По сравнению с результатами расчетов без использования этих границ (рис.7) изменчивость полей

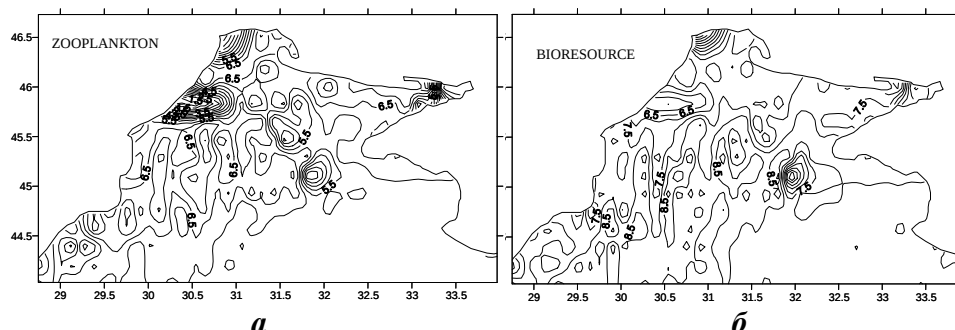


Р и с . 6. Карты концентраций кислорода (а) и фитопланктона (б) построенные методом адаптивного баланса влияний при помощи модели экосистемы (1) без учета границ зон гомеостазиса.

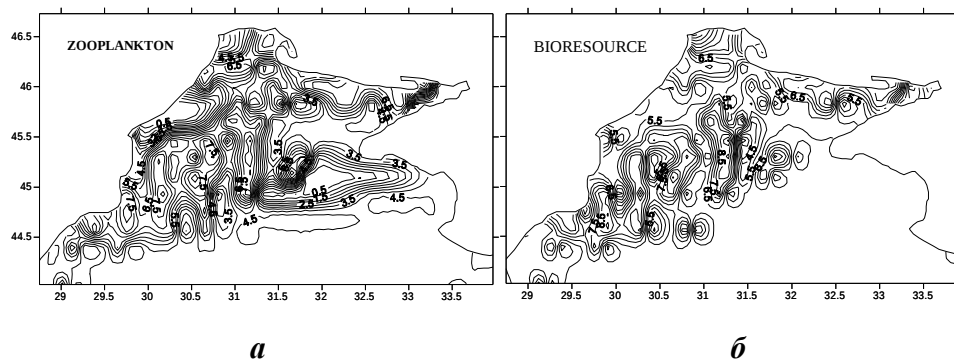
существенно увеличилась. Таким образом, предложенный алгоритм получения оценок пространственных полей позволил произвести пересчет данных наблюдений поверхностной температуры и концентраций хлорофилла в иные не наблюдаемые параметры экосистемы.

Заключение. Вычислительные эксперименты подтвердили возможность непосредственного включения спутниковых данных в уравнения численных моделей морских экосистем, построенных *АВС*-методом. Пространственно-временная изменчивость полей морских экосистем является результатом стремления живых объектов экосистемы приспособиться к процессам в окружающей их морской среде. Поэтому поля параметров морских экосистем находятся в динамическом равновесии друг с другом и с внешними влияниями, приложенными к экосистеме.

Этим объясняется возможность заменить в уравнениях *АВС*-модели скорости изменения параметров их пространственными производными вдоль выбранных направлений в поле. В силу быстрой сходимости итерационных алгоритмов решений уравнений *АВС*-моделей морских экосистем подобные модели могут быть использованы при расчете ненаблюдаемых параметров экосистем путем усвоения данных дистанционных наблюдений вдоль отдельных направлений на морской поверхности.



Р и с . 7. Карты концентраций зоопланктона (а) и биоресурса (б), построенные методом адаптивного баланса влияний при помощи модели экосистемы (1) без учета границ зон гомеостазиса.



а **б**

Р и с . 8 . Карты концентраций зоопланктона (а) и биоресурса (б), построенные методом адаптивного баланса влияний при помощи модели экосистемы (1) с учетом границ зон гомеостаза

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.— 225 с.
2. Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е. Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.— 258 с.
3. Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Моделирование эколого-экономических систем.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.— 320 с.
4. Пухтыр Л.Д., Станичный С.В., Тимченко И.Е. Оптимальная интерполяция данных дистанционного зондирования морской поверхности // Морской гидрофизический журнал.— 2009.— № 4.— С.34-50.
5. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика.— М.: Наука, 1965, 1967.— т.1.— 630 с.— т.2.— 720 с.
6. Ковалев А.В., Финенко З.З., Островская Н.А. и др. Планктон Черного моря.— Киев.: Наукова думка, 1993.— 280 с.

Материал поступил в редакцию 10.10.2010 г.