

Моделирование полей экосистемы верхнего слоя моря методом адаптивного баланса влияний

© 2016 И.Е. Тимченко, И.П. Лазарчук, И.К. Иващенко,
Е.М. Игумнова

Поступила в редакцию 08.10.2015 г. После доработки 14.10.2015 г.

Рассмотрен метод построения полей экосистемы верхнего слоя моря, в основе которого лежат отрицательные обратные связи в модели экосистемы, обеспечивающие взаимную адаптацию биохимических процессов с учетом ресурсных ограничений и внешних влияний. В качестве источников внешних влияний использованы данные спутниковых наблюдений поверхностной температуры моря и концентрации хлорофилла a , а также оценки адвекции и диффузии моделируемых субстанций, рассчитанные по гидродинамической модели. Метод иллюстрирован примерами построения карт полей концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и кислорода для района северо-западного шельфа Черного моря. Карты полей построены по сценариям годового хода концентраций, рассчитанным в узлах сеточной области, покрывавшей этот район. Сделан вывод о целесообразности применения адаптивных моделей экосистем для получения оценок пространственных распределений концентраций биохимических субстанций экосистемы верхнего слоя моря.

Ключевые слова: метод адаптивного баланса влияний, морская экосистема.

Введение. Исследования полей экосистемы верхнего слоя моря представляют как научный, так и практический интерес ввиду динамической активности и высокой биологической продуктивности морской среды этого слоя. Для построения карт полей биохимических характеристик экосистемы обычно применяются численные модели высокого разрешения, в которых концентрации биологических объектов и химических веществ рассчитываются по уравнениям в частных производных, описывающим перенос и диффузию веществ в море [1]. На основе этих же уравнений усваиваются спутниковые данные, в частности методом адаптивной статистики [2]. Благодаря возможности спутникового контроля за некоторыми характеристиками верхнего слоя моря, содержательные результаты по картированию полей экосистемы этим способом получены в работах по оперативной океанографии Черного моря [3].

Наряду с расчетом биохимических полей в численных динамических моделях морской среды, возможен двухэтапный способ построения карт этих полей верхнего слоя моря [4]. На первом этапе выполняются расчеты течений по гидродинамической модели, позволяющие построить оценки адвекции и диффузии в узлах сеточной области, покрывающей исследуемый район. На втором – эти оценки, а также данные спутниковых наблюдений используются в качестве источников внешних влияний в специальной модели экосистемы, которая имеет свойство локальной адаптации к этим оценкам и спутниковым данным. Локальная адаптация означает автоматическую подстройку переменных модели экосистемы к усваиваемой информации, которая происходит

благодаря отрицательным обратным связям между переменными модели экосистемы и скоростями изменения этих переменных. Это обстоятельство дает основание называть подобные модели экосистем адаптивными [5]. В частности, в работе [4] рассмотрено усвоение имитированных данных о переносе и диффузии в адаптивной модели морской экосистемы, описывающей сценарии биохимических процессов в отдельной точке верхнего слоя моря.

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы показать возможности двухэтапного построения карт биохимических полей методом локальной адаптации переменных модели экосистемы. Мы не ставим перед собой задачу подробного описания биохимических процессов верхнего слоя моря. Поэтому в качестве концептуальной модели экосистемы выбрана простейшая схема причинно-следственных связей, включающая концентрации фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и растворенного кислорода. Кроме этих основных элементов структуры модели, в нее входят агенты ресурсного лимитирования роста концентраций гидробионтов и упомянутые выше источники внешних влияний.

Общие уравнения адаптивной модели экосистемы и алгоритмы вычислений. Адаптивная модель морской экосистемы представляет множество взаимосвязанных процессов $\{u_i\}$, удовлетворяющих условию динамического баланса внутрисистемных и внешних влияний [6]. Динамический баланс основан на стремлении живых организмов экосистемы приспособиться к меняющимся условиям окружающей среды. Назовем «реакциями» любые взаимодействия процессов в экосистеме, результатом которых являются изменения значений переменных u_i в модели экосистемы. Осуществление реакций предполагает наличие в природной среде всех необходимых компонентов, т. е. ресурсов, объемы которых всегда ограничены. Мы будем называть это лимитирующее свойство окружающей среды ее «ресурсной емкостью» по отношению к той переменной модели экосистемы, которая представляет продукт реакции.

Поскольку все биохимические процессы в экосистемах представлены концентрациями веществ в морской среде, переменные модели экосистемы должны иметь неотрицательные значения. Это означает, что в результате реакций происходит отклонение значений переменных от некоторых средних величин C_i , характеризующих стационарное состояние системы. Поэтому переменные u_i имеют интервалы изменчивости $(0; 2C_i)$, а их ресурсными емкостями являются величины $2C_i$. Естественно предположить, что модели природных экосистем, находящихся в статическом равновесии с окружающей средой, имеют в качестве стационарного состояния множество средних значений $\{C_i\}$ и что изменения в окружающей среде приводят к отклонениям от этого состояния.

Будем называть модели экосистем адаптивными, если при наличии внешних воздействий модель стремится к состоянию динамического равновесия с ними. В адаптивных моделях происходит взаимное приспособление значений переменных модели друг к другу и к внешним влияниям, и система уравнений модели «отслеживает» переменные внешние влияния, поддерживая с ними состояние динамического баланса.

В работе [5] предложен метод адаптивного баланса влияний (*Adaptive Balance of Causes – ABC-метод*), который обеспечивает построение системы уравнений модели экосистемы, обладающих свойством динамического приспособления к переменным внешним воздействиям. Математическая модель адаптивной системы представляет собой обыкновенные дифференциальные уравнения специального вида, у которых скорости изменения переменных связаны отрицательными обратными связями с квадратами переменных (обратные связи второго порядка).

Представим реакции в экосистеме в виде преобразований (не обязательно линейных) ресурсов u_j в продукты u_i в присутствии внешних влияний A_i :

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

где a_{ij} – коэффициенты внутрисистемных влияний. Эти преобразования выражают собой балансы масс веществ, участвующих в реакциях. Система модульных уравнений *ABC-метода* построена таким образом, чтобы балансовые соотношения (1) выполнялись одновременно для всех переменных модели u_i [5]:

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

здесь r_i – удельные скорости изменения функций u_i .

Из системы уравнений (2) следует, что ее стационарное решение достигается при

$$u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j - A_i = C_i \quad (3)$$

и удовлетворяет условию сохранения баланса влияний (1). Это означает, что в процессе адаптации переменные модели экосистемы принимают такие значения, которые дополняют алгебраические суммы внутрисистемных $\sum_{j \neq i} a_{ij} u_j$

и внешних A_i влияний до значений, равных половине величин ресурсных емкостей $2C_i$. Под воздействием переменных внешних влияний происходит отклонение величин u_i от их стационарных значений C_i , в результате чего образуются новые устойчивые состояния динамического баланса влияний (1). Этот вывод подтвержден вычислительными экспериментами с уравнениями (2), проведенными в работах [5 – 7].

Общие уравнения *ABC-метода* (2) дополнены логическими условиями (агентами управления), в которых учитываются ресурсные ограничения прохождения реакций. Одно из этих ограничений предотвращает выход решений уравнений за пределы заданных интервалов изменчивости процессов, описываемых моделью экосистемы:

$$u_i = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)]. \quad (4)$$

Еще при одном ограничении учитываются те случаи, когда формирование продукта реакции происходит при одновременном использовании нескольких видов ресурсов. Так, например, для роста концентрации зоопланктона в морской среде необходимо одновременное потребление зоопланктоном фитопланктона, кислорода, соединений азота и других веществ. В каждый из моментов времени запасы одного из этих видов ресурсов являются минимальными по отношению к другим видам ресурсов. Этот минимальный вид ресурса будет лимитировать увеличение концентрации зоопланктона.

Для того чтобы учесть это обстоятельство, в уравнения *ABC*-модели экосистемы включены агенты управления $AG_i \operatorname{arg\,min}(a_{ik}u_k, \dots, a_{in}u_n)$:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j - AG_i \operatorname{arg\,min}(a_{ik}u_k, \dots, a_{in}u_n) - A_i \right] \right\}, \quad (5)$$

$$AG_i \operatorname{arg\,min} = IF(a_{il}u_l = M_l; a_{il}u_l; 0), \quad M = \min(a_{ik}u_k, \dots, a_{il}u_l, \dots, a_{in}u_n). \quad (6)$$

Как показал опыт применения *ABC*-метода для построения адаптивных моделей морских экосистем [7], решения уравнений (5) с ограничениями (4) быстро сходятся к устойчивым значениям при условии правильного выбора коэффициентов влияний a_{ij} . Эти коэффициенты учитывают, какое количество ресурса u_j необходимо для приращения на единицу количества продукта u_i . При этом следует иметь в виду, что приращения могут быть как положительными, так и отрицательными. Отрицательные приращения означают не увеличение, а уменьшение количества продукта u_i , когда ресурс u_j расходуется (поглощает) продукт.

Существует несколько способов оценки коэффициентов влияний в адаптивных моделях морских экосистем. Все они основаны на априорной информации о функциональных связях между процессами в экосистеме, участвующими в реакциях. Если $u_i = u_i(u_j) = a_{ij}u_j$, то

$$a_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial u_j}. \quad (7)$$

Когда имеются временные ряды наблюдений u_i и u_j , оценки коэффициентов влияний могут быть получены путем регрессионного анализа. В работе [6] показано, что коэффициенты влияний, связанные балансовыми соотношениями (1), сами образуют систему причинно-следственных связей, в которой они выполняют роли переменных, соединенных между собой корреляционными зависимостями. Это дает основание рассматривать коэффициенты $\{a_{ij}\}$ как стационарное состояние *ABC*-модели системы коэффициентов влияний следующего вида:

$$\frac{da_{ij}}{dt} = a_{ij} \{ 1 - 2[a_{ij} - R_{jj}^{-1}(R_{ij} - \sum_{k=1}^n a_{ik}R_{ki} - \sum_{l=1}^n a_{il}G_{lj})] \} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), (i \neq j), \quad (8)$$

где использованы взаимные корреляционные функции процессов u_i , u_j и A_i :

$$R_{ij} = E\{u_i u_j\}, G_{ij} = E\{u_i A_j\}.$$

Если данных наблюдений достаточно для того, чтобы построить систему уравнений (8), то коэффициенты влияний эволюционируют во времени вместе с наблюдаемыми корреляционными связями, что повышает чувствительность модели к внешним влияниям и потенциально увеличивает ее адекватность реальным процессам в экосистеме.

Минимальный объем априорной информации, необходимой для оценки коэффициентов влияний, содержится в средних значениях C_i переменных ABC -модели. Поскольку в уравнениях (2) выполняются балансовые соотношения (1), суммы положительных и отрицательных влияний не должны выходить за пределы интервалов $(-C_i; C_i)$. Это означает, что суммы как положительных, так и отрицательных коэффициентов не могут быть больше по модулю, чем 0,5. Тогда для лимитирующего ресурса оценка значений коэффициентов влияний может быть найдена из условия нормировки

$$a_{ij} = \frac{1}{2C_j \sum_{k=1}^m \frac{1}{C_k}}, \quad (9)$$

где m – число влияний одного знака в уравнении системы (2).

Вычислительный алгоритм решения системы уравнений (2) может быть легко реализован по схеме Эйлера. Так, например, если принять в качестве дополнительного условия $2C_i r_i \Delta t = 1$, где Δt – шаг вычислений по времени, то конечно-разностный вариант уравнений (2) можно записать в виде

$$u_i^{k+1} = 2u_i^k [1 - 0,1(u_i^k - \sum_{j \neq i} a_{ij} u_j^k - A_i^k)]. \quad (10)$$

Уравнения (10) представляют сценарии процессов u_i на интервале безразмерных значений (0; 10). Для возврата к размерным значениям достаточно умножить решения этих уравнений на $0,2 C_i$.

Адаптивная модель экосистемы верхнего слоя моря. Построение модели естественно начать с составления балансовых соотношений (1). Поскольку задача данного исследования заключается в проверке способа двухэтапного построения карт полей верхнего слоя моря, из множества биохимических реакций выбрано минимальное их количество, достаточное, чтобы пояснить идею картирования полей. В качестве компонентов u_i и u_j соотношений (1) использованы концентрации фитопланктона PP , зоопланктона ZP , биоресурса BR и кислорода OX в морской среде, причем под концентрацией биоресурса понимаются все живые объекты, находящиеся выше зоопланктона в пищевой цепи. В качестве внешних влияний A_i использованы оценки адвекции и диффузии, полученные из расчетов составляющих скорости течений u , v и w по гидродинамической модели, а также данные спутниковых измерений концентраций CH хлорофилла a и поверхностной температуры TW . Схема внутрисистемных и внешних влияний (концептуальная модель) экосистемы приведена на рис. 1.

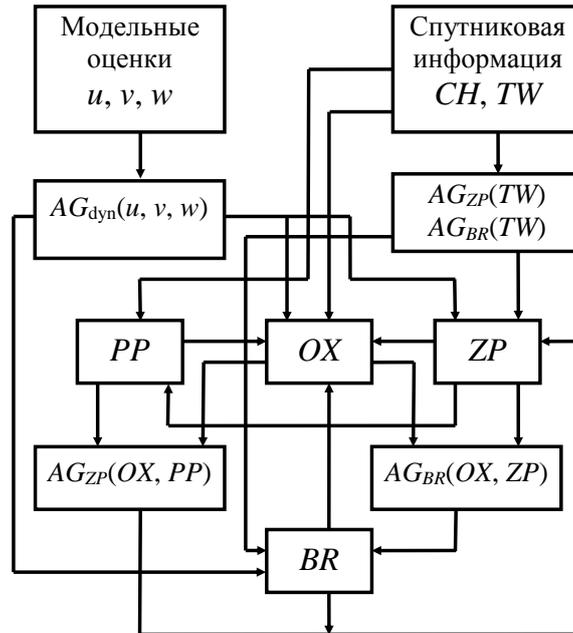


Рис. 1. Концептуальная модель экосистемы верхнего слоя моря

В модели экосистемы присутствуют агенты ресурсного лимитирования (6) концентраций гидробионтов пищевой цепи $AG_{ZP}(OX, PP)$ и $AG_{BR}(OX, ZP)$, агенты учета изменений концентраций кислорода $AG_{dyn}(OX)$, зоопланктона $AG_{dyn}(ZP)$ и биоресурса $AG_{dyn}(BR)$ в результате адвекции и диффузии этих веществ, а также агенты, учитывающие влияние сезонного хода температуры верхнего слоя моря на концентрации зоопланктона $AG_{ZP}(TW)$ и биоресурса $AG_{BR}(TW)$.

Общие уравнения ABC-метода (5) использованы для построения системы уравнений адаптивной модели экосистемы, соответствующих концептуальной модели (рис. 1). Для удобства сравнения сценариев процессов переменные модели представлены в безразмерном виде и приведены к общему интервалу изменчивости (0; 10). При этом средние значения всех переменных стали одинаковыми ($C_i = 5$), а удельные скорости изменения переменных были приняты равными единице ($r_i = 1$). Уравнения адаптивной модели экосистемы приняли следующий вид:

$$\frac{dPP}{dt} = 2PP[5 - (PP - a_{PP/CH}CH + a_{PP/ZP}ZP)], \quad (11)$$

$$\frac{dOX}{dt} = 2OX\{5 - [OX - AG_{dyn}(OX) + a_{OX/BR}BR + a_{OX/ZP}ZP - a_{OX/PP}PP + a_{OX/TW}TW]\}, \quad (12)$$

$$AG_{\text{dyn}}(OX) = a_{\text{adv}}OX_{\text{adv}} + a_{\text{dif}}OX_{\text{dif}}, \quad (13)$$

$$\frac{dZP}{dt} = 2ZP\{5 - [ZP - AG_{\text{dyn}}(ZP) + a_{ZP/BR}BR - AG_{ZP}(OX, PP) - AG_{ZP}(TW)]\}, \quad (14)$$

$$AG_{\text{dyn}}(ZP) = a_{\text{adv}}ZP_{\text{adv}} + a_{\text{dif}}ZP_{\text{dif}}, \quad (15)$$

$$AG_{ZP}(OX, PP) = IF[M_{ZP} = a_{ZP/OX}OX; a_{ZP/OX}OX; 0] + IF[M_{ZP} = a_{ZP/PP}PP; a_{ZP/PP}PP; 0], \quad (16)$$

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

$$AG_{ZP}(TW) = a_{ZP/TW} \exp[-\alpha_{ZP}(TW - TW_{ZP}^*)^2], \quad (17)$$

$$\frac{dBR}{dt} = 2BR\{5 - [BR - AG_{\text{dyn}}(BR) - AG_{BR}(OX, ZP) - AG_{BR}(TW)]\}, \quad (18)$$

$$AG_{\text{dyn}}(BR) = a_{\text{adv}}BR_{\text{adv}} + a_{\text{dif}}BR_{\text{dif}}, \quad (19)$$

$$AG_{BR}(OX, ZP) = IF[M_{BR} = a_{BR/OX}OX; a_{BR/OX}OX; 0] + IF[M_{BR} = a_{BR/ZP}ZP; a_{BR/ZP}ZP; 0], \quad (20)$$

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

$$AG_{BR}(TW) = a_{BR/TW} \exp[-\alpha_{BR}(TW - TW_{BR}^*)^2]. \quad (21)$$

В уравнениях (11) – (21) агенты $AG_{\text{dyn}}(OX)$, $AG_{\text{dyn}}(ZP)$ и $AG_{\text{dyn}}(BR)$ учитывают изменения концентраций кислорода, зоопланктона и биоресурса соответственно, происходящие в единичном объеме морской среды вследствие адвекции и диффузии веществ в этом объеме. Агенты $AG_{ZP}(TW)$ и $AG_{BR}(TW)$ контролируют степень влияния температуры верхнего слоя моря на изменение концентраций зоопланктона и биоресурса соответственно. При значениях $TW_{ZP}^* = TW_{BR}^* = 26^\circ\text{C}$ устанавливаются наиболее благоприятные температурные условия для роста этих концентраций.

Заметим, что адвекция и диффузия фитопланктона косвенным образом учтены в уравнении (11), так как в качестве источника внешнего влияния в нем использованы данные спутниковых измерений концентрации CH хлорофилла a , сформированной под влиянием адвекции и диффузии. Через систему уравнений модели это влияние распространяется и на другие переменные модели. Однако оно является незначительным ввиду того, что с каждым переходом к новой реакции влияние прежних ресурсных факторов ослабевает. В этом обстоятельстве кроется смысл включения адвекции и диффузии во все остальные уравнения модели. Скорости течений и коэффициенты турбулент-

ного обмена, взятые из расчетов по гидродинамической модели, вносят в модель экосистемы дополнительную информацию о динамике среды, поскольку при расчете течений используются данные наблюдений полей температуры и солености, касательного напряжения трения ветра и потоков тепла на поверхности моря, а также граничные условия и т. д. Поэтому агенты управления $AG_{dyn}(OX)$, $AG_{dyn}(ZP)$ и $AG_{dyn}(BR)$ в уравнениях (12), (14) и (18) являются дополнительными источниками внешних влияний на изменения концентраций веществ.

Применение адаптивной модели экосистемы для картирования полей верхнего слоя в районе северо-западного шельфа Черного моря. Рассмотренная выше адаптивная модель экосистемы применена к расчету карт полей концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и кислорода для района северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ ЧМ). Для инициализации модели использованы данные литературных источников, дающие примерные оценки средних значений C_{PP} , C_{ZP} , C_{BR} , C_{OX} соответствующих полей концентраций.

На рис. 2 показаны данные наблюдений, характеризующие динамику биомасс фитопланктона и кормового зоопланктона в 1954 – 2007 гг. Эти данные позволяют принять в качестве оценок средних значений полей следующие величины концентраций: $C_{PP} = 6 \text{ г/м}^3$ и $C_{ZP} = 0,2 \text{ г/м}^3$.

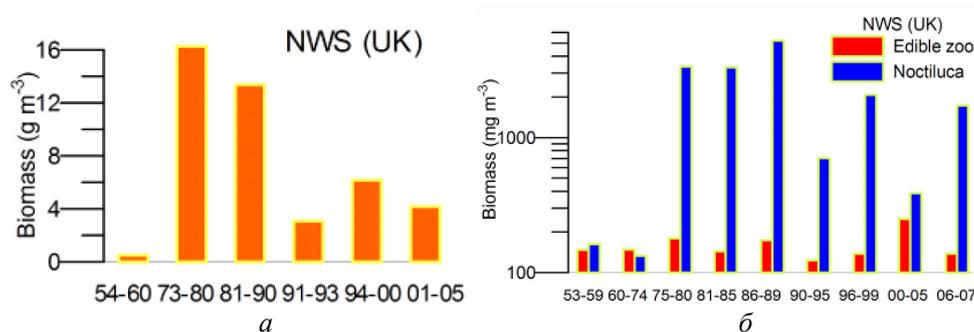


Рис. 2. Изменение биомассы фитопланктона (г/м^3) в 1954 – 2005 гг. [8] (а) и биомасс (мг/м^3) кормового зоопланктона и *Noctiluca scintillans* в 1953 – 2007 гг. [9] (б) в СЗШ ЧМ

Данные наблюдений за концентрациями биоресурса весьма разрозненны и относятся в основном к приустьевым районам Дуная и Днепра. Для приближенной оценки величины C_{BR} использованы результаты наблюдений за биомассой кормового и желетелого зоопланктона в этих районах, приведенные на рис. 3. Основываясь на этих данных, а также на материалах работы [10], в качестве оценки среднего значения концентрации биоресурса взята величина $C_{BR} = 0,1 \text{ г/м}^3$.

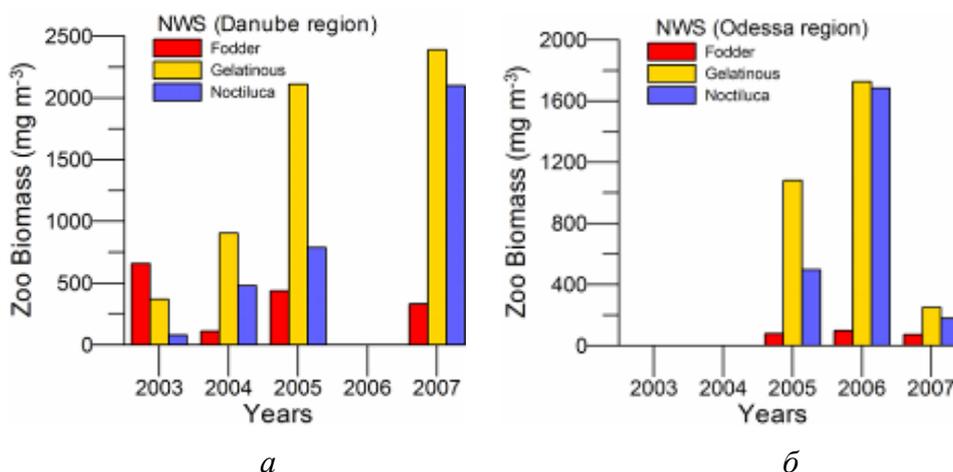


Рис. 3. Биомасса (mg/m^3) кормового, желетелого зоопланктона и *Noctiluca scintillans* в Дунайском (а) и Одесском (б) регионах на протяжении 2003 – 2007 гг. [9]

В литературных источниках содержится большое количество данных о концентрации кислорода для района СЗШ ЧМ. Отмечено, что лето является временем наименьшего абсолютного содержания кислорода на всей акватории района и во всей толще вод, что обусловлено повышением температуры и соответственно скоростей биохимических процессов. При этом концентрации кислорода, даже на поверхности, уменьшаются примерно на 2 мл/л в приустьевых районах и примерно на 1 мл/л – в мористых, составляя в среднем величины 5,94 и 6,15 мл/л. Наиболее вероятный диапазон изменчивости концентраций кислорода в приустьевых районах составляет 5,6 – 7,0 мл/л. В зимний период времени в приустьевых районах рек наблюдались максимальные значения концентраций 8,2 – 8,8 мл/л. Поэтому в качестве оценки среднегодового значения концентрации кислорода принята величина, эквивалентная $C_{Ox} = 7$ мл/л [11, 12].

Полученные приближенные оценки средних значений концентраций позволили рассчитать коэффициенты внутрисистемных влияний в модели экосистемы по формуле (10). Коэффициенты внешних влияний концентрации CH хлорофилла a и температуры воды TW подобраны из соображений устойчивости вычислений. Их абсолютные значения приведены в таблице.

Значения коэффициентов внутрисистемных и внешних влияний

| $a_{MM/NN}$ | PP | OX | ZP | BR | CH | TW |
|-------------|------|------|------|------|------|------|
| PP | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,8 | 0 |
| OX | 0,5 | 1 | 0,3 | 0,2 | 0 | 0,9 |
| ZP | 0,27 | 0,23 | 1 | 0,5 | 0 | 0,6 |
| BR | 0 | 0,14 | 0,49 | 1 | 0 | 0,6 |

Для построения карт полей экосистемы верхнего слоя моря в районе СЗШ ЧМ использованы сценарии внутригодовой изменчивости концентраций хлорофилла a , температуры и горизонтальной скорости течений, рассчитанные для каждого узла квадратной сетки с шагом 5 км, покрывавшей этот район, по данным спутниковых наблюдений за 2012 г., размещенных на сайте <http://www.myocean.eu/> [13]. Сеточная область состояла из 4004 узлов. Расчеты полей экосистемы проведены на 366 временных шагов вычислений (суток).

Вычисления переменных экосистемы выполнены в два этапа. Первоначально уравнения модели (11) – (21) решались в каждом узле сеточной области без учета адвекции и диффузии, в результате чего были рассчитаны сценарии внутригодовой изменчивости всех параметров экосистемы, по которым затем построены карты пространственных распределений концентраций веществ на каждые сутки. Эти данные вместе с расчетами горизонтальных течений были использованы для получения оценок адвекции и диффузии в каждом узле сеточной области на каждые сутки эксперимента. Адвекция и диффузия вычислялись по стандартным конечно-разностным формулам.

На втором этапе с помощью модели (11) – (21) была выполнена локальная адаптация переменных модели к полученным оценкам адвекции и диффузии. Эти оценки вошли в агенты управления (13), (15) и (19), причем коэффициенты влияний в агентах управления AG_{dyn} имели смысл временных интервалов, в течение которых формировались адвективные и диффузионные добавки к концентрациям веществ. Таким образом, оценки адвекции и диффузии послужили дополнительными источниками внешних влияний в уравнениях модели экосистемы.

Влияние внешних факторов на переменные экосистемы прослеживается во временных сценариях во всех узлах сеточной области. В качестве примера на рис. 4 приведены временные сценарии процессов в экосистеме, построенные для точки с координатами $45^{\circ} 22'$ с. ш., $30^{\circ} 22'$ в. д.

Из анализа графиков на рис. 4, *a* следует, что основной вклад в изменчивость биохимических процессов внесли данные о концентрациях хлорофилла a и сезонном ходе температуры моря. Как и следовало ожидать, наиболее чувствительным к внешним влияниям оказался сценарий концентрации фитопланктона PP . Заметно повлиял на сценарий концентрации кислорода OX летний максимум температуры. В то же время этот максимум не повлиял на сценарии концентраций зоопланктона ZP и биоресурса BR вследствие ресурсных ограничений роста концентраций, которые выполняли агенты управления $AG_{ZP}(OX, PP)$ и $AG_{BR}(OX, ZP)$. Поскольку в данном узле сеточной области практически в течение всего года наблюдались минимальные значения концентрации кислорода, сценарии концентраций ZP и BR находились под влиянием концентрации OX .

Влияние адвекции на сценарии без учета диффузии показано на рис. 4, *б*. Это влияние оказалось довольно слабым. Оно проявилось в увеличении изменчивости концентраций фитопланктона и кислорода. Несколько больший эффект имело влияние диффузии без учета адвекции, которое показано на рис. 4, *в*. В обоих случаях изменения коснулись сценариев фитопланктона и кислорода.

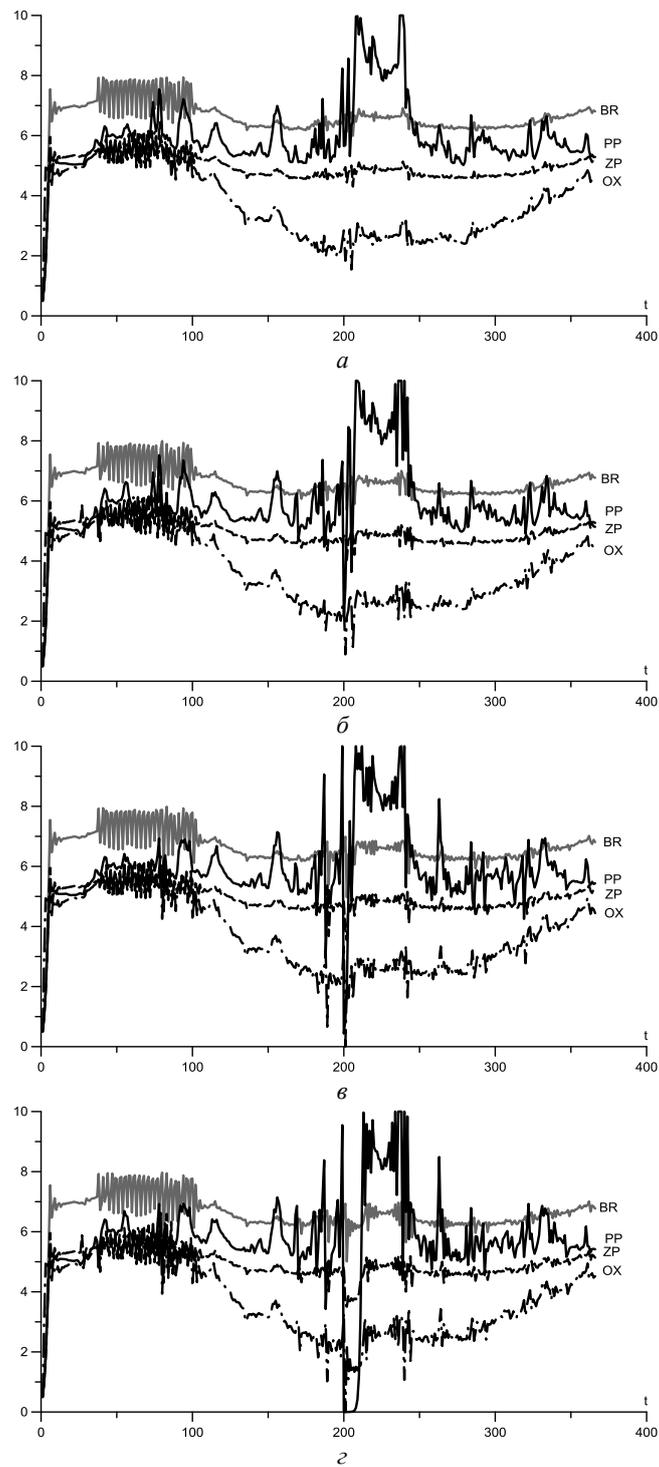


Рис. 4. Сценарии процессов в экосистеме в течение года, рассчитанные в безразмерных единицах для точки с координатами $45^{\circ} 22'$ с. ш., $30^{\circ} 22'$ в. д.: *а* – без учета адвекции и диффузии, *б* – с учетом адвекции, *в* – с учетом диффузии, *г* – с учетом адвекции и диффузии

Сценарии на рис. 4, *г* демонстрируют совместный эффект учета адвекции и диффузии. Особенностью этих сценариев является резкий минимум концентрации фитопланктона, сформировавшийся на 210-е сут вычислений. Этот минимум отсутствует на рис 4, *а*, что подтверждает его зависимость от динамических процессов в море. Агенты ресурсного лимитирования трансформировали минимум концентрации фитопланктона *PP* в минимумы концентраций зоопланктона *ZP* и биоресурса *BR*.

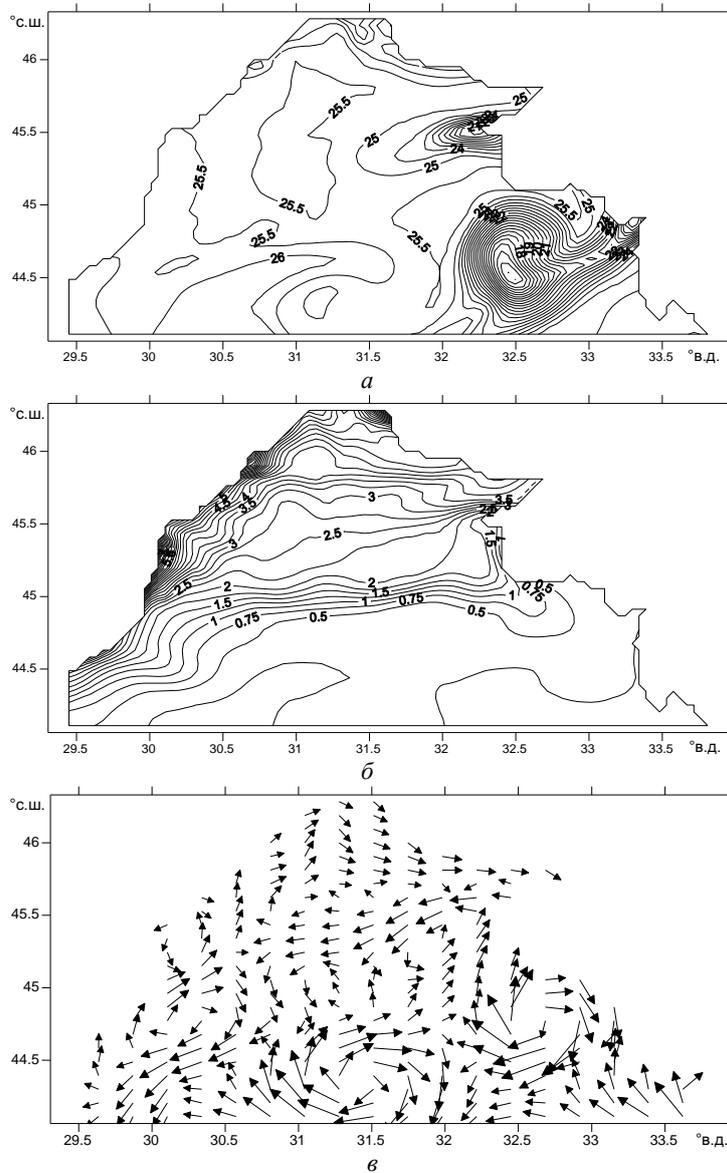


Рис. 5. Карты полей поверхностной температуры, °C (*а*) и концентраций хлорофилла *a*, мг/м³ (*б*) в верхнем слое моря, построенные на 210-е сут года по данным спутниковых наблюдений в районе СЗШ ЧМ, и карта поля горизонтальных течений в верхнем слое моря, построенная по данным численного моделирования (*в*) (стрелка максимальной длины соответствует скорости 30 см/с)

Анализ временных сценариев переменных экосистемы подтвердил чувствительность модели к спутниковой информации и данным о динамике морской среды, полученным из расчетов по гидродинамической модели. Используемые в вычислительных экспериментах коэффициенты влияния были применены на втором этапе вычислений при расчетах сценариев во всех узлах сеточной области для построения карт полей экосистемы.

Для анализа пространственных распределений концентраций выбраны четыре момента времени: 45, 65, 210 и 325-е сут вычислений. В силу отмеченной аномалии сценария фитопланктона, приходящейся на 210-е сут расчета, ниже приводятся карты полей, построенные на этот момент времени. На рис. 5, *а, б* приведены карты полей поверхностной температуры и концентраций хлорофилла *а*, построенные на 210-е сут года по данным спутниковых наблюдений в районе СЗШ ЧМ на этот период времени. Карта поля горизонтальных течений в верхнем слое моря, построенная по данным гидродинамического моделирования района [13], показана на рис. 5, *в*.

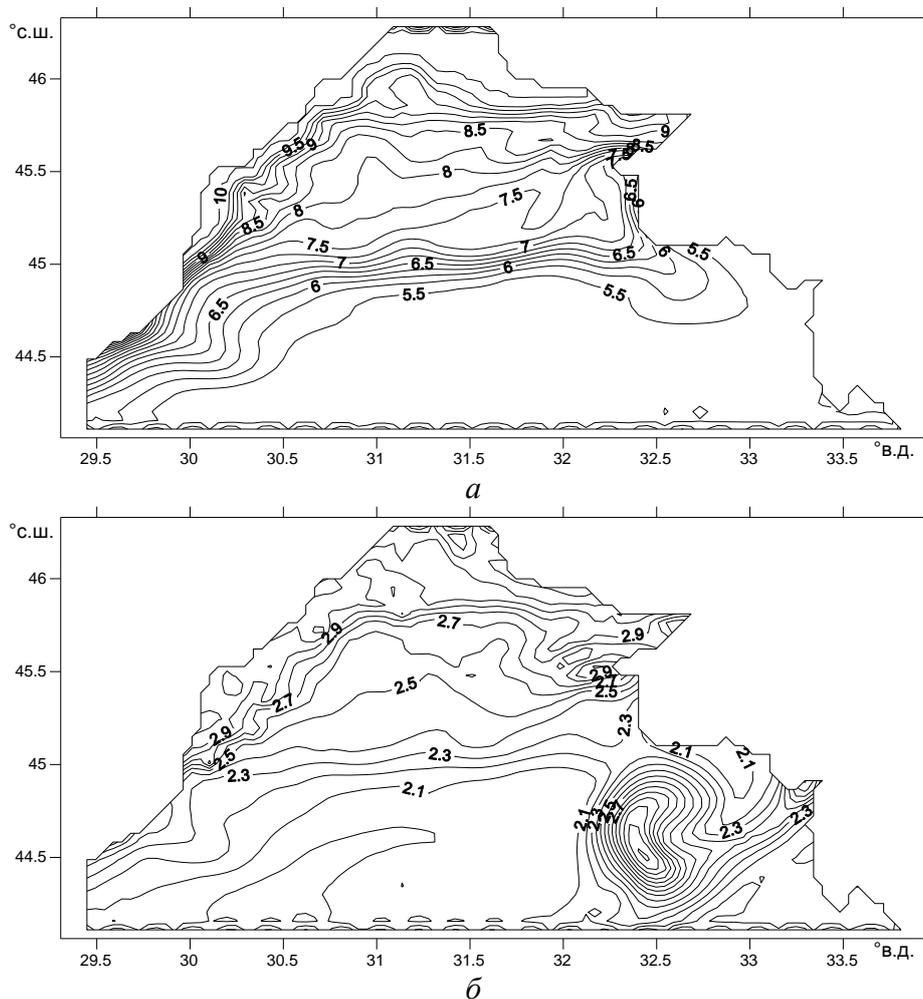


Рис. 6. Карты полей концентраций фитопланктона (*а*) и кислорода (*б*), рассчитанных в безразмерных единицах на 210-е сут вычислений без учета динамики морской среды

На рис. 6, *а* приведена карта поля концентраций фитопланктона, построенная без учета динамики морской среды по временным сценариям, рассчитанным в узлах сеточной области. Структура изолиний на этой карте в основном следует структуре изолиний рис. 5, *б* – карты поля концентраций хлорофилла *а*, построенной по спутниковым данным.

Карта поля концентраций кислорода, показанная на рис. 6, *б*, демонстрирует значительное влияние на него спутниковых данных по температуре морской поверхности. Карта поля температуры (рис. 5, *а*), построенная по спутниковым данным, содержит заметную аномалию в районе юго-западного побережья Крыма, которая обусловлена антициклоническим круговоротом. Эта аномалия отчетливо проявилась в поле концентрации кислорода (рис. 6, *б*).

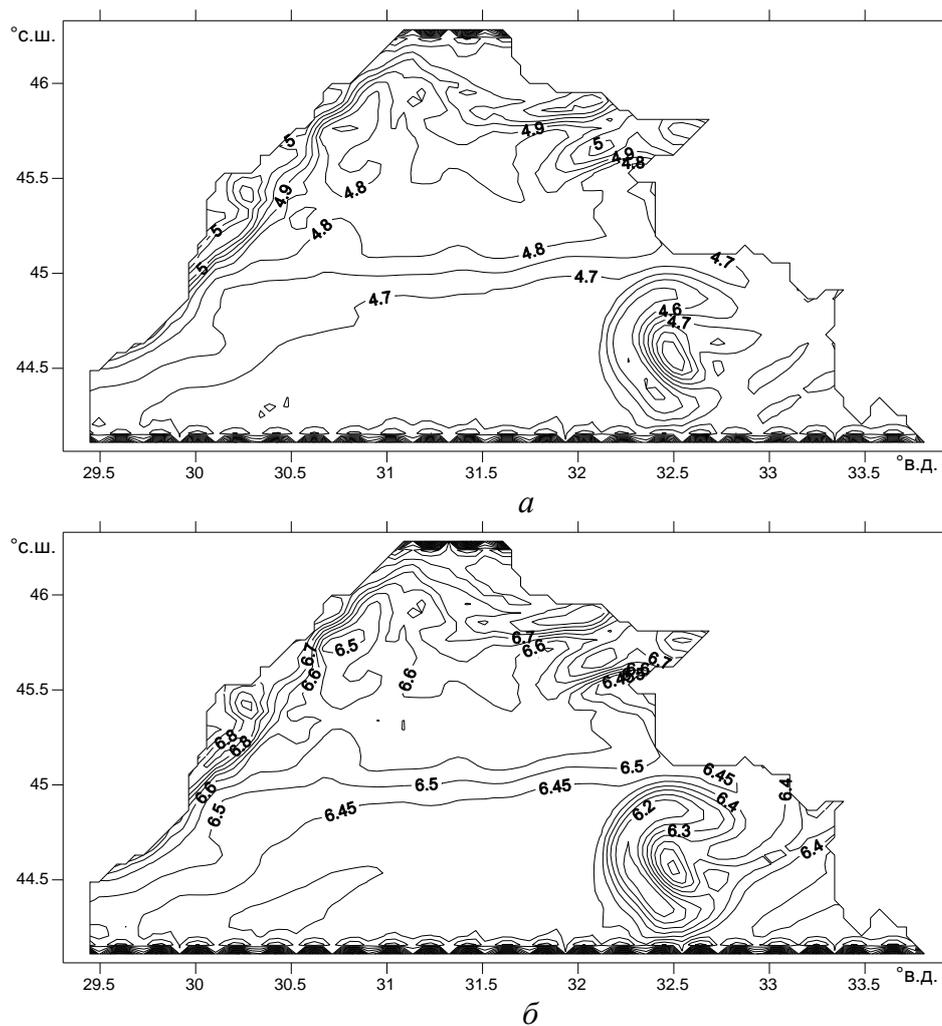


Рис. 7. Карты полей концентраций зоопланктона (*а*) и биоресурса (*б*), рассчитанных в безразмерных единицах на 210-е сут вычислений без учета динамики морской среды

При рассмотрении того, как влияют агенты ресурсного лимитирования на сценарии процессов, изображенных на рис. 4, *а*, было отмечено, что доминирующую роль в формировании сценариев концентраций зоопланктона и биоресурса играют минимумы концентраций кислорода. Поэтому следовало ожидать, что аномалия в поле кислорода должна проявить себя и в полях концентраций зоопланктона и биоресурса. Подтверждением этому служат карты этих полей, приведенные на рис. 7, *а*, *б*. Наиболее высокие концентрации зоопланктона и биоресурса наблюдаются в прибрежных районах устья Дуная, наиболее низкие – в зоне аномалии поля кислорода у юго-западного побережья Крыма.

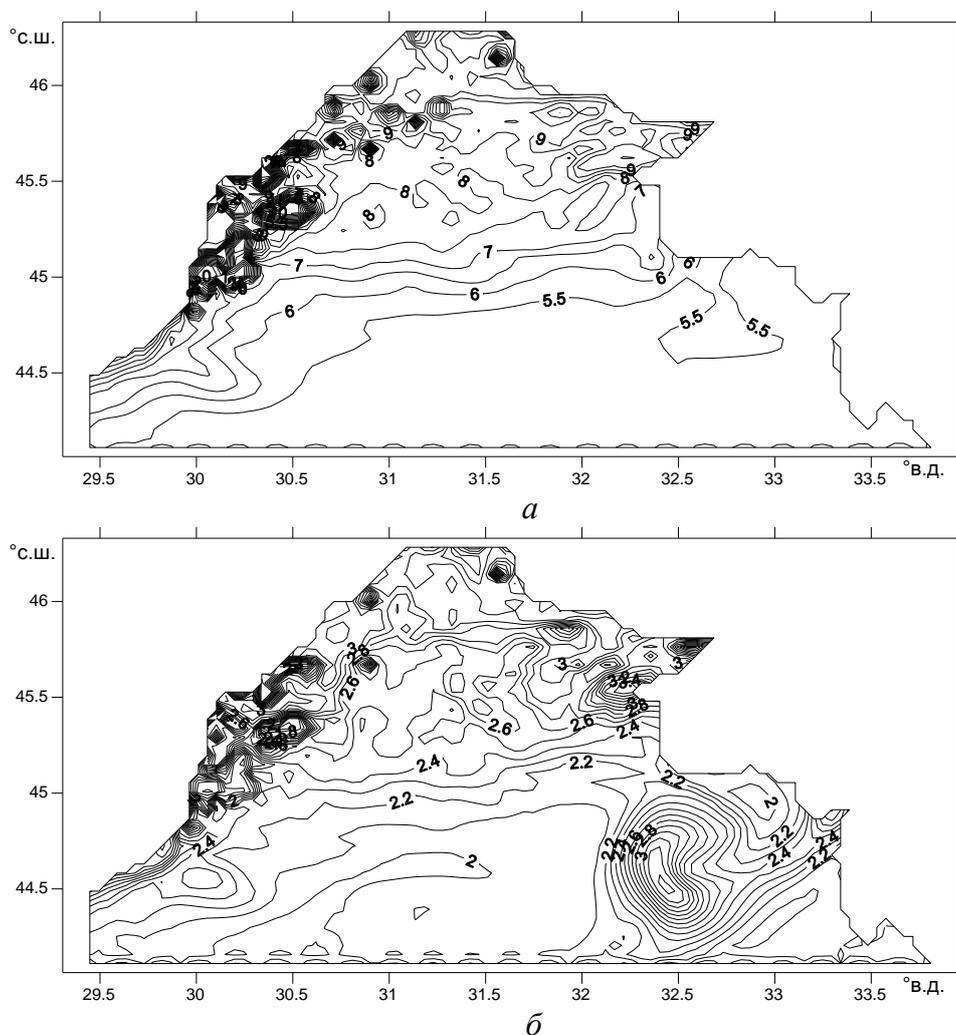


Рис. 8. Карты полей концентраций фитопланктона (*а*) и кислорода (*б*), рассчитанных в безразмерных единицах на 210-е сут вычислений с учетом адвекции и диффузии

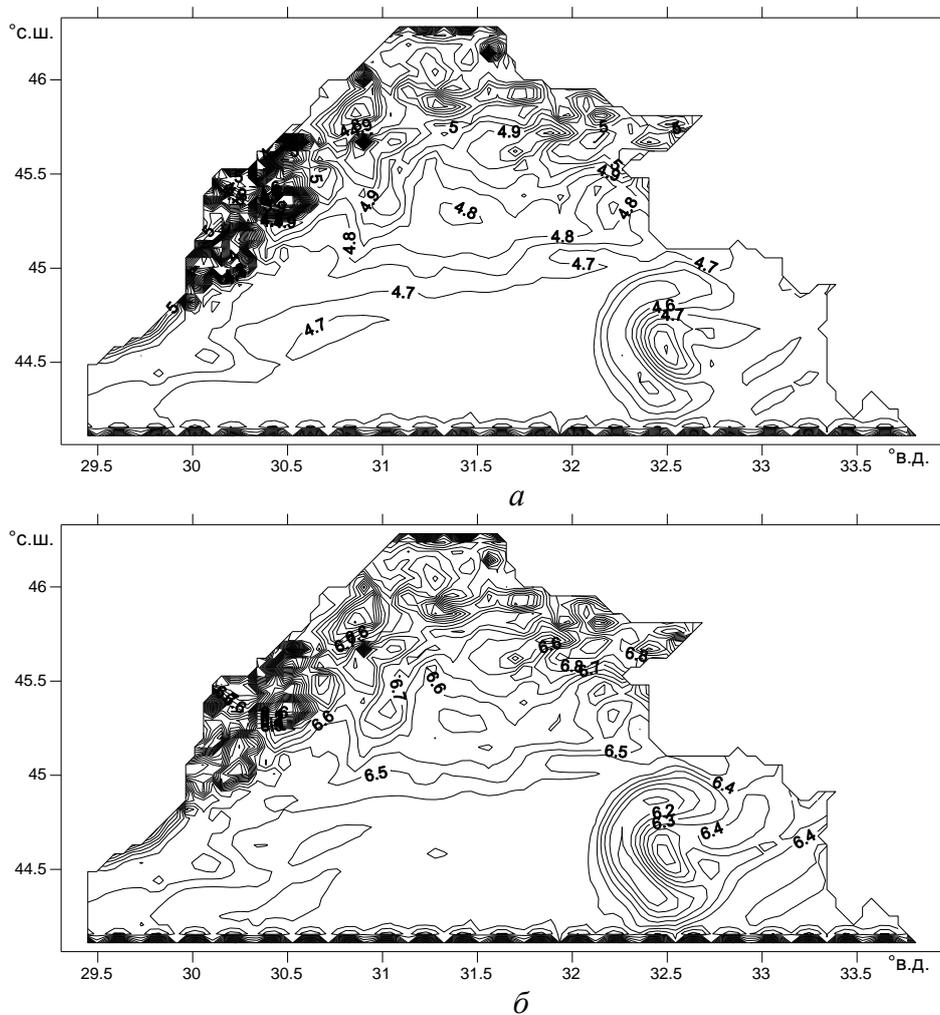


Рис. 9. Карты полей концентраций зоопланктона (*а*) и биоресурса (*б*), рассчитанных в безразмерных единицах на 210-е сут вычислений с учетом адвекции и диффузии

Карта поля концентраций фитопланктона, рассчитанная с учетом динамики морской среды на 210-е сут вычислений, приведена на рис. 8, *а*. Это поле оказалось более изменчивым по сравнению с полем на рис. 6, *а*, полученным на первом этапе. Локальные неоднородности поля хлорофилла *а*, наблюдавшиеся на карте его концентраций на рис. 5, *б* у северо-западного побережья акватории СЗШ ЧМ, не были заметны на карте концентраций фитопланктона (рис. 6, *а*), построенной без учета динамики вод. С учетом динамики они проявились в явном виде (рис. 8, *а*).

Этот вывод распространяется и на другие поля экосистемы, построенные с учетом адвекции и диффузии. Об этом свидетельствуют результаты сравнения соответствующих карт концентраций кислорода (рис. 6, *б* и 8, *б*), зоопланктона (рис. 7, *а* и 9, *а*) и биоресурса (рис. 7, *б* и 9, *б*). Таким образом, ди-

намика морской среды существенно влияет на результаты моделирования полей экосистемы методом адаптивного баланса влияний.

Заключение. Метод адаптивного баланса влияний, примененный в данной работе, основан на важном принципе отрицательной обратной связи между скоростью изменения процесса и его значениями, формируемыми внешними влияниями. Отрицательные обратные связи второго порядка, присутствующие в каждом из уравнений адаптивной модели экосистемы, автоматически поддерживают динамические балансы переменных модели с функциями внутрисистемных и внешних влияний. Это свойство адаптивных моделей экосистем позволяет упростить задачу усвоения в них данных наблюдений, что имеет существенное значение, поскольку эти данные представляют собой дополнительные источники внешних влияний. Предложенный двухэтапный метод построения полей экосистемы верхнего слоя моря позволяет выделить в отдельный этап сложные расчеты процессов переноса и диффузии веществ, выполняемые по гидродинамическим моделям, и использовать их результаты в качестве источников внешних влияний в адаптивной модели экосистемы. Этот принцип реализован в относительно простой адаптивной модели экосистемы верхнего слоя моря для района СЗШ ЧМ. Уравнения метода адаптивного баланса влияний обеспечили подстройку полей концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурса и кислорода к данным спутниковых наблюдений и оценкам адвекции и диффузии, рассчитанным по результатам численного моделирования морской среды. Показано, что учет динамики морской среды и агентов ресурсного лимитирования в адаптивной модели экосистемы позволяет детализировать карты биохимических полей. Предложенный метод при его дальнейшем развитии может составить альтернативу методу расчета биохимических полей с помощью сложных уравнений в частных производных типа «реакция – адвекция – диффузия», используемых при численном моделировании динамики морских экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeyev V.L. et al. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Sci. – 2011. – № 7. – P. 629 – 649.
2. Mityuk A.I., Knysh V.V., Kubryakov A.I., Korotaev G.K. Assimilation of the climatic hydrological data in the σ -coordinate model of the Black Sea by the algorithm of adaptive statistics // J. Phys. Oceanogr. – 2010. – 19, № 6. – P. 339 – 357.
3. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 382 с.
4. Тимченко И.Е., Иващенко И.К., Игумнова Е.М., Лазарчук И.П. Учет динамики и ресурсных свойств морской среды в адаптивных моделях морских экосистем // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 4. – С. 51 – 67.
5. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – 225 с.
6. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М. Моделирование процессов адаптации в экосистемах // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 1. – С. 46 – 57.
7. Ivanov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E. Coastal Zone Resources Management. – Kyiv: Akademperiodika, 2012. – 304 p.

8. *Nesterova D., Moncheva S., Mikaelyan A. et al.* The state of phytoplankton // State of the Environment of the Black Sea 2001–2006/7 / Chief ed. T. Oquz. – Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution. Report. – Turkey, Istanbul, 2008. – Chapter 5. – P. 173–200.
9. *Shiganova T., Musaeva E., Arashkevich E. et al.* The state of zooplankton // Ibid. – Chapter 6. – P. 201–246.
10. *Латун В.С.* Влияние рыбного промысла на устойчивость экосистемы Черного моря // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – С. 331–353.
11. *Емельянов В.А., Митропольский А.Ю., Наседкин Е.И. и др.* Геоэкология черноморского шельфа Украины. – Киев: Академперіодика, 2004. – 296 с.
12. *Орлова І.Г., Павленко М.Ю., Український В.В. та ін.* Гідрологічні та гідрохімічні показники стану північно-західного шельфу Чорного моря: довідковий посібник / Відповід. ред. І.Д. Лоева. – Київ: КНТ, 2008. – 616 с.
13. <http://www.myocean.eu/> (дата обращения 03.06.2013 г.).

Modeling of the sea upper layer ecosystem fields by the Adaptive Balance of Causes method

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

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

Considered is the method for constructing the fields of the sea upper layer ecosystem based on negative feedbacks in the ecosystem model which provide mutual adaptation of biochemical processes allowing for resource limitations and external influences. Satellite observations data on sea surface temperature and chlorophyll-*a* concentration as well as the assessments of the substances' simulated advection and diffusion resulted from the hydrodynamic model, are used as the external sources of influences. The method is illustrated by the examples of constructing the charts of phytoplankton, zooplankton, bio-resource and oxygen concentrations for the shelf regions of the north-western Black Sea. The field charts are constructed using annual variability of the concentrations calculated on the grid covering the region. Drawn is the conclusion that the ecosystem adaptive models should be advisably applied for obtaining the assessments of spatial distribution of the bio-chemical substances' concentrations in the sea upper layer ecosystem.

Keywords: Adaptive Balance of Causes method, marine ecosystem.