

# Математическое моделирование морских систем

УДК 551.46.02

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

## Адаптация модели экосистемы северо-западного шельфа Черного моря к спутниковым данным

Предложена интегральная модель экосистемы северо-западного шельфа Черного моря для расчета сценариев пространственно-временной изменчивости полей фито- и зоопланктона, кислорода, детрита и биогенных элементов в верхнем слое моря. Построены карты этих полей, согласованные методом адаптивного баланса влияний со спутниковыми наблюдениями концентрации хлорофилла  $a$  и температуры моря в этом районе, выполненными в течение 2007 г. Делается вывод о целесообразности ассимиляции спутниковой информации в адаптивных моделях морских экосистем для получения оценок ненаблюдаемых параметров.

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

Прикладные задачи контроля над состоянием морской среды с целью использования ее ресурсов предполагают построение диагностических и прогностических карт гидрохимических и гидробиологических параметров морских экосистем по данным наблюдений. Основным источником этих данных являются спутниковые наблюдения параметров экосистемы, получаемые путем дистанционного зондирования морской поверхности. Поэтому адаптация к спутниковым наблюдениям модельных оценок параметров состояния экосистем, рассчитываемых по относительно простым интегральным моделям, служит одним из перспективных направлений использования спутниковой информации [1 – 4]. В частности, метод адаптивного баланса влияний (ABC-метод) был успешно применен для адаптации пространственных распределений концентраций зоопланктона, кислорода и других параметров к наблюдениям хлорофилла  $a$  и температуры морской поверхности [5, 6]. Характер связей между процессами в экосистеме, применяемый в этом методе, обеспечивает быструю подстройку рассчитываемых параметров экосистемы к наблюдаемым. Кроме того, существует возможность использовать архивные данные о моделируемых процессах для объективной оценки коэффициентов влияний, учитывающих связи между процессами [7].

В работе [6] ABC-метод был применен в пространственном варианте для получения оценок параметров экосистемы вдоль отдельных подспутниковых траекторий на морской поверхности. В настоящей работе мы используем этот подход для адаптации модельных оценок параметров экосистемы северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ ЧМ) к спутниковым данным, полученным в течение всего 2007 г. Пространственно-временная изменчивость полей концентраций биохимических характеристик экосистемы восстанавливается

© И.П. Лазарчук, И.К. Иващенко, Е.М. Игумнова, И.Е. Тимченко, 2012

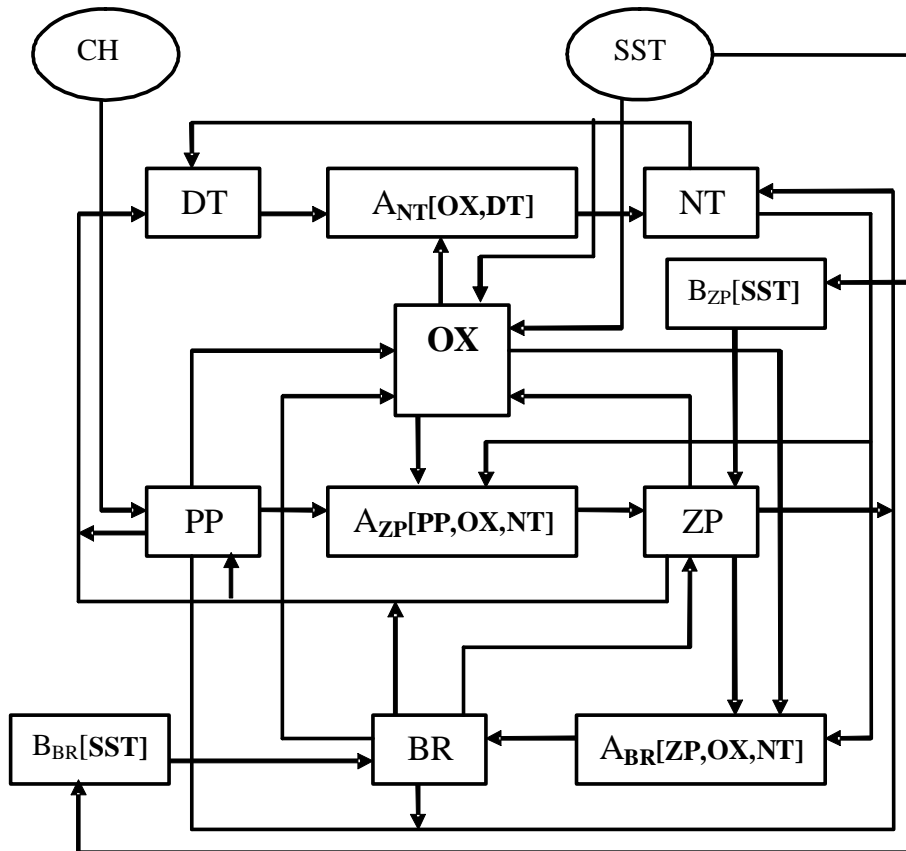
этим методом по спутниковым наблюдениям полей хлорофилла  $a$  и поверхностной температуры моря в этом районе. Рассматривается построение концептуальной модели экосистемы, ее формализация и идентификация коэффициентов влияний, связывающих между собой процессы развития в экосистеме. Использование большого массива спутниковых данных [8] позволило построить карты ненаблюдаемых со спутника полей параметров экосистемы и проследить их эволюцию в течение 2007 г.

### **Структура модели экосистемы, адаптируемой к спутниковым данным о полях хлорофилла $a$ и поверхностной температуры моря**

Исходя из сформулированных выше целей исследования, выберем в качестве основных биологических характеристик экосистемы интегральные оценки концентраций фитопланктона ( $PP$ ), зоопланктона ( $ZP$ ) и биоресурса ( $BR$ ), понимая под биоресурсами суммарную концентрацию личинок рыб, рыб и других гидробионтов, расположенных выше зоопланктона в пищевой цепи и потенциально имеющих промысловое значение. В качестве гидрохимических параметров экосистемы будем использовать концентрации следующих субстанций: биогенных элементов ( $NT$ ), детрита ( $DT$ ) и кислорода ( $OX$ ). Значения концентраций будем связывать с количествами соответствующих субстанций в некотором малом объеме морской среды, расположенном в приповерхностном слое моря и имеющем координаты  $x, y$ .

Кроме внутрисистемных связей на состояние экосистемы влияют внешние условия. Примем, что известная из спутниковых наблюдений динамика поля хлорофилла  $a$  ( $CH$ ) интегрально отражает влияние на формирование поля фитопланктона внешних физических условий: годового хода температуры и освещенности морской поверхности, вариаций приводного ветра, а также адвекции и диффузии водных масс, обусловленных динамикой морской среды. Включение в общую модель экосистемы поля концентрации фитопланктона позволяет косвенно учесть все эти внешние влияния на другие ненаблюдаемые параметры экосистемы. Еще одним источником информации о реальных физических условиях в верхнем слое моря служат спутниковые наблюдения поверхностной температуры моря ( $SST$ ), которая непосредственно влияет на концентрации зоопланктона, биоресурса и кислорода.

Взаимные связи между выделенными параметрами дают возможность построить концептуальную модель экосистемы (рис. 1). С целью упрощения схемы причинно-следственных связей некоторые из стрелок, соединяющих блоки концептуальной модели, имеют двойное значение. Так, например, стрелка, идущая от блока  $ZP$  к блокам  $PP$  и  $DT$ , одновременно обозначает потребление фитопланктона зоопланктоном и пополнение концентрации детрита за счет отмирания зоопланктона. В структуру модели включены агенты управления, лимитирующие рост концентраций: зоопланктона –  $A_{ZP}[PP, OX, NT]$ , биоресурса –  $A_{BR}[ZP, OX, NT]$  и биогенных элементов –  $A_{NT}[OX, DT]$  в зависимости от наличия потребляемых ими ресурсов. Кроме того, использованы агенты  $B_{ZP}[SST]$  и  $B_{BR}[SST]$ , которые связывают значения концентраций зоопланктона и биоресурса с интервалами температур морской воды, наиболее благоприятными для их развития.



Р и с. 1. Концептуальная модель морской экосистемы северо-западного шельфа Черного моря

Для построения модели экосистемы СЗШ ЧМ была использована система уравнений метода адаптивного баланса влияний, которая имеет следующий вид [7]:

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

где  $u_i$  – процессы в экосистеме;  $a_{ij}$  – коэффициенты влияний процессов друг на друга;  $f_i$  – внешние влияния на экосистему;  $r_i$  – коэффициент, определяющий скорость изменения  $u_i$  и согласующий размерности в уравнениях;  $C_i$  – ресурсная емкость морской среды по отношению к  $u_i$ . Для удобства моделирования примем, что процессы в экосистеме удовлетворяют условиям  $r = C_i = 1$ .

Применим стандартное уравнение ABC-метода (1), используя обозначения процессов в концептуальной модели (рис. 1). Будем устанавливать известные из опыта знаки влияния одних процессов на другие: положительное

влияние  $u_j$  на  $u_i$  и означает совпадение тенденций роста (уменьшения) концентраций  $u_j$  и  $u_i$ . В результате получим следующую систему динамических уравнений ABC-модели морской экосистемы:

$$\frac{dPP}{dt} = PP\{1 - 2[PP + a_{PP/ZP}ZP - a_{PP/CH}CH]\}; \quad (2)$$

$$\frac{dZP}{dt} = ZP\{1 - 2[ZP - A_{ZP}(PP, OX, NT) - B_{ZP}(SST) + a_{ZP/BR}BR]\}, \quad (3)$$

$$A_{ZP}(PP, OX, NT) = a_{ZP/PP}PP(t)A_{ZP/PP}(t) + a_{ZP/OX}OX(t)A_{ZP/OX}(t) + a_{ZP/NT}NT(t)A_{ZP/NT}(t), \quad (4)$$

$$a_{ZP/PP}PP(t) = IF[M_{ZP}(t) = PP(t); -a_{ZP/PP}PP(t); 0],$$

$$A_{ZP/PP}(t) = IF[PP(t) < PP_c; 0; 1],$$

$$a_{ZP/OX}OX(t) = IF[M_{ZP}(t) = OX(t); -a_{ZP/OX}OX(t); 0],$$

$$A_{ZP/OX}(t) = IF[OX(t) < OX_c; 0; 1],$$

$$a_{ZP/NT}NT(t) = IF[M_{ZP}(t) = NT(t); -a_{ZP/NT}NT(t); 0],$$

$$A_{ZP/NT}(t) = IF[NT(t) < NT_c; 0; 1],$$

$$M_{ZP}(t) = \arg \min\{PP(t); OX(t); NT(t)\},$$

$$B_{ZP}(SST) = a_{ZP/SST} \exp[-\alpha_{ZP}(SST - SST_{ZP}^*)^2]; \quad (5)$$

$$\frac{dBR}{dt} = BR\{1 - 2[BR - A_{BR}(ZP, OX, NT) - B_{BR}(SST)]\}, \quad (6)$$

$$A_{BR}(ZP, OX, NT) = a_{BR/ZP}ZP(t)A_{BR/ZP}(t) + a_{BR/OX}OX(t)A_{BR/OX}(t) + a_{BR/NT}NT(t)A_{BR/NT}(t), \quad (7)$$

$$a_{BR/ZP}ZP(t) = IF[M_{BR}(t) = ZP(t); -a_{BR/ZP}ZP(t); 0],$$

$$A_{BR/ZP}(t) = IF[ZP(t) < ZP_c; 0; 1],$$

$$a_{BR/OX}OX(t) = IF[M_{BR}(t) = OX(t); -a_{BR/OX}OX(t); 0],$$

$$A_{BR/OX}(t) = IF[OX(t) < OX_c; 0; 1],$$

$$a_{BR/NT}NT(t) = IF[M_{BR}(t) = NT(t); -a_{BR/NT}NT(t); 0],$$

$$A_{BR/NT}(t) = IF[NT(t) < NT_c; 0; 1],$$

$$M_{BR}(t) = \arg \min\{ZP(t); OX(t); NT(t)\},$$

$$B_{BR}(SST) = a_{BR/SST} \exp[-\alpha_{BR}(SST - SST_{BR}^*)^2]; \quad (8)$$

$$\frac{dNT}{dt} = NT \{1 - 2[NT - A_{NT}(OX, DT) + a_{NT/PP}PP + a_{NT/ZP}ZP + a_{NT/BR}BR]\}, \quad (9)$$

$$A_{NT}(OX, DT) = a_{NT/OX}OX(t)A_{NT/OX}(t) + a_{NT/DT}DT(t)A_{NT/DT}(t), \quad (10)$$

$$a_{NT/DT}DT(t) = IF[M_{NT}(t) = DT(t); -a_{NT/DT}DT(t); 0],$$

$$A_{NT/DT}(t) = IF[DT(t) < DT_c; 0; 1],$$

$$a_{NT/OX}OX(t) = IF[M_{NT}(t) = OX(t); -a_{NT/OX}OX(t); 0],$$

$$A_{NT/OX}(t) = IF[OX(t) < OX_c; 0; 1],$$

$$M_{NT}(t) = \arg \min\{OX(t); DT(t)\};$$

$$\frac{dOX}{dt} = OX \{1 - 2[OX - a_{OX/PP}PP + a_{OX/ZP}ZP + a_{OX/BR}BR + a_{OX/NT}NT + a_{OX/SST}SST]\}; \quad (11)$$

$$\frac{dDT}{dt} = DT \{1 - 2[DT - a_{DT/PP}PP - a_{DT/ZP}ZP - a_{DT/BR}BR + a_{DT/NT}NT]\}; \quad (12)$$

$$PP(0) = ZP(0) = BP(0) = NT(0) = OX(0) = DT(0) = 0,5.$$

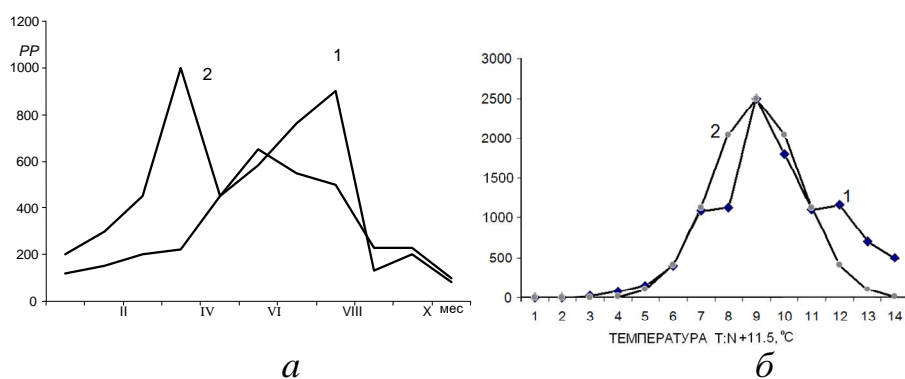
В модели предусмотрены нижние предельно допустимые концентрации фитопланктона  $PP_c$ , зоопланктона  $ZP_c$ , биогенных элементов  $NT_c$  и кислорода  $OX_c$ . Если лимитирующий параметр в данной точке пространственной области опускается ниже предельно допустимого значения, агенты управления обращают его в нуль. Наиболее благоприятные для развития зоопланктона и биоресурса значения температуры верхнего слоя моря обозначены как  $SST_{ZP}^*$  и  $SST_{BR}^*$  соответственно. Операторы управления, следящие за температурным режимом развития гидробионтов, представлены формулами (5) и (8).

### **Идентификация коэффициентов модели экосистемы и построение сценариев процессов развития**

Материалы наблюдений, обобщенные в научных публикациях, дают некоторое представление о закономерностях формирования полей общего фитопланктона, холодолюбивого и теплолюбивого зоопланктона, личинок рыб и рыб в районе СЗШ ЧМ [9 – 11]. Внутригодовая динамика биомассы фитопланктона в этом районе характеризуется несколькими максимумами, количество и величины которых определяются гидрометеорологическими условиями конкретного года. С января по март первичная продукция увеличивается, повышается численность и биомасса фитопланктона за счет диатомового вида водорослей. Во внутригодовом цикле биомассы зоопланктона его холодолюбивая форма приобретает ведущее значение в зимне-весенний период. На развитие холодолюбивого зоопланктона оказывают влияние общая биомасса фитопланктона, температура морской воды и концентрация личинок

рыб. Теплолюбивые формы зоопланктона достигают максимального обилия в водах северо-западной части моря в летний период.

Колебания урожайности фитопланктона от года к году обуславливают значительные колебания запасов биоресурса. При повышении температуры воды до 19°C начинается нерест теплолюбивых рыб, максимум которого наблюдается в июле – августе. Основным нерестилищем хамсы является северо-западная часть Черного моря. В прибрежных районах показатель выживания икры хамсы составляет 4 – 5 ч, тогда как, например, у ставриды он равен 1 ч. Оптимальный тепловой фон для развития хамсы находится в диапазоне температур 14 – 23°C. На рис. 2, а показан средний многолетний ход биомассы фитопланктона в зависимости от месяца года. Известно, что его график имеет один максимум, приходящийся на середину лета, если в декабре – январе общее количество дней с сильными ветрами (более 15 м/с) превышает 25 [9]. При более слабых зимних ветрах биомасса фитопланктона имеет два максимума – в апреле и в июне.



**Р и с. 2.** Концентрация биомассы общего фитопланктона в зависимости от месяца года (1 – при сильных зимних ветрах, 2 – при слабых зимних ветрах) – а; число личинок хамсы, вылавливаемых за 10 мин, в зависимости от температуры моря (1 – данные наблюдений [10], 2 – аппроксимация по формулам (5), (8)) – б

Самой многочисленной у хамсы является июльская генерация молоди. Она в основном определяет численность сеголеток в августе. Сопоставление выживания икры и личинок в июле показывает, что у икры оно отличается от года к году в 1,1 раза, у личинок – более чем в 6 раз. Амплитуда межгодовых колебаний численности личинок приближается к амплитуде колебаний численности сеголеток (изменение на порядок величины). Выживание в личиночном периоде является основным фактором, определяющим эти колебания. Зависимость числа личинок хамсы, вылавливаемых за 10 мин, от температуры моря показана на рис. 2, б.

Спутниковые данные о концентрации хлорофилла *a* в районе СЗШ ЧМ, использованные в настоящей работе, относились к наблюдениям 2007 г., когда зимние ветры были слабее средних многолетних. Для адаптации модели экосистемы (2) – (12) к этим данным все моделируемые процессы были представлены в безразмерном виде путем деления их значений на константы  $C_i$ ,

имеющие смысл ресурсных емкостей морской среды (*current capacity* [12]), и приведены к единой шкале изменчивости [0, 10] безразмерных единиц. Тогда для возврата к исходным размерным значениям параметров достаточно умножить модельные оценки на  $0,1C_i$ . Поэтому результаты расчетов, показанные на приведенных ниже рисунках, должны быть умножены на следующие коэффициенты: для температуры  $SST \sim 3^\circ\text{C}$ , для концентрации фитопланктона  $PP \sim 0,5 \text{ г/м}^3$ , для концентрации зоопланктона  $ZP \sim 0,1 \text{ г/м}^3$ , для концентрации биоресурса  $BR \sim 0,005 \text{ г/м}^3$ , для концентрации биогенных элементов  $NT \sim 2,5 \text{ г/м}^3$ , для концентрации детрита  $DT \sim 6 \cdot 10^{-5} \text{ г/м}^3$ . В качестве единицы измерения времени выбраны одни сутки. Расчеты проводились на 365 безразмерных единиц времени (шагов вычислений).

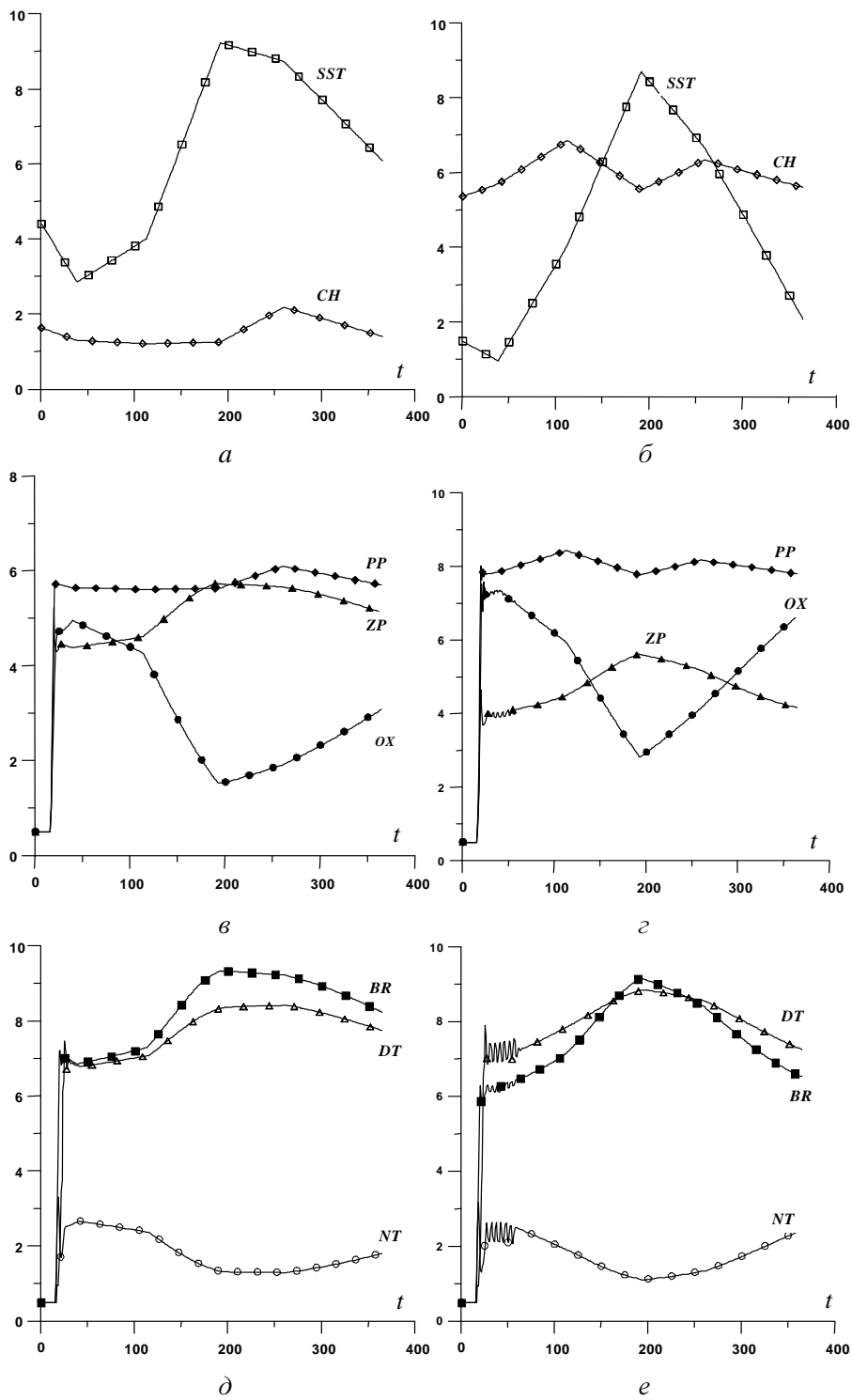
В первой серии вычислительных экспериментов были подобраны коэффициенты влияния в уравнениях модели. С этой целью рассчитывались временные сценарии изменчивости параметров экосистемы в отдельных узлах сеточной области. Критериями отбора коэффициентов служили чувствительность модели к спутниковым данным и устойчивость численной схемы Эйлера, использованной для решения уравнений. Значения коэффициентов, удовлетворяющих этим противоречивым условиям, приведены в таблице.

**Коэффициенты влияния, использованные в расчетах**

$a_{MM/NN}$	$PP$	$OX$	$ZP$	$BR$	$NT$	$DT$	$CH$	$SST$
$PP$	1	0	0	0	0	0	0,5	0
$OX$	0,6	1	0,2	0,2	0	0	0	0,49
$ZP$	0,49	0,4	1	0,4	0,4	0	0	4
$BR$	0	0,4	0,4	1	0,3	0	0	4
$NT$	0,5	0,4	0,2	0,2	1	0,3	0	0
$DT$	0,2	0	0,2	0,2	0,6	1	0	0

Влияние температуры на концентрации зоопланктона и биоресурса учитывалось с помощью агентов управления (см. рис. 1), в которых были использованы функции (5) и (8) с одинаковыми параметрами  $SST_{ZP}^* = SST_{BR}^* = 26^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{ZP} = \alpha_{BR} = 0,01$ . Границы гомеостаза в эксперименте не устанавливались, т. е. считалось, что  $PP_c = ZP_c = OX_c = NT_c = DT_c = 0$ .

На рис. 3, а, в, д показаны сценарии внутригодового хода параметров экосистемы и данные спутниковых наблюдений для центральной части акватории СЗШ ЧМ в точке с координатами  $44^\circ 54'$  с. ш. и  $31^\circ 55'$  в. д. Динамическое согласование сценариев  $PP$ ,  $ZP$ ,  $BR$ ,  $OX$ ,  $NT$  и  $DT$  между собой и с данными наблюдений  $SST$  и  $CH$  отмечается уже на первых шагах вычислений, несмотря на то что для них были заданы низкие начальные значения (0,5 безразмерных единиц). Сценарий  $PP$  сформирован в основном данными наблюдений хлорофилла а. Сценарии  $ZP$  и  $BR$  формировались под влиянием агентов ресурсного лимитирования (рис. 1), которые ориентировали концентрации этих параметров на минимум биогенных элементов (кривая  $NT$  на рис. 3, д).



**Р и с. 3.** Сценарии процессов в экосистеме, адаптированные к спутниковым данным: *a, в, д* – в точке с координатами  $44^{\circ} 54' \text{ с. ш.}, 31^{\circ} 55' \text{ в. д.}$ ; *б, з, е* – в точке с координатами  $46^{\circ} 01' \text{ с. ш.}, 30^{\circ} 54' \text{ в. д.}$  (время  $t$  – сут)



Одновременно с влиянием агентов ресурсного лимитирования сценарии *ZP* и *BR* испытывали на себе влияние температуры верхнего слоя. В летний период она приближалась к комфортной для развития зоопланктона и биоресурса и составляла 26°C. Поэтому ход *ZP* убывал незначительно, а ход *BR* имел максимум, совпадающий с максимумом температуры. С летним прогревом связан также глубокий минимум концентрации кислорода (рис. 3, в). Падение концентрации кислорода под влиянием агента лимитирования  $A_{NT}[OX, DT]$  отразилось на уменьшении концентрации биогенных элементов (кривая *NT* на рис. 3, д) и на росте концентрации детрита (кривая *DT* на рис. 3, д), разложение которого оказалось замедленным.

Вторая точка, выбранная для тестирования модели, находилась в прибрежной зоне моря и имела координаты 46°01' с. ш. и 30°54' в. д. В этом районе концентрация хлорофилла *a* значительно выше, чем в центре расчетной области, что очевидно при сравнении кривых *CH* на рис. 3, а, б. Характерной особенностью сценария концентрации хлорофилла *a* является наличие весеннего и осеннего максимумов. В сценарии концентрации кислорода присутствует минимум, приходящийся на период летнего прогрева верхнего слоя, который, однако, не повлиял на рост концентрации зоопланктона в этот период (кривая *ZP* на рис. 3, в). С максимумом концентрации зоопланктона и увеличением температуры верхнего слоя связан также рост концентрации биоресурса в это время (кривая *BR* на рис. 3, в). Кислородный минимум в летний период повлиял на концентрации биогенных элементов и детрита (кривые *NT* и *DT* на рис. 3, д): концентрация детрита выросла, а концентрация биогенных элементов уменьшилась.

Расчеты сценариев параметров экосистемы, выполненные в различных точках СЗШ ЧМ, подтвердили, что схема причинно-следственных связей, положенная в основу структуры модели, правильно отражает основные особенности внутригодовой изменчивости этих параметров. Модель адекватно реагировала на изменения значений спутниковой информации, включенной в расчеты сценариев процессов в экосистеме. Выбранные значения коэффициентов влияний в уравнениях модели обеспечивали ее достаточную чувствительность к спутниковой информации, не приводя к появлению вычислительной неустойчивости.

### **Построение карт параметров экосистемы СЗШ ЧМ по спутниковым данным**

Для оценки пространственно-временной динамики параметров экосистемы СЗШ ЧМ были использованы сценарии внутригодовой изменчивости хлорофилла *a* и поверхностной температуры, построенные по спутниковым данным для каждого узла квадратной сетки с шагом 10 км, покрывавшей район СЗШ ЧМ. Отдельные пропуски во временных рядах спутниковой информации были восполнены путем линейной интерполяции. Уравнения модели (2) – (12) решались в каждом узле сеточной области, в результате чего были построены сценарии внутригодовой изменчивости всех параметров экосистемы, аналогичные приведенным на рис. 3. Таким образом, по спутниковым данным была восстановлена пространственно-временная динамика

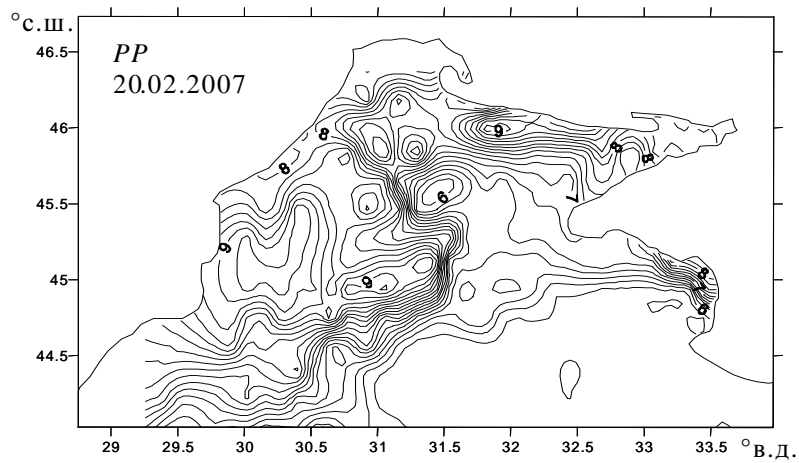
экосистемы для условий 2007 г. Некоторое представление о ней дают карты параметров экосистемы для трех сезонов, приведенные на рис. 4 – 8: для зимних условий по состоянию на 20 февраля, для летних условий – на 15 августа, для осенних условий – на 15 ноября 2007 г.

На рис. 4 показаны сезонные изменения поля концентрации фитопланктона. Оно оказалось наиболее чувствительным к спутниковой информации о поле хлорофилла *a*, поскольку данные этих наблюдений выполняли функцию основного источника (драйва) в уравнении для *PP* модели (2) – (12). Как следует из рис. 4, наибольшие градиенты концентрации хлорофилла *a*, а следовательно, и фитопланктона, приближены к фронтальным зонам, где существуют большие градиенты температуры. Зимой они наблюдаются в центре района, на границе шельфа (рис. 4, *a*), летом область высоких градиентов перемещается в прибрежную зону (рис. 4, *b*), осенью она снова смещается в сторону свала глубин (рис. 4, *в*). 2007 год характеризовался умеренно теплым летом и длинной теплой осенью: в первой половине декабря температура на 44° с. ш. достигала 15 – 16°С. Эта особенность температурного режима прослеживается на картах зоопланктона (рис. 5) и биоресурса (рис. 6).

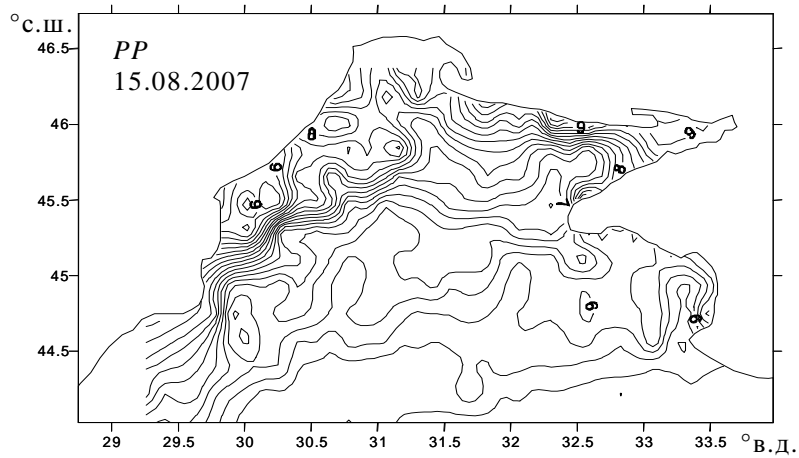
Поле концентрации кислорода (рис. 7) формировалось под действием большого количества влияющих факторов, что обусловило его более значительную изменчивость по сравнению с полями концентраций зоопланктона и биоресурса. Тем не менее карты полей концентраций *ZP*, *BR* и *OX* имеют некоторое подобие в расположении изолиний. Оно объясняется действием агентов управления, включенных в правые части уравнений для *ZP* и *BR*. Агенты управления адаптировали концентрации *ZP* и *BR* к содержанию кислорода в тех местах района и в те моменты времени, когда этот вид ресурса развития принимал минимальное значение по отношению к другим ресурсам. Кроме того, эти три поля находились под влиянием спутниковой информации о поверхностной температуре моря.

На рис. 8 приведены карты концентраций биогенных веществ *NT* и детрита *DT* по состоянию на 20.02.2007 г., согласованные с концентрациями *PP*, *ZP* и *BR*, адаптированными к спутниковой информации. Следует учесть, что в соответствии с концептуальной моделью экосистемы (рис. 1) прямое влияние спутниковой информации на эти параметры отсутствует. Однако модель довольно подробно воспроизвела поле концентрации биогенных элементов с учетом условий их образования. Агент управления в уравнении для концентрации *NT* непрерывно анализировал распределения концентраций кислорода *OX* и детрита *DT* и включал влияние того из этих двух ресурсов, который лимитировал превращение *DT* в *NT*.

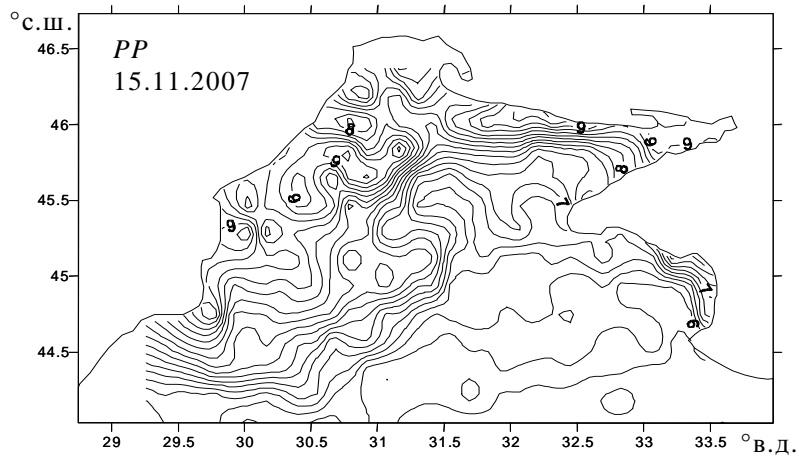
Построенные карты позволяют приближенно оценить распределение морских биоресурсов по акватории СЗШ ЧМ. Районы их возможной наибольшей концентрации совпадают с местами проникновения в море распределенных речных вод, поступающих от стоков Дуная, Днепра и Буга. Это прибрежные зоны акватории СЗШ ЧМ, для которых характерно повышенное содержание биогенных элементов и детрита. Температура воды, содержание зоопланктона, кислорода и биогенных элементов в этих зонах благоприятны для развития рыб.



*a*

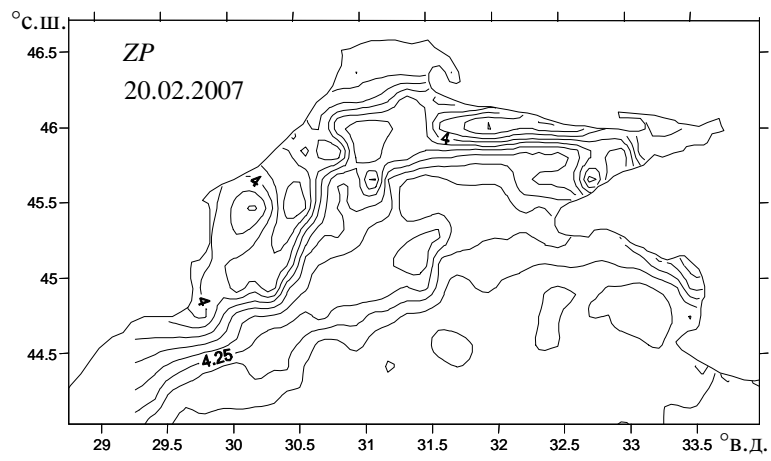


*б*

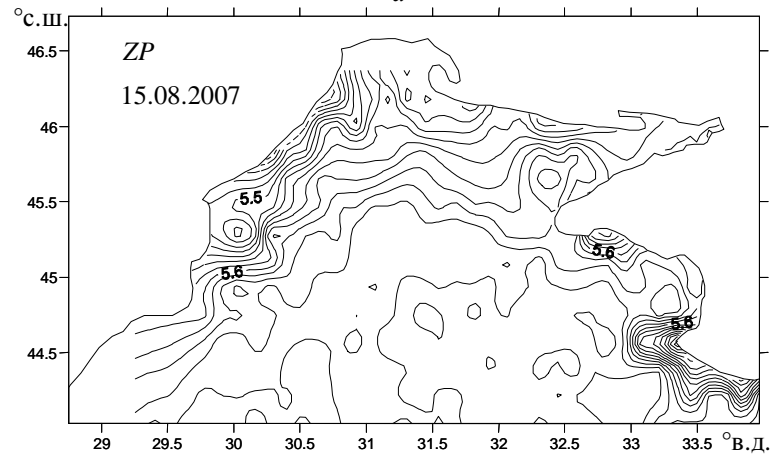


*в*

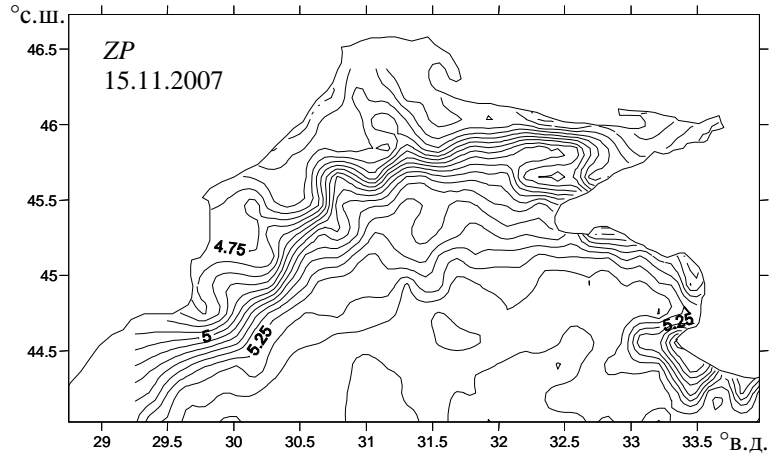
**Р и с. 4.** Поле концентрации фитопланктона, рассчитанное по спутниковым данным: *a* – 20.02.2007 г.; *б* – 15.08.2007 г.; *в* – 15.11.2007 г.



*a*



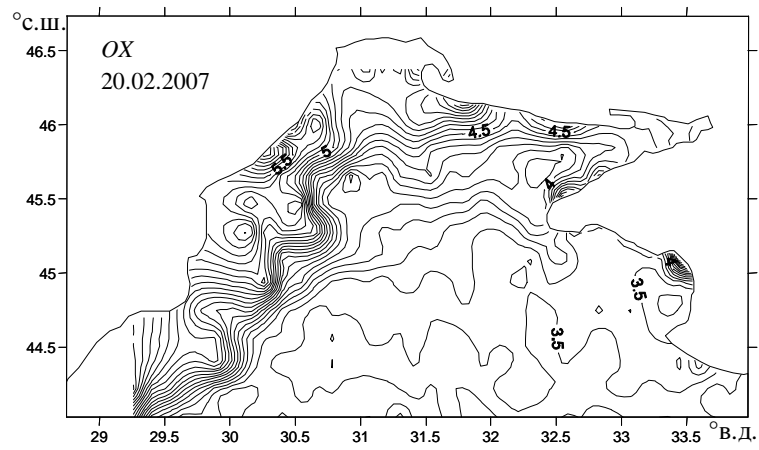
*б*



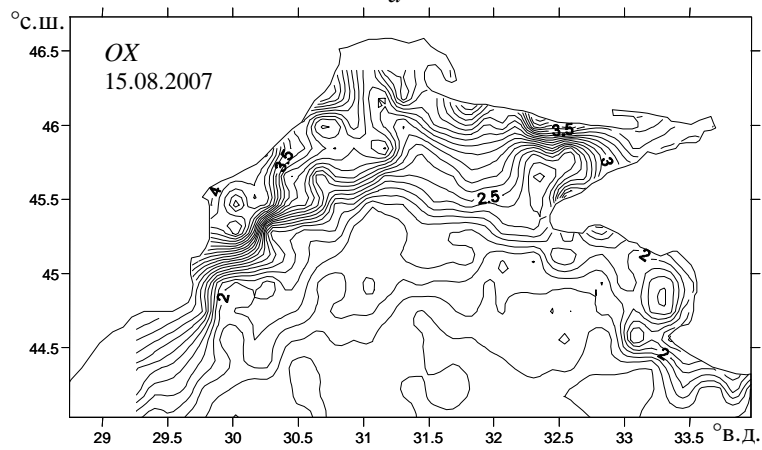
*в*

**Р и с. 5.** Поле концентрации зоопланктона, адаптированное к распределениям фитопланктона и к спутниковым данным о поверхностной температуре моря: *a* – 20.02.2007 г.; *б* – 15.08.2007 г.; *в* – 15.11.2007 г.

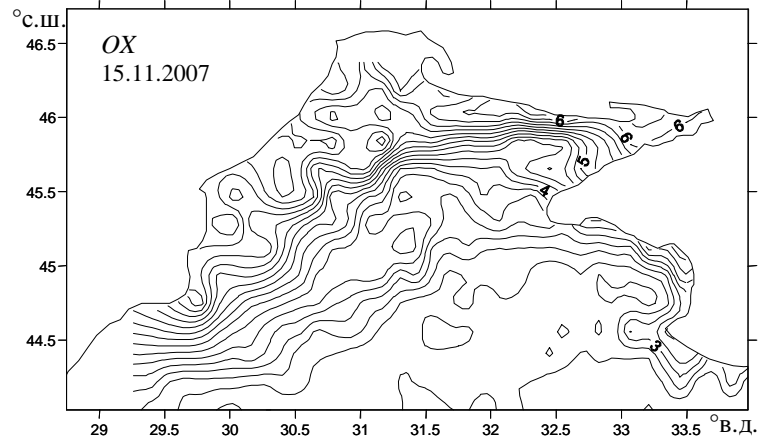




*a*

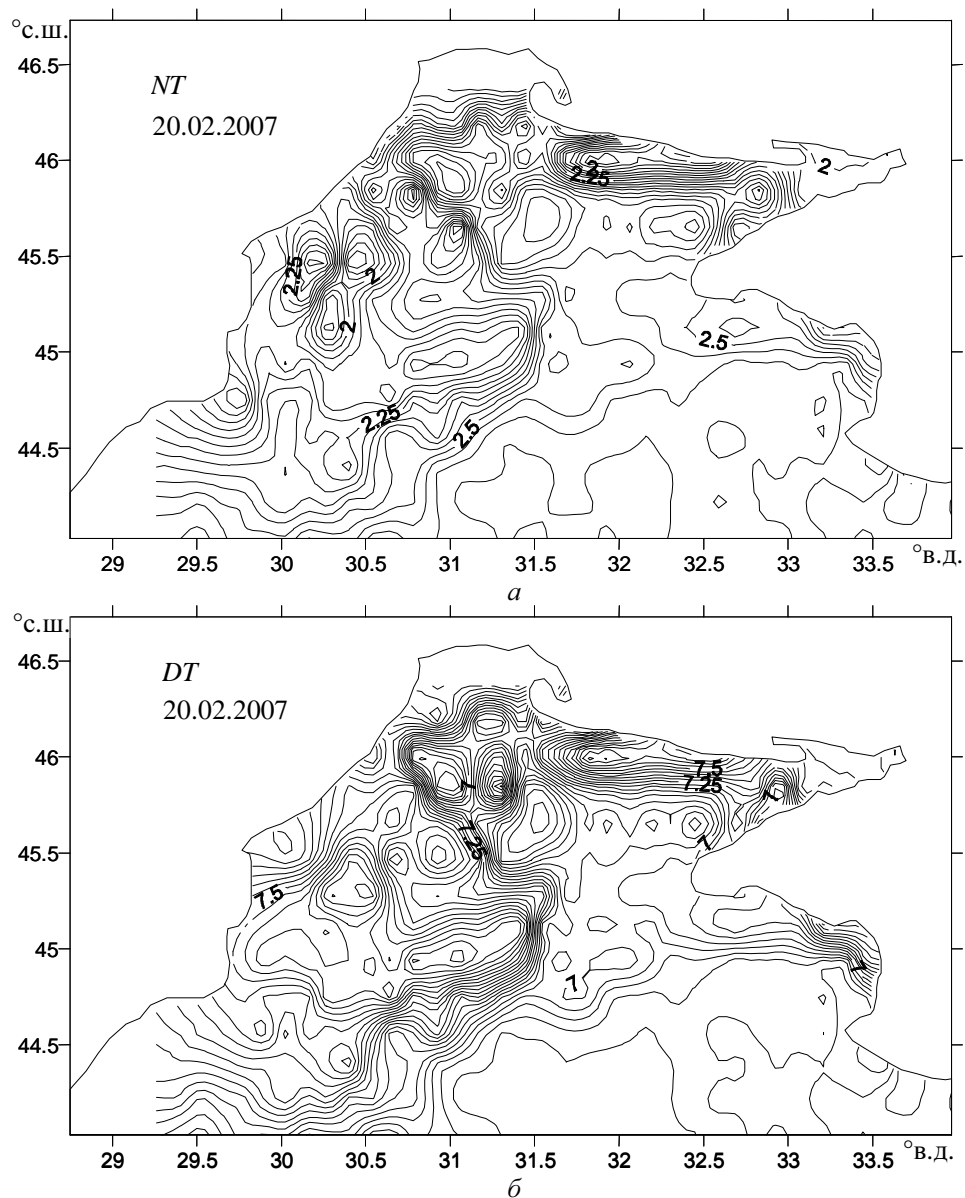


*б*



*в*

**Р и с. 7.** Поле концентрации кислорода, адаптированное к расчетным концентрациям параметров *PP*, *ZP*, *BR* и *NT*, а также к спутниковым измерениям поверхностной температуры: *a* – 20.02.2007 г.; *б* – 15.08.2007 г.; *в* – 15.11.2007 г.



**Р и с. 8.** Карты концентраций биогенных веществ (а) и детрита (б), согласованные с концентрациями *PP*, *ZP* и *BR*, адаптированными к спутниковой информации по состоянию на 20.02.2007 г.

### Заключение

Адаптивные модели морских экосистем основаны на принципе стремления экосистемы к состоянию динамического баланса с приложенными к ней внешними влияниями. Поэтому если спутниковая информация поступает в адаптивную модель экосистемы в качестве функций внешних источников, модель естественным образом подстраивается под эту информацию. Происходит ассимиляция спутниковых данных в модели, которая в свою очередь

распространяет спутниковую информацию на те процессы в экосистеме, наблюдения которых отсутствуют. В этом состоит основная практическая польза адаптации модели экосистемы к данным спутниковых наблюдений.

Использованный в работе *ABC*-метод моделирования позволил построить относительно простую динамическую модель экосистемы СЗШ ЧМ для усвоения в ней данных дистанционных наблюдений полей хлорофилла *a* и поверхностной температуры моря. Не представляет труда обобщить модель для усвоения в ней данных других спутниковых наблюдений, например информации о поле приводного ветра, заметно влияющего на содержание кислорода в верхнем слое моря.

Особенностью адаптивных моделей рассмотренного типа является использование агентов управления, лимитирующих процессы развития в экосистеме. Применение в нелинейных дифференциальных уравнениях модели экосистемы нелинейных логических операторов управления потенциально грозит потерей устойчивости решений. Для практической проверки устойчивости вычислительной схемы были проведены вычислительные эксперименты с моделью в отдельных точках сеточной области. Результаты экспериментов показали, что адаптивная модель экосистемы обладает повышенной устойчивостью при условии, что коэффициенты влияния не превышают определенных значений. Эти значения были подобраны при отладке модели из условий компромисса между ее высокой чувствительностью к спутниковой информации и устойчивостью решений.

После идентификации коэффициентов динамическая модель экосистемы была использована для построения карт полей фито- и зоопланктона, биоресурса, кислорода, биогенных элементов и детрита, адаптированных к массиву спутниковых данных, полученных в районе СЗШ ЧМ в течение всего 2007 г. Таким образом, была восстановлена внутригодовая пространственно-временная изменчивость шести параметров состояния экосистемы СЗШ ЧМ, согласованная со спутниковой информацией. Анализ построенных карт полей показал, что в целом существует привязка оценок концентраций ненаблюдаемых параметров экосистемы к спутниковым данным. Сложные нелинейные связи между параметрами существенно влияют на результирующие сценарии процессов в экосистеме. На этом основании сделан вывод, что адаптивные модели морских экосистем, несмотря на используемые в них упрощения, могут быть полезны для изучения пространственно-временной изменчивости параметров экосистемы по данным спутниковых наблюдений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е. Системные методы в гидрофизике океана. – Киев: Наук. думка, 1988. – 180 с.
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. Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Моделирование эколого-экономических систем. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 320 с.



5. Пухтяр Л.Д., Станичний С.В., Тимченко И.Е. Оптимальная интерполяция данных дистанционного зондирования морской поверхности // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 4. – С. 34 – 50.
6. Иващенко И.К., Игумнова Е.М., Лазарчук И.П., Тимченко И.Е. Согласование пространственных распределений параметров экосистемы с данными дистанционного зондирования морской поверхности // Экологическая безопасность и использование ресурсов шельфовой зоны моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 23. – С. 61 – 69.
7. Тимченко И.И., Игумнова Е.М. Ассимиляция данных наблюдений и адаптивный прогноз природных процессов // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 6. – С. 47 – 70.
8. Архивные данные спутниковых наблюдений. – <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.
9. Ковалев А.В., Финенко З.З., Островская Н.А. и др. Планктон Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1993. – 280 с.
10. Богуславский С.Г., Беляков Ю.М., Жоров В.А. Особенности гидрологического режима Черного моря // Основы биологической продуктивности Черного моря / Под ред. В.Н. Грезе. – Киев: Наук. думка, 1979. – С. 11 – 23.
11. Тимченко И.Е., Жоров В.А., Игумнова Е.М., Лазарчук И.П. Динамическая модель интегрированных процессов в экосистеме северо-западного шельфа Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 4. – С. 48 – 69.
12. Murray J.D. Mathematical biology II: Spatial Models and Biomedical Applications. 3rd edition. – Springer, 2008. – 736 p.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 04.07.11  
После доработки 19.09.11

**АНОТАЦІЯ** Запропонована інтегральна модель екосистеми північно-західного шельфу Чорного моря для розрахунку сценаріїв просторово-часової мінливості полів фіто- і зоопланктону, кисню, детриту та біогенних елементів у верхньому шарі моря. Побудовані карти цих полів, узгоджені методом адаптивного балансу впливів із супутниковими спостереженнями концентрації хлорофілу *a* та температури моря в цьому районі, виконаними протягом 2007 р. Робиться висновок про доцільність асиміляції супутникової інформації в адаптивних моделях морських екосистем для отримання оцінок неспостережуваних параметрів.

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

**ABSTRACT** Integral model of the Black Sea northwestern shelf ecosystem is proposed for calculating scenarios of spatial-temporal variability of the fields of phyto- and zoo-plankton, oxygen, detritus and biogenic elements in the sea upper layer. The maps of these fields are constructed in agreement (by the method of adaptive balances of causes) with satellite observations of chlorophyll *a* concentration and sea temperature in this region carried out in 2007. Drawn is the conclusion that assimilation of satellite information in the adaptive models of marine ecosystems is advisable for obtaining estimates of the observed parameters.

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