

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

И.П. Лазарчук

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

В статье рассматривается метод построения карт гидрохимических и гидробиологических параметров морских экосистем по данным наблюдений хлорофилла и температуры в верхнем слое акватории северо-западного шельфа Черного моря. В качестве биологических параметров экосистемы рассматриваются средние значения концентраций фитопланктона, зоопланктона, биоресурса, а в качестве гидрохимических – биогенных элементов, детрита и кислорода.

Введение. 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 [1,2]

В данной работе используется АВС-метод [1] для адаптации модельных оценок параметров экосистемы северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ ЧМ) к спутниковым наблюдениям полей хлорофилла-А и поверхностной температуры моря в этом районе. Этим методом восстанавливается по спутниковым наблюдениям пространственно-временная изменчивость полей концентраций биохимических характеристик экосисте-

мы на протяжении всего 2007 года. Рассматривается построение концептуальной модели экосистемы и ее формализация. Использование большого массива спутниковых данных [2] позволило построить карты ненаблюдаемых со спутника полей параметров экосистемы и проследить их эволюцию в течение 2007 года.

Построение упрощенной модели морской экосистемы. В качестве примера можно рассмотреть упрощенную модель морской экосистемы и построить оценки пространственных распределений биоресурса по данным о концентрации хлорофилла и поверхностной температуры моря.

Можно выбрать в качестве основных биологических характеристик экосистемы интегральные оценки концентраций фитопланктона – PP , зоопланктона – ZP и биоресурса – BR , под которыми понимается концентрация всех живых организмов, расположенных выше зоопланктона в пищевой цепи. В качестве гидрохимических параметров экосистемы можно использовать концентрации следующих субстанций: биогенных элементов – NT , детрита – DT и кислорода – OX . Значения концентраций связываются 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-А (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 концентраций 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*), которые непосредственно влияют на концентрации зоопланктона, биоресурса и кислорода. Взаимные связи между выделенными параметрами дают возможность построить концептуальную модель экосистемы, которая изображена на рис. 1.

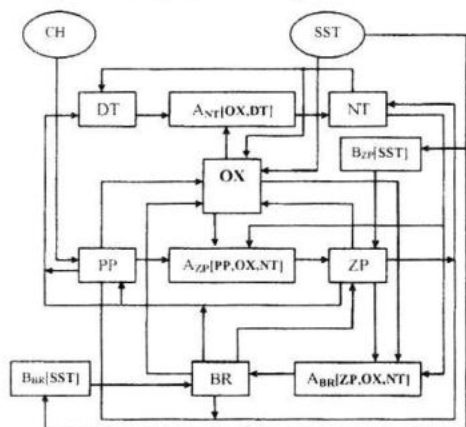


Рис. 1. Концептуальная модель морской экосистемы северо-западного шельфа Черного моря

В структуру модели включены агенты управления, лимитирующие рост концентраций: зоопланктона, биоресурса и биогенных элементов в зависимости от наличия потребляемых ими ресурсов –

$A_{ZP}[PP, OX, NT]$, $A_{BR}[ZP, OX, NT]$ и $A_{NT}[OX, DT]$ соответственно. 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

Для построения модели экосистемы *СЗШЧМ* была использована система уравнений уравнения метода адаптивного баланса влияний [1], которая имеет вид:

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

$$\frac{dx}{dt} = xF^{(-)} - xF^{(+)},$$

где $F^{(+)}$ и $F^{(-)}$ непрерывные монотонные (неубывающие и невозрастающие) базовые функции влияний.

Применяя стандартное уравнение *ABC*-метода (1) к концептуальной модели рис. 1, и используя введенные на нем обозначения процессов, получим следующую систему динамических уравнений *ABC*-модели морской экосистемы:

$$\frac{dPP}{dt} = PP\{1 - 2[PP + a_{PP/ZP}ZP - a_{PP/CH}CH]\},$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
a_{BR/ZP} ZP(t) &= IF[M_{BR}(t) = ZP(t); -a_{BR/ZP} ZP(t); 0], \\
A_{BR/ZP}(t) &= IF[ZP(t) < ZP_c; 0; 1], \\
a_{BR/OX} OX(t) &= IF[M_{BR}(t) = OX(t); -a_{BR/OX} OX(t); 0], \\
A_{BR/OX}(t) &= IF[OX(t) < OX_c; 0; 1], \\
a_{BR/NT} NT(t) &= IF[M_{BR}(t) = NT(t); -a_{BR/NT} NT(t); 0], \\
A_{BR/NT}(t) &= IF[NT(t) < NT_c; 0; 1], \\
M_{BR} &= \arg \min \{ZP(t); OX(t); NT(t)\}, \\
B_{BR}(SST) &= a_{BR/SST} \exp[-\alpha_{BR}(SST - SST_{BR}^*)^2]; \\
\frac{dNT}{dt} &= NT \{1 - 2[NT - A_{NT}(OX, DT) + a_{NT/PP} PP + a_{NT/ZP} ZP + a_{NT/BR} BR]\}, \\
A_{NT}(OX, DT) &= a_{NT/OX} OX(t) A_{NT/OX}(t) + a_{NT/DT} DT(t) A_{NT/DT}(t) + a_{BR/NT} NT(t) A_{BR/NT}(t), \\
a_{NT/DT} DT(t) &= IF[M_{NT}(t) = DT(t); -a_{NT/DT} DT(t); 0], \\
A_{NT/DT}(t) &= IF[DT(t) < DT_c; 0; 1], \\
a_{NT/OX} OX(t) &= IF[M_{NT}(t) = OX(t); -a_{NT/OX} OX(t); 0], \\
A_{NT/OX}(t) &= IF[OX(t) < OX_c; 0; 1], \\
M_{NT} &= \arg \min \{OX(t); DT(t)\}; \\
\frac{dOX}{dt} &= OX [1 - 2(OX - A_{OX/PP} PP + a_{OX/ZP} ZP + a_{OX/BR} BR + a_{OX/NT} NT + a_{OX/SST} SST)]; \\
\frac{dDT}{dt} &= DT [1 - 2(DT - a_{DT/PP} PP - a_{DT/ZP} ZP - a_{DT/BR} BR + a_{DT/NT} NT)].
\end{aligned}
\tag{2}$$

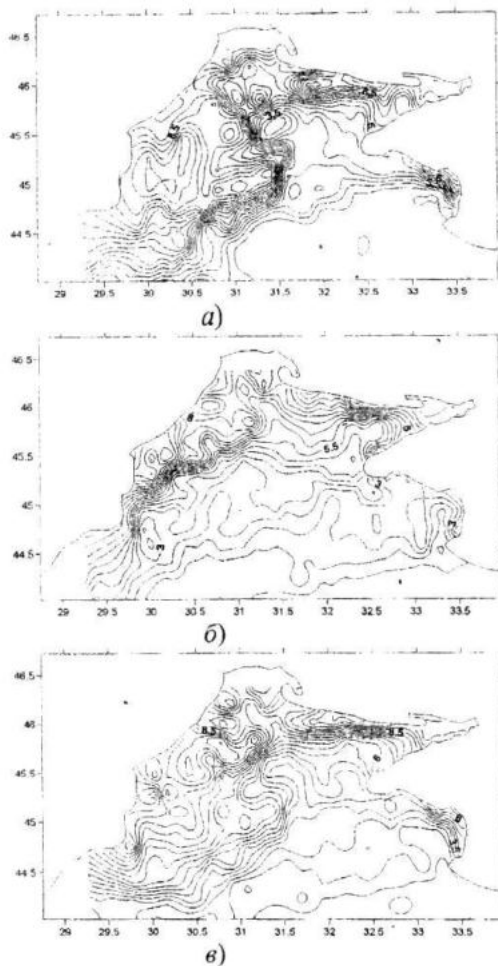
В модели предусмотрены нижние предельно допустимые концентрации фитопланктона PP_c , зоопланктона ZP_c , биогенных элементов NT_c и кислорода OX_c . Если лимитирующий параметр в данной точке пространственной области опускается ниже предельно допустимого значения, агенты управления обращают его в нуль. Наиболее благоприятные для развития зоопланктона и биоресурса значения температуры верхнего слоя моря обозначены SST_{ZP}^* и SST_{BR}^* соответственно.

Построение карт параметров экосистемы СЗШ ЧМ по спутниковым данным. Для оценки пространственно-временной динамики параметров экосистемы СЗШ ЧМ были использованы сценарии внутригодовой изменчивости хлорофилла-А и поверхностной температуры, построенные по спутниковым данным для каждого узла квадратной

сетки с шагом 10 км, покрывавшей район СЗШ ЧМ. Имевшие место отдельные пропуски во временных рядах спутниковой информации были восполнены путем линейной интерполяции (рис. 2 и 3).

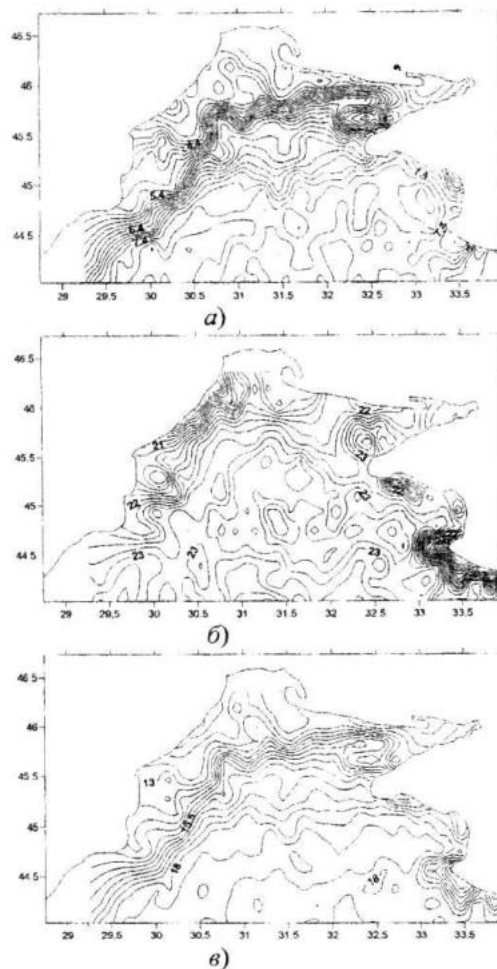
Уравнения модели (2) решались в каждом узле сеточной области, в результате чего были построены сценарии внутригодовой изменчивости всех параметров экосистемы, аналогичные приведенным ниже (рис. 6).

Таким образом, по спутниковым данным была восстановлена пространственно-временная динамика экосистемы для условий 2007 года. Некоторое представление о ней дают карты параметров экосистемы для трех сезонов, приведенные ниже на рис. 4, 5, 7 – 9: для зимних условий по состоянию на 20 февраля 2007 года, для летних условий – на 15 августа и для осенних условий – на 15 ноября.



Р и с. 2. Используемые в расчетах поля концентраций хлорофилла, построенные и интерполированные по данным дистанционного зондирования морской поверхности: а) – 15.02.2007; б) – 15.08.2007; в) – 15.11.2007

На рис. 4 показаны сезонные изменения поля концентрации фитопланктона. Это поле оказалось наиболее чувствительным к спутниковой информации о поле хлорофилла-А, поскольку данные этих наблюдений выполняли роль основного источника (драйва) в уравнении для *PP* модели (2). Как следует из рис. 4, наибольшие градиенты концентраций хлорофилла-А, а, следовательно, и фитопланктона, приурочены к фронтальным зонам, где существуют большие градиенты температуры. Зимой они наблюдаются в центре района, на границе шельфа (рис. 4, а), в летний период область высоких градиентов перемещается в прибрежную зону (рис. 4, б), осенью – снова смещается в сторону свала глубин (рис. 4, в). 2007 год характеризовался

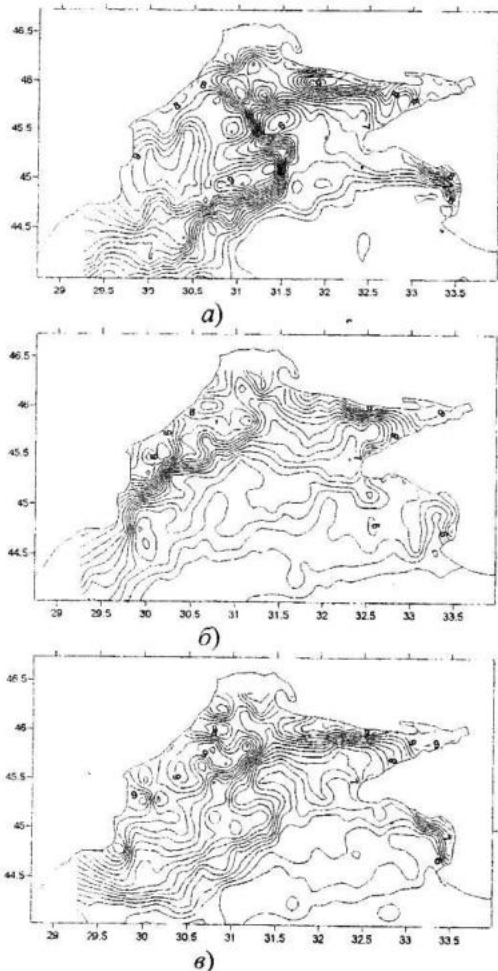


Р и с. 3. Используемые в расчетах поля поверхностной температуры, построенные и интерполированные по данным дистанционного зондирования морской поверхности: а) – 15.02.2007; б) – 15.08.2007; в) – 15.11.2007

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 на рис. 5 и биоресурса – на рис. 7.

Поле концентраций кислорода (рис. 8) формировалось под действием большого количества влияющих факторов (фито-,зоопланктона, биоресурса, биогенов, температуры), что обусловило более значительную изменчивость этого поля, 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

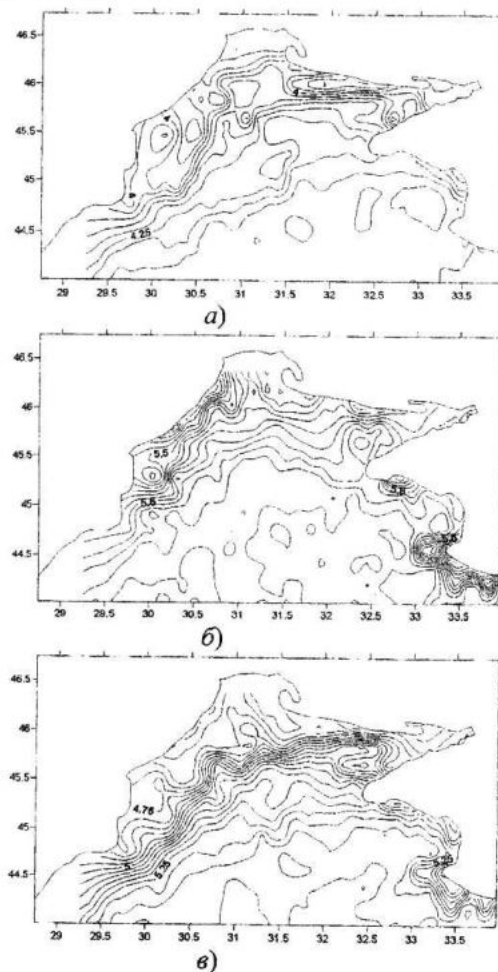


Р и с. 4. Поле концентраций фитопланктона, рассчитанное по спутниковым данным: а) – 15.02.2007; б) – 15.08.2007; в) – 15.11.2007

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, все эти три поля находились под влиянием спутниковой информации о поле поверхностной температуры моря.

На рис. 9 приведены карты концентраций биогенных веществ NT и детрита DT по состоянию на 20.02.2007, согласованные с концентрациями PP , ZP и BR ,

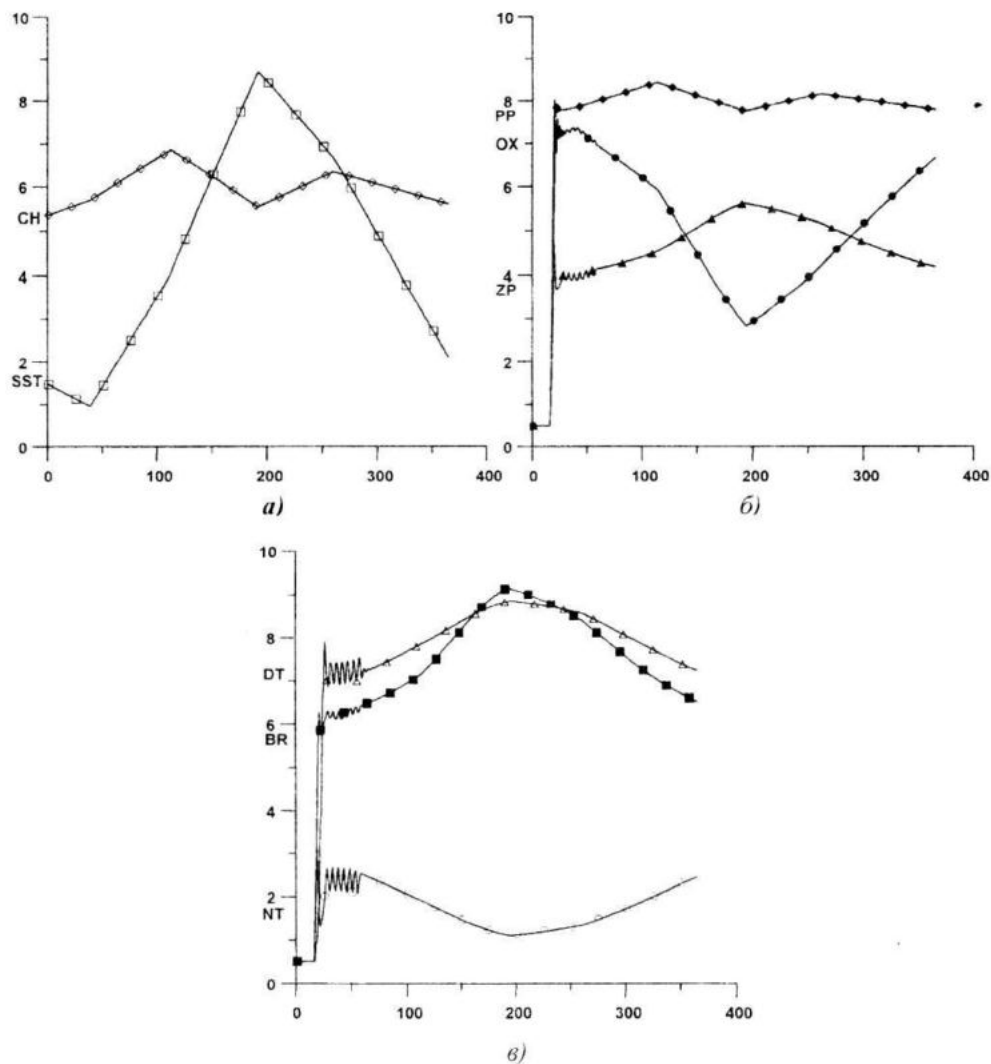
адаптированными к спутниковой информации.



Р и с. 5. Поле концентраций зоопланктона, адаптированное к распределениям фитопланктона и к спутниковым данным о поверхностной температуре моря: а) – 20.02.2007; б) – 15.08.2007; в) – 15.11.2007

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 концентраций 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, которое лимитировало превращение DT в NT .

Построенные карты позволяют приближенно оценить распределение мор-



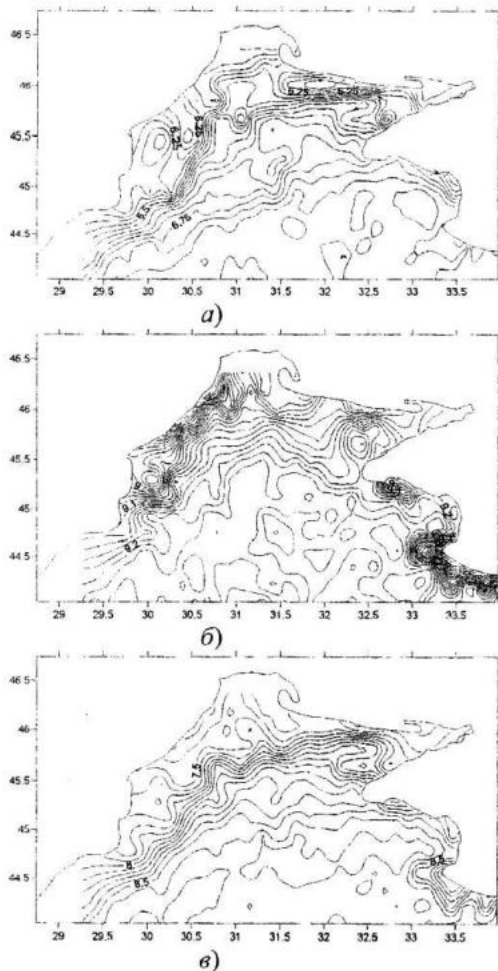
Р и с. 6. Сценарии процессов в экосистеме, адаптированные к спутниковым данным в точке с координатами $46^{\circ} 01' \text{ с.ш.}, 30^{\circ} 54' \text{ в.д.}$: а) \diamond – CH; \square – SST; б) \bullet – OX; \blacktriangle – ZP; \diamond – PP; в) \triangle – DT; \blacksquare – BR; \circ – NT

ских биоресурсов по акватории *СЗШ ЧМ*. Районы возможных наибольших концентраций биоресурса совпадают с местами проникновения в море распресненных речных вод, поступающих от стоков Дуная, Днестра и Буга. Это – прибрежные зоны акватории *СЗШ ЧМ*, для которых характерно повышенное содержание биогенных элементов и детрита. В них преобладают благоприятные для развития рыб температура воды, содержание зоопланктона, кислорода и биогенных элементов.

Заключение. Адаптивные модели морских экосистем основаны на принципе стремления экосистемы к состоянию динамического баланса с внешними влияниями, приложенными к системе.

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. 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 года. Таким образом, была восстановлена внутригодовая

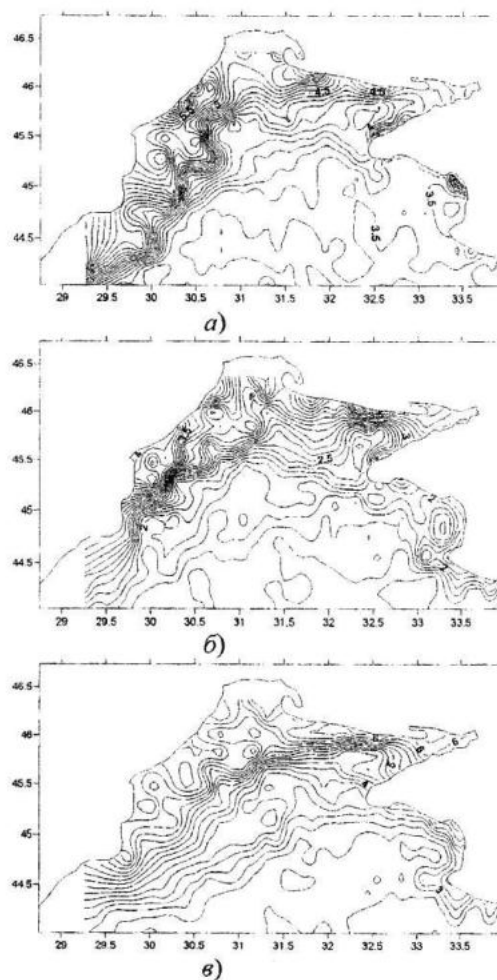
пространственно-временная изменчивость шести параметров состояния экосистемы СЗШ ЧМ, согласованная со спутниковой информацией.



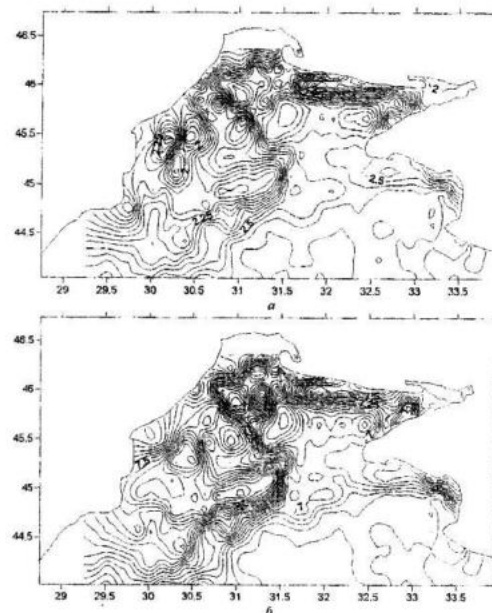
Р и с. 7. Поле концентраций биоресурса, адаптированное к распределениям зоопланктона и к спутниковым данным о поверхностной температуре моря: а) – 20.02.2007; б) – 15.08.2007; в) – 15.11.2007

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и АВС- технологии устойчивого развития. – Севастополь: Изд. “ЭКОСИ – Гидрофизика”, 2000. – 225 с.
2. Пухтяр Л.Д., Станичный С.В., Тимченко И.Е. Оптимальная интерполяция данных дистанционного зондирования морской поверхности Морской гидрофизический журнал, 2009, № 4 – С. 34 – 50.



Р и с. 8. Поле концентраций кислорода: а) – 20.02.2007; б) – 15.08.2007; в) – 15.11.2007



Р и с. 9. Карты концентраций биогенных веществ (а) и детрита (б), адаптированными к спутниковой информации по состоянию на 20.02.2007