

В.Л. Дорофеев, Г.К. Коротаев, Л.И. Сухих

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМЫ ЧЕРНОГО МОРЯ**

В работе изучается эволюция экосистемы Черного моря на протяжении трех десятилетий – с начала семидесятых годов прошлого столетия по начало нынешнего века. За это время морская экосистема претерпела существенные изменения от предэвтрофикационного состояния до стадии эвтрофикации в восьмидесятых – первой половине девяностых. Помимо количественных вариаций объема биологической продукции в верхнем слое моря эти изменения наблюдались также в составе компонентов экосистемы и их сезонном цикле. Изучение эволюции экосистемы Черного моря проводится на основе трехмерной численной междисциплинарной модели, состоящей из модели циркуляции и биогеохимического блока.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Черное море, экологическая система, экологическая модель, хлорофилл-«а», нитраты.*

**Введение.** Последние несколько десятилетий характеризуются существенной трансформацией морской экосистемы бассейна Черного моря. Эти изменения проявились в биомассе, структуре и сезонном цикле фитопланктона. После относительно здорового состояния 60-х – начала 70-х годов прошлого столетия экосистема Черного моря испытала интенсивную эвтрофикацию, резкое уменьшение биологического разнообразия и рыбных запасов в течение последующих лет. Такие драматические изменения в экосистеме Черного моря были следствием, как климатических изменений, так и внешнего антропогенного воздействия. Выздоровление экосистемы Черного моря, начавшееся в середине 90-х годов, объясняется некоторыми защитными мерами, предпринятыми для контроля над антропогенным загрязнением и чрезмерным выловом рыбы. В данной работе представлены результаты моделирования эволюции экосистемы Черного моря в течение трех десятилетий с 1971 по 2001 гг. Анализ проведен на основе результатов численного моделирования, выполненного по трехмерной междисциплинарной модели Черного моря.

**Модель экосистемы Черного моря.** Междисциплинарная модель экосистемы Черного моря, описывающая нижние уровни пищевой цепи, состоит из двух основных блоков: модели циркуляции и биогеохимической модели. Между этими частями существует односторонняя связь: гидрофизические поля, получаемые по модели циркуляции, используются затем в качестве входных параметров биогеохимического блока. В данной работе для периода времени с 1971 по 1993 гг. использовались результаты реанализа [1], а с 1994 по 2001 гг. – гидродинамические поля, полученные по модели циркуляции с ассимиляцией спутниковых альтиметрических данных. В обоих случаях использовалась модель циркуляции Черного моря, созданная на основе модели РОМ, адаптированной к условиям Черного моря [2].

Преимуществом модели циркуляции на основе этой модели (*ПОМ*) является наличие турбулентной подмодели, позволяющей реалистично воспроизводить процессы перемешивания в верхнем слое моря, играющие большую роль в снабжении биогенами верхнего фотического слоя, в котором в основном происходят биологические процессы, описываемые в модели. Пространственный шаг сетки модели циркуляции составляет примерно 8 км (141 × 88 узлов). Вертикальное разрешение модели – двадцать шесть расчетных уровней в  $\sigma$ -координатах, сгущающихся у поверхности. В качестве внешнего воздействия в модели были заданы поля поверхностной температуры, потоков тепла и пресной воды, а также солнечная радиация. Эти поля, которые берутся из данных реанализа *ERA-40*, имеют периодичность 6 часов и интерполируются на сетку модели циркуляции. Альтиметрические данные представляют собой вдольтрековые аномалии возвышений уровня моря, полученные с различных спутников (выставляются на сайте *AVISO*). Процедура ассимиляции данных спутниковой альтиметрии, использовавшаяся в [3], была адаптирована к модели *ПОМ*.

Биогеохимическая часть модели экосистемы занимает верхний двухсотметровый слой моря и состоит из 15 компонент. Нижний уровень пищевой цепи представляют две группы фитопланктона (диатомовые и флагелляты). Второй пищевой уровень представляют две размерные группы зоопланктона: микрозоопланктон (размеры менее 0,2 мм) и мезозоопланктон (размеры от 0,2 до 3,0 мм). Верхний уровень пищевой цепи занимают медузообразные *Aurelia aurita* и *Mnemiopsis leidyi*. Отдельную группу представляет всеядная динофлагеллята *Noctiluca scintillans*, потребляющая фитопланктон, бактериопланктон, микрозоопланктон и взвешенную органику. Пищевая цепь включает в себя также бактериопланктон, растворенную и взвешенную органику. Представленная модель основана на азотном цикле (азот рассматривается как единственный ограничивающий элемент). В азотный цикл включены три неорганических соединения: аммоний, нитраты и нитриты. В биогеохимическую модель также входят в качестве отдельных переменных состояния растворенные кислород и сероводород. Изменение во времени составляющих экосистемы описывается уравнениями переноса-диффузии, включающими в правую часть слагаемые типа источников-стоков. Параметризация потоков азота при взаимодействии различных компонентов биогеохимической модели содержит большое количество размерных или безразмерных коэффициентов. Величины этих коэффициентов выбираются согласно работам [4 – 6]. На поверхности моря задаются нулевые потоки всех переменных состояния кроме кислорода. На нижней границе, в той ее части, где она жидкая (горизонт 200 м), ставятся нулевые условия для всех компонентов экосистемы кроме аммония и сероводорода, а в мелководной части моря на дне – условия отсутствия потоков. Такие же условия ставятся на боковых границах, за исключением устьев крупных рек, где задаются потоки биогенов пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока [7]. Биогеохимическая модель имеет такое же горизонтальное пространственное разрешение, как и модель циркуляции. В вертикальном направлении двадцать шесть расчетных  $z$ -уровней расположены неравномерно – более часто у поверхности. Необходимые гидрофизические поля, получаемые по модели циркуляции, интерполируются на сетку биогеохимической модели.

**Результаты моделирования эволюции экосистемы.** Эволюция средней за год биомассы фито- и зоопланктона в верхнем пятидесятиметровом слое для различных частей Черного моря представлена на рис. 1.

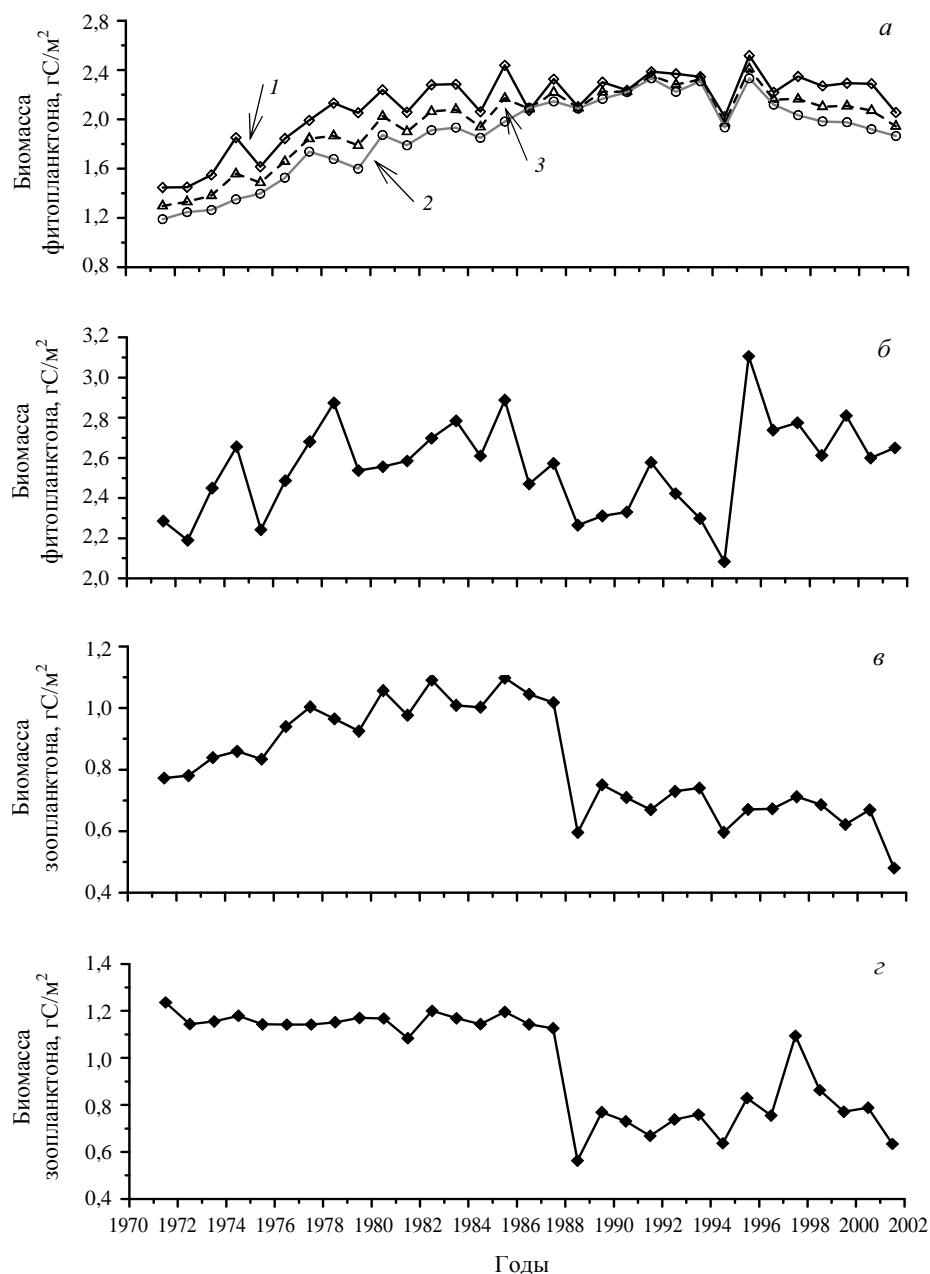


Рис. 1. Временная эволюция среднегодовых значений биомассы фито- и зоопланктона (*a*, *б*) и зоопланктона (*в*, *г*) в глубоководной части Черного моря (*a*, *в*) и на северо-западном шельфе (*б*, *г*). 1 – результаты осреднения по западной глубоководной части Черного моря, 2 – по восточной глубоководной части Черного моря, 3 – по всей площади глубоководной части Черного моря.

В глубоководной части Черного моря средняя по площади бассейна биомасса фитопланктона в верхнем 50-метровом слое выросла с начала 70-х по начало 90-х годов примерно вдвое, затем она начала уменьшаться. При этом для западной и восточной глубоководных частей Черного моря наблюдается значительная разница биомассы фитопланктона (за исключением периода с конца 80-х до середины 90-х годов прошлого столетия). Как видно из рис. 1, б, г, в этот период в кривой эволюции на шельфе наблюдается небольшой провал. То есть, в этот период влияние биопродукции с шельфа, где ее уровень в целом выше примерно в полтора раза, на глубоководную часть уменьшилось. Средняя биомасса фитопланктона на шельфе увеличилась с начала 70-х до конца 80-х годов не так значительно: с  $2,2 \text{ гС/м}^2$  до примерно  $2,7 \text{ гС/м}^2$ . Затем величина биомассы фитопланктона на северо-западном шельфе снижается вплоть до середины 90-х годов прошлого столетия, после чего в 1995 г. следует всплеск и затем опять уменьшение биомассы.

Рост первичной продукции в глубоководной части моря получил отклик в виде некоторого роста биомассы зоопланктона, который закончился в конце 80-х годов резким уменьшением. На северо-западном шельфе среднегодовая биомасса зоопланктона держалась практически постоянной до конца 80-х и затем, как и в глубоководной части, резко упала. Это внезапное изменение популяции зоопланктона в конце 80-х годов связано с появлением гребневика *Mnemiopsis leidy*, который в это время стали наблюдать в больших количествах во многих районах Черного моря.

На рис. 2 представлена эволюция биомассы *Aurelia* и *Mnemiopsis* в глубоководной части Черного моря за десятилетний период с конца 80-х до середины 90-х годов: представлены как результаты моделирования, так и результаты измерений в открытой части моря [7].

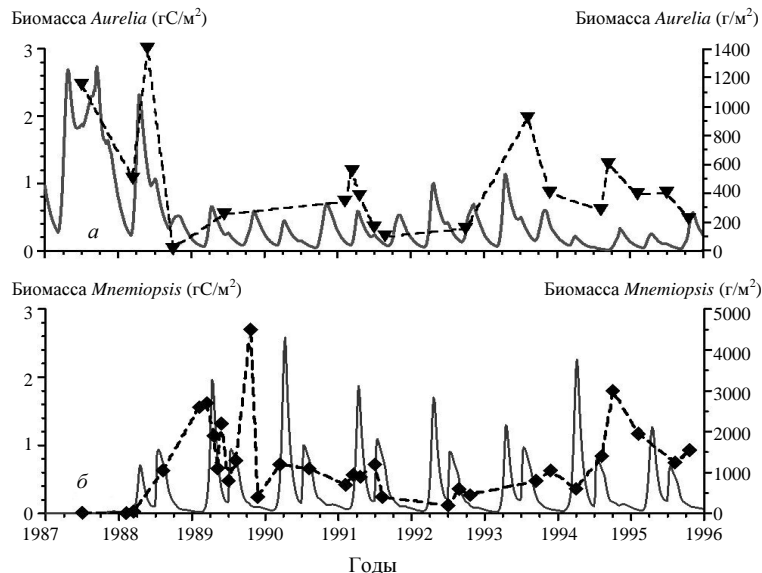


Рис. 2. Декадная эволюция биомассы *Aurelia aurita* (а) и *Mnemiopsis leidy* (б) в глубоководной части Черного моря. Сплошные линии, численные значения которых соответствуют левым осям графиков, показывают результаты моделирования. Значки, соединенные пунктиром означают данные измерений [8].

До 1988 г. *Aurelia aurita* доминировала в группе хищников пищевой цепи рассматриваемой системы. После появления гребневика *Mnemiopsis leidy*, занесенного в Черное море с балластными водами танкеров, он стал доминировать в экосистеме, так как не имел в то время естественного хищника. 1988 – 1991 гг. характеризуют этап перехода экосистемы Черного моря от доминирования *Aurelia aurita* к доминированию *Mnemiopsis leidy*. В результате, популяция медузы *Aurelia aurita* резко уменьшилась, а численность *Mnemiopsis leidy* возросла. Кроме того, появление дополнительного хищника в этот период привело к резкому уменьшению популяции мезо- и микрозоопланктона.

Рассмотрим временную эволюцию поверхностных характеристик. На рис. 3 показана изменчивость осредненной за год и по площади поверхностной концентрации фитопланктона для глубоководной части Черного моря и северо-западного шельфа. Здесь же (см. рис. 3) изображено поведение осредненных величин нитратов в слое максимума (для глубоководной части) и поступление нитратов на северо-западный шельф с речным стоком, которые использовались в расчетах [7].

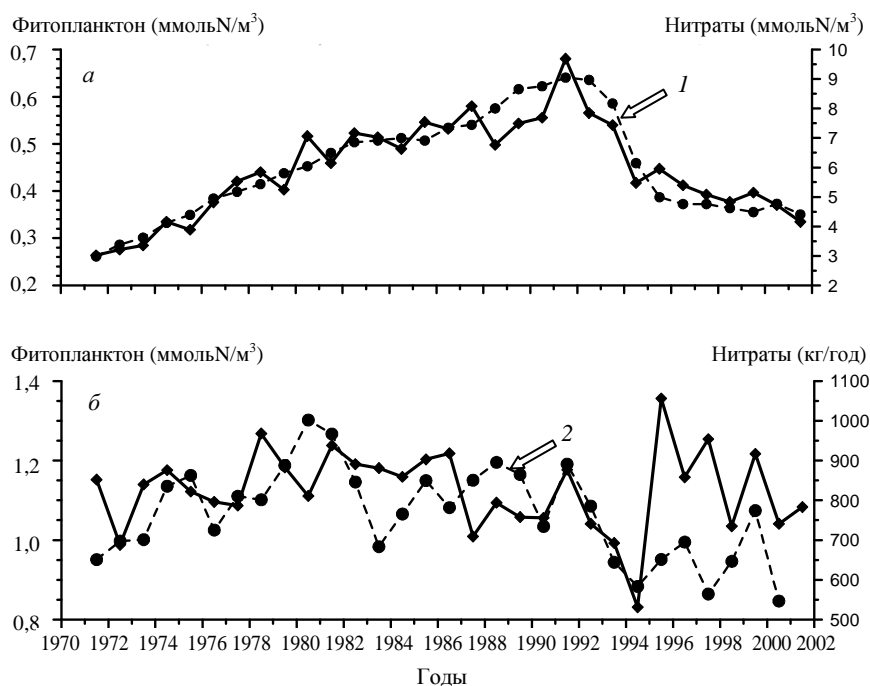


Рис. 3. Временная эволюция среднегодовых значений средних по площади поверхностных концентраций фитопланктона в глубоководной части Черного моря (а) и на северо-западном шельфе (б). 1 – эволюция значений концентраций нитратов в слое максимума; 2 – поступление нитратов на северо-западный шельф Черного моря с речным стоком.

Концентрация поверхностного фитопланктона возросла в глубоководной части моря от значений  $0,25 \text{ ммольN/м}^3$  в начале 70-х до  $0,7 \text{ ммольN/м}^3$  в начале 90-х, а затем начала падать. При этом кривая изменения концентрации фитопланктона очень хорошо отслеживает кривую изменения величины концентрации нитратов в слое максимума. На северо-западном шельфе

поверхностная концентрация фитопланктона в среднем в два и более раз выше, чем в глубоководной части моря. Она также растет до середины 80-х вместе с ростом поступления нитратов с речным стоком, а затем начинает опускаться.

Нитраты являются основным питательным веществом в рассматриваемой системе. Поэтому изменение количества фитопланктона в верхнем слое моря напрямую связано с содержанием в этом слое нитратов. На рис. 4 представлена эволюция осредненной за год и по площади поверхностной концентрации нитратов в глубоководной части Черного моря и на его северо-западном шельфе.

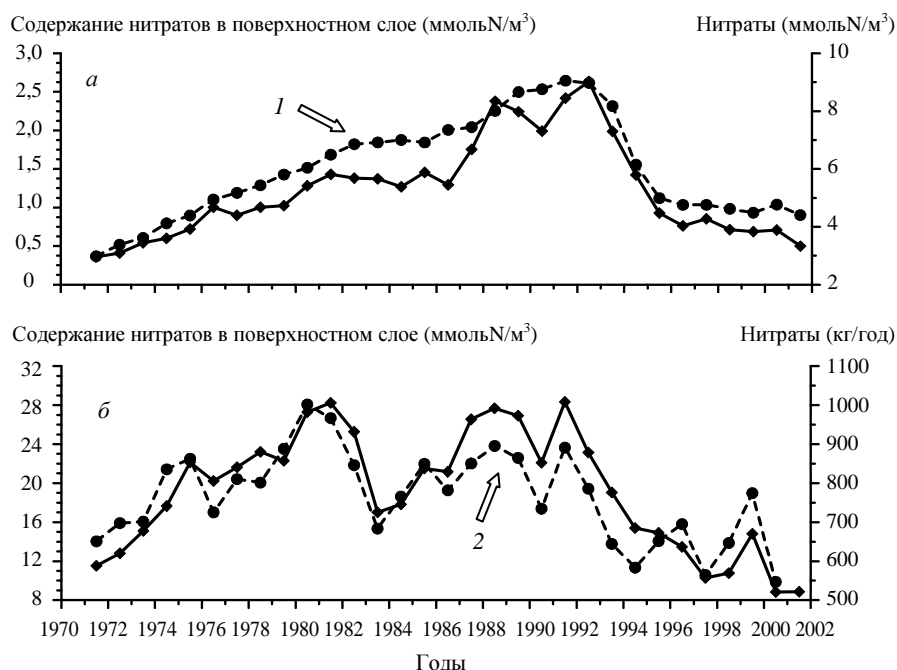


Рис. 4. Временная эволюция среднегодовых значений средних по площади поверхностных концентраций нитратов в глубоководной части Черного моря (а) и на северо-западном шельфе (б). 1 – эволюция значений концентраций нитратов в слое максимума; 2 – поступление нитратов на северо-западный шельф с речным стоком.

В глубоководной части моря средняя концентрация нитратов в поверхностном слое выросла примерно в пять раз за двадцать лет и четко следует изменениям величины максимума нитратов, который наблюдается на глубинах 60 – 70 м. Как известно, в глубоководной части Черного моря нитраты в поверхностный слой поступают из нижних слоев с высокой концентрацией во время интенсивного зимнего перемешивания. Количество поступивших в верхний слой нитратов напрямую зависит от величины концентрации в слое максимума. По данным измерений в рассматриваемый период времени значение максимума нитратов значительно менялось. В конце 60-х годов оно составляло величину 2 – 3  $\text{mmol N/m}^3$ , затем в конце 80-х годов – выросло до 8  $\text{mmol N/m}^3$  и далее упало до величины около 4  $\text{mmol N/m}^3$  в начале нынешнего века, что хорошо видно на показанных на рис. 5 распределениях нитратов.

На северо-западном шельфе основным фактором, влияющим на величину концентрации нитратов в поверхностном слое, является поступление нитратов

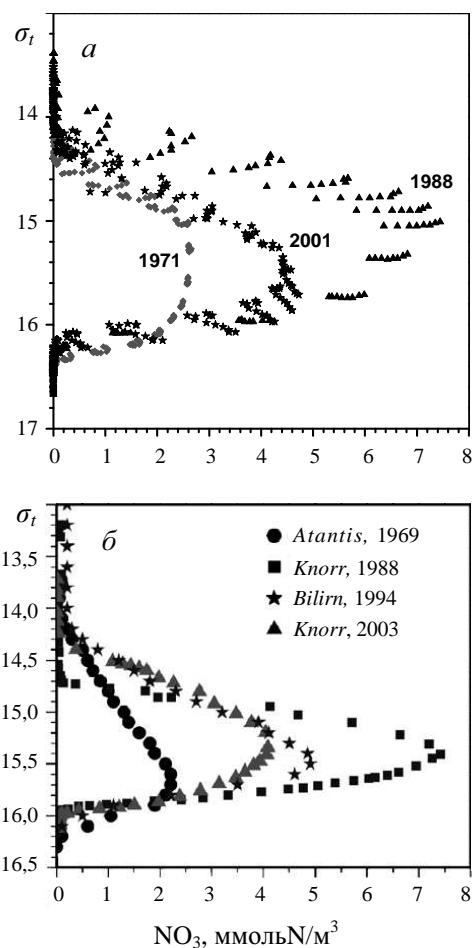


Рис. 5. Распределение нитратов в зависимости от плотности морской воды для глубоководной части моря: *a* – результаты моделирования; *b* – данные измерений (взяты из работы [9]).

планктона происходит в конце зимы-начале весны, когда в поверхностном слое аккумулированы нитраты в результате интенсивного зимнего перемешивания, и он получает достаточно солнечного света. За цветением фитопланктона следует всплеск популяции зоопланктона, который питается фитопланктоном. В результате содержание фитопланктона в поверхностном слое моря резко уменьшается. В свою очередь фитопланктон поедается медузой *Aurelia aurita*. К концу весны происходит ее цветение, и численность зоопланктона резко уменьшается. В годовом цикле фитопланктона также заметны летний подповерхностный максимум и цветение в конце осени-начале зимы. На рис. 6 – рис. 8. показана эволюция трех компонентов экосистемы в верхнем стометровом слое глубоководной части моря для трех лет, соответствующих предэвтрофикационному состоянию экосистемы и во время эвтрофикации.

со стоком рек, главным образом – Дуная. Это хорошо видно из графиков, приведенных на рис. 4, где кривая изменения содержания нитратов в поверхностном слое хорошо отслеживает кривую, показывающую поступление нитратов на северо-западный шельф с речным стоком. В то же время, возвращаясь к рис. 3 отметим, что четкая корреляция между содержанием в поверхностном слое фитопланктона и поступлением нитратов отсутствует. Это, по-видимому, объясняется тем, что нитратов здесь достаточно много, и они не ограничивают рост первичной продукции. Ее изменения в данном случае вызываются, в большей степени, другими факторами: погодными условиями, освещенностью и т.д.

В течение рассматриваемого периода эволюция экосистемы Черного моря проявилась не только в изменении биомассы ее компонентов, но и в изменении сезонного цикла. Естественный годовой цикл фитопланктона изменился на более сложный. Основное цветение фито-

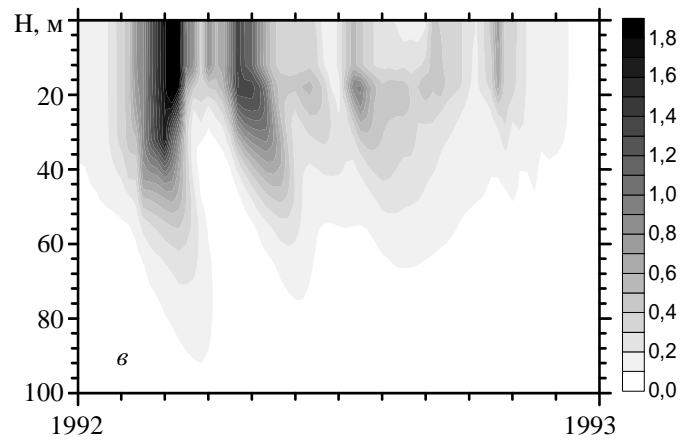
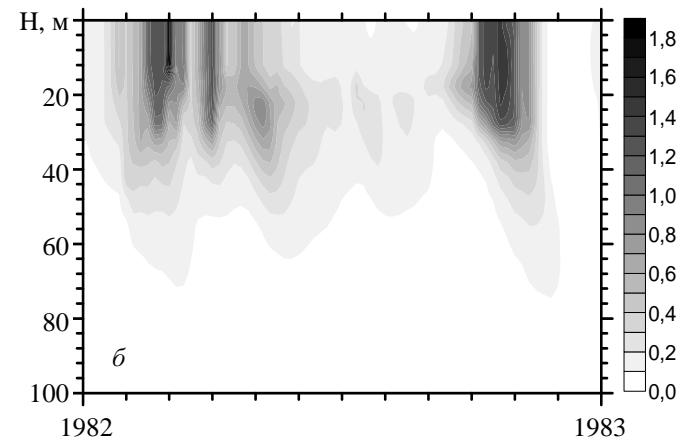
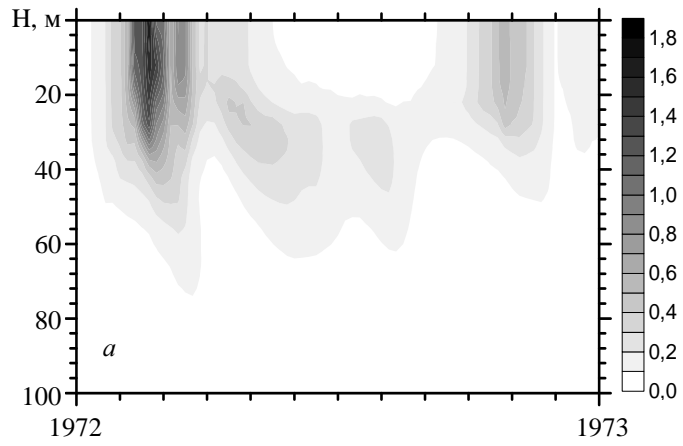


Рис. 6. Сезонная эволюция концентрации фитопланктона ( $\text{mmol N/m}^3$ ) для трех лет: *a* – 1972 г.; *б* – 1982 г.; *в* – 1992 г.



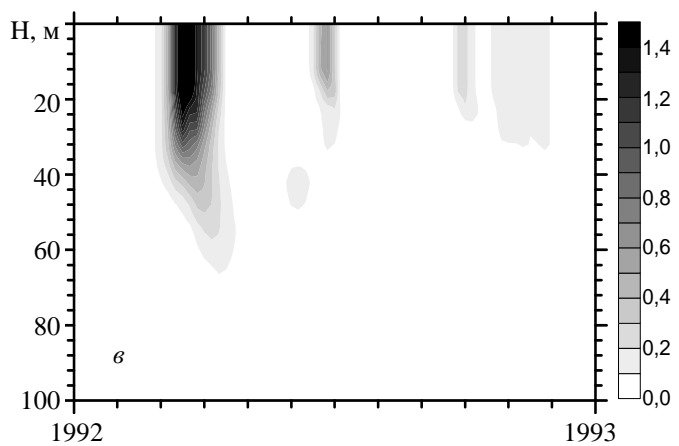
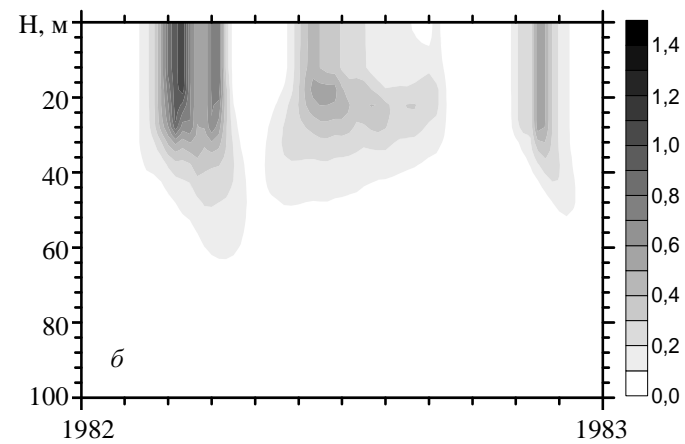
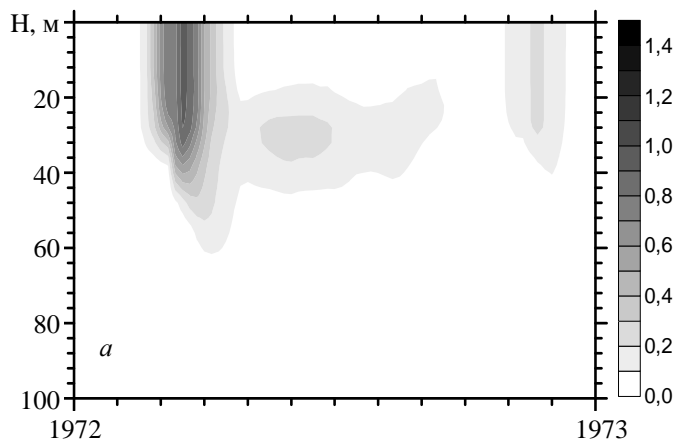


Рис. 7. Сезонная эволюция концентрации зоопланктона (ммольN/м<sup>3</sup>) для трех лет: *a* – 1972 г.; *б* – 1982 г.; *в* – 1992 г.

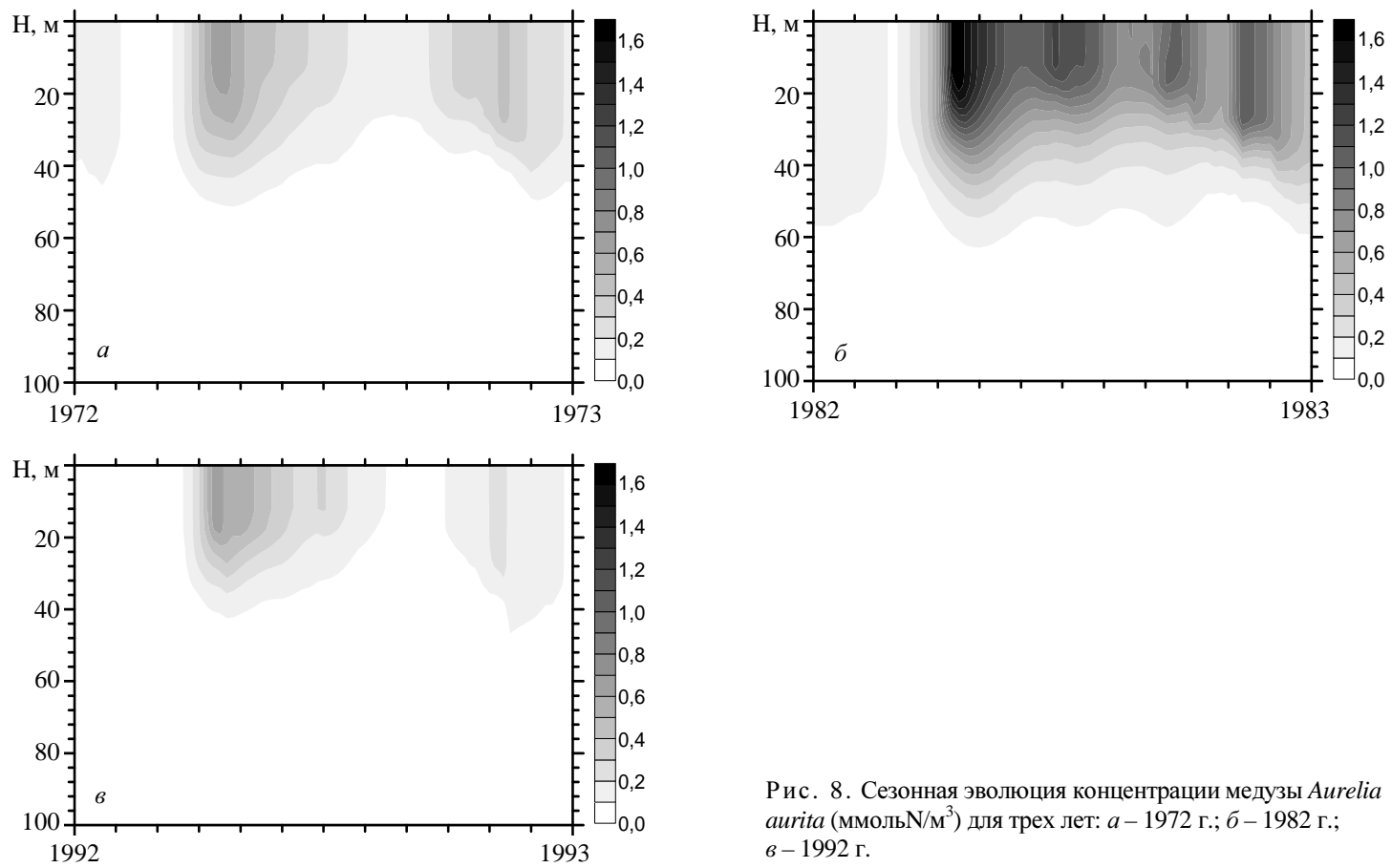


Рис. 8. Сезонная эволюция концентрации медузы *Aurelia aurita* ( $\text{mmol N/m}^3$ ) для трех лет: *a* – 1972 г.; *b* – 1982 г.; *v* – 1992 г.

В 1982 г. интенсивность весеннего цветения фитопланктона стала выше по сравнению с 1972 г. Кроме того, весенний пик в концентрации фитопланктона разбивается на два, а летний подповерхностный максимум стал интенсивнее и имеет более сложную структуру. Весенний максимум в концентрации зоопланктона также разделится на два, расположенных близко по времени. Цветение медузы *Aurelia* имеет несколько максимумов, самый большой из которых приходится на апрель-май. В 1992 г., когда в экосистеме появился и доминировал новый хищник – гребневик *Mnemiopsis leidyi*, фитопланктон испытывает ряд цветений, самое интенсивное из которых по-прежнему приходится на начало весны. Сезонный ход содержания зоопланктона в верхнем слое моря также имеет несколько пиков, при этом подповерхностный максимум в этом году не наблюдается. Сезонный ход численности медузы *Aurelia* в 1992 г. примерно такой же, как в 1972 г.: имеется максимум в апреле-мае и затем второй, меньшей интенсивности, в конце осени (см. рис. 8).

Как отмечалось выше, нитраты в рассматриваемой системе являются главным питательным веществом для первичной продукции. От насыщенности верхнего слоя моря питательным веществом зависит уровень концентрации фитопланктона. На рис. 9, приведен график изменения со временем поверхностной концентрации нитратов в глубоководной части Черного моря за рассматриваемый период.

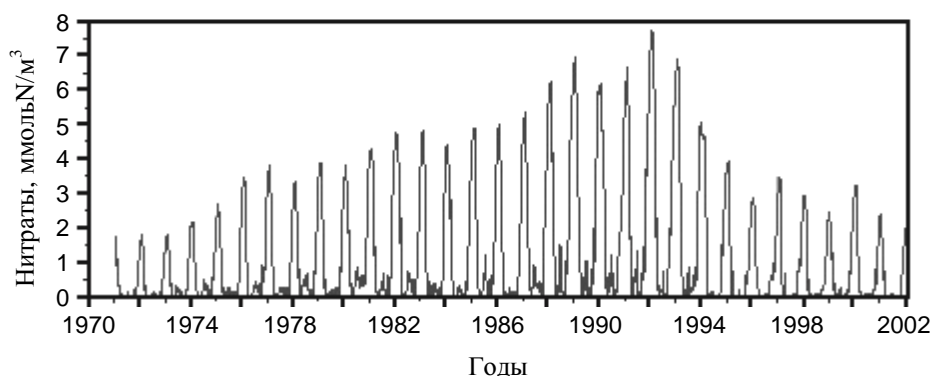


Рис. 9. Временная изменчивость средней по площади бассейна поверхностной концентрации нитратов в глубоководной части Черного моря.

Сезонный ход имеет ярко выраженный пик в зимнее время, связанный с интенсивными зимними процессами перемешивания, в результате чего в поверхностный слой моря из нитроклина поступает большое количество нитратов. Затем они расходуются в результате производства первичной продукции, и в течение остального времени года концентрация нитратов у поверхности низкая. В то же время, хорошо видна межгодовая изменчивость, связанная главным образом с изменением значений концентрации нитратов в слое максимума. С начала 70-х до пика в 1992 г. значение поверхностной концентрации выросло в четыре раза. В сезонном ходе концентрации фитопланктона основной чертой является весеннее цветение.

На рис. 10 показана межгодовая эволюция средней за весенний сезон поверхностной концентрации фитопланктона в глубоководной части моря.

Там же приведены значения зимнего максимума поверхностного распределения нитратов. Видно, что эти две величины хорошо коррелируют: растет концентрация нитратов в зимний период, соответственно растет содержание фитопланктона в поверхностном слое весной.

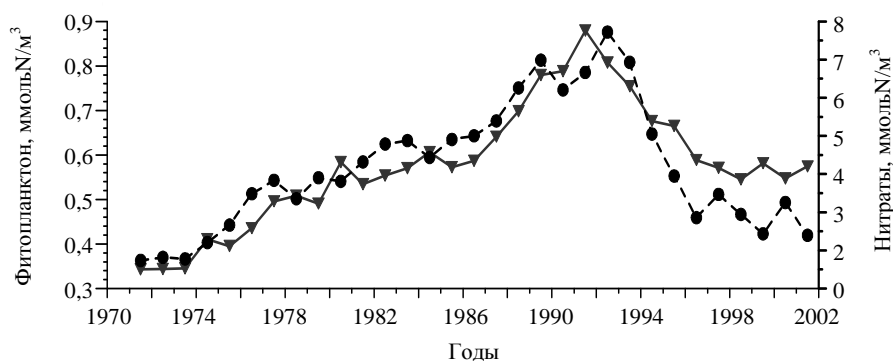


Рис. 10. Эволюция значений зимнего максимума поверхностной концентрации нитратов (●) и средней за весенний сезон поверхностной концентрации фитопланктона (▼).

Интенсивность биологических процессов в поверхностном слое Черного моря зависит как от изменений в слое максимума нитратов так и от погодных условий. Основное количество питательных веществ поступает в фотическую зону глубоководной части моря в зимний сезон. Это количество зависит от интенсивности перемешивания, которое в свою очередь зависит от интенсивности и продолжительности зимних штормов на Черном море и поверхностной температуры воды. Чем ниже опускается зимой температура, тем глубже проникает конвекция. На рис. 11 приведены значения зимнего поверхностного максимума нитратов в глубоководной части моря и содержание в поверхностном слое фитопланктона в весеннее время вместе со значениями средней за зиму температуры поверхности моря для разных лет.

Хотя основная межгодовая изменчивость в поверхностном содержании нитратов и фитопланктона связана с содержанием нитратов в нитроклине, также видна связь между понижением зимней температуры моря и повышением содержания нитратов в верхнем слое и затем запасами фитопланктона.

Снабжение верхнего приповерхностного слоя нитратами в зимнее время может быть проиллюстрировано рис. 12, на котором изображено распределение по глубине и по времени (с начала 1988 по конец 1993 гг.) концентрации нитратов в центральной глубоководной части моря. Отчетливо видно, как в зимнее время нитраты поднимаются к поверхности моря. Затем, когда света становится достаточно, они потребляются фитопланктоном и их концентрация в поверхностном слое остается незначительной вплоть до начала следующей зимы. В 1992 и 1993 гг., когда зимы были самые холодные, к поверхности поднялось больше нитратов, чем в более теплые зимы.

Появление в последнее время спутниковых данных о содержании поверхностного хлорофилла-«а», получаемых цветовыми сканерами, позволяет сравнить результаты моделирования с реальной картиной, наблюдаемой в природе.

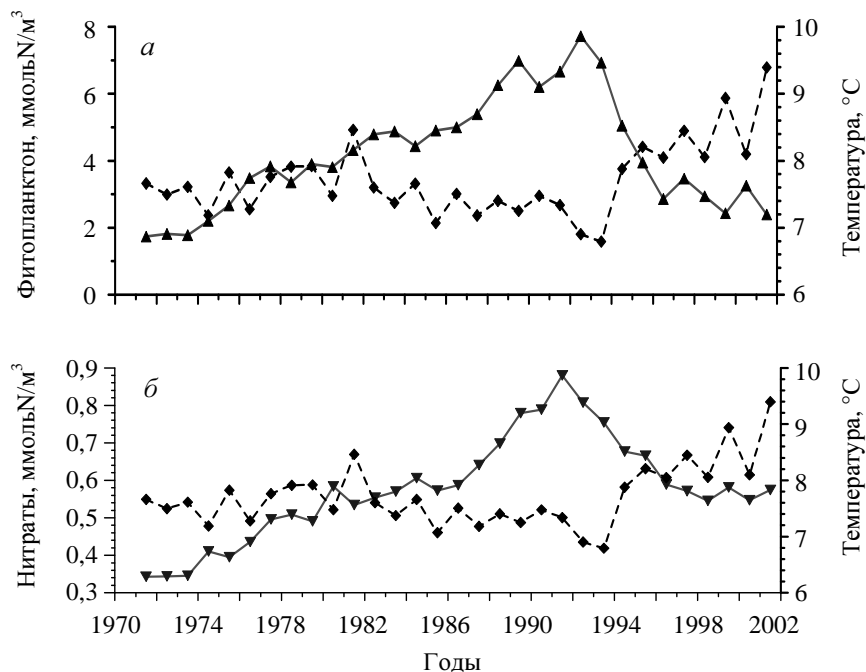


Рис. 11. Временная изменчивость средней по площади бассейна (сплошная линия): *a* – зимней поверхностной концентрации нитратов в глубоководной части моря; *б* – весенней поверхностной концентрации фитопланктона. Среднезимняя температура поверхности моря – пунктир.

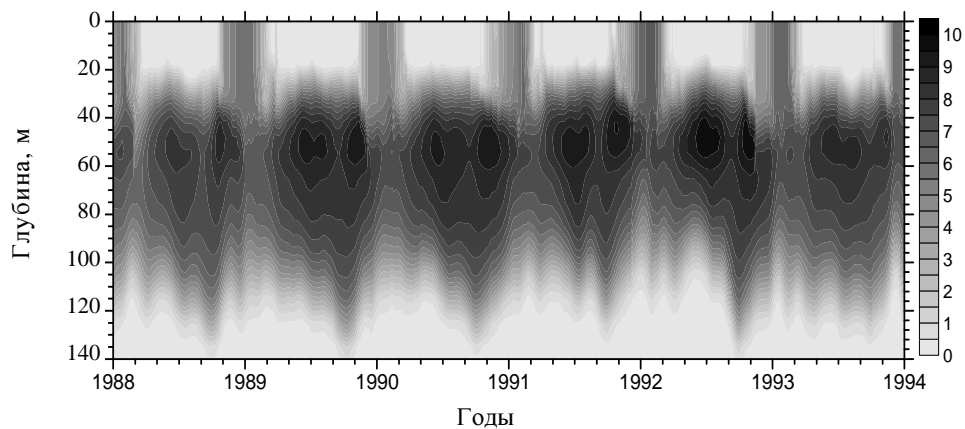


Рис. 12. Временная изменчивость концентрации нитратов (в  $\text{mmol N/m}^3$ ) в верхнем слое моря в точке с координатами  $43^\circ$  с.ш.,  $34^\circ$  в.д.

На рис. 13 представлены осредненные по поверхности моря и за сезон значения концентрации поверхностного хлорофилла-«а», полученные по модели и в результате обработки спутниковых данных. Спутниковые данные получены с сайта «Black Sea Color» [10] и представляют собой осредненные за сезон карты поверхностного хлорофилла-«а». Нетрудно видеть, что обе кривые носят периодический характер, но амплитуда колебаний модельных результатов выше и они смещены по фазе на сезон. На этом же графике при-

ведены осредненные за год значения концентрации хлорофилла-«а» в поверхностном слое, из которых следует, что модель правильно восстанавливает средний уровень этой величины.

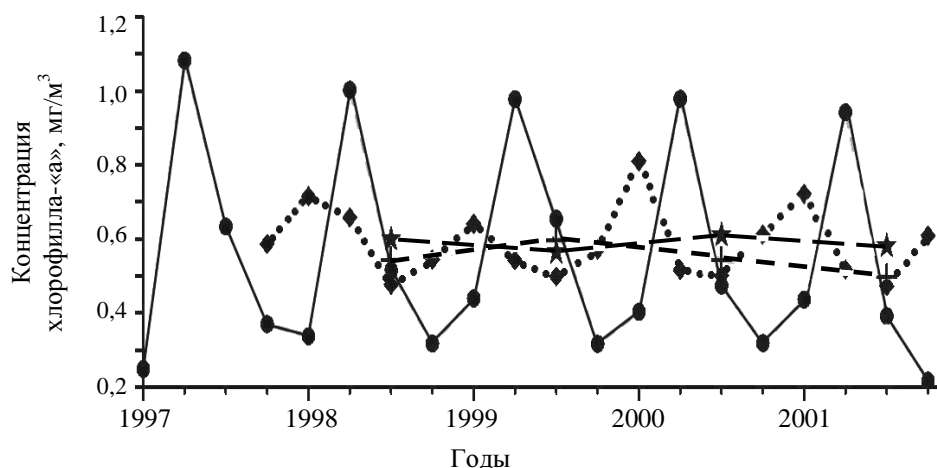


Рис. 13. Осредненные по площади бассейна средние за сезон значения поверхностной концентрации хлорофилла-«а»: (●) – полученные по модели; (◆) – спутниковые данные. Среднегодовые значения концентрации хлорофилла-«а»: (+) – результаты моделирования; (★) – результаты, полученные по спутниковым данным.

На рис. 14 и рис. 15 приведены карты полей средней за сезон поверхностной концентрации хлорофилла-«а» в разные сезоны 1998 г., полученные в результате моделирования и в результате расчета по спутниковым данным. Самые высокие концентрации наблюдаются весной. Максимальные величины концентрации, как в спутниковых, так и в модельных данных, расположены в районе северо-западного шельфа благодаря поступлению большого количества биогенов с водами Дуная. Исключение составляет зимний сезон, когда концентрация на шельфе не выше, чем в глубоководной части моря.

В зимний и осенний сезоны поверхностная концентрация хлорофилла-«а», полученная по модели, занижена по сравнению с данными спутниковых измерений. Другим отличием результатов моделирования от данных измерений является то, что область повышенной концентрации на шельфе шире для модельных значений. Это может быть объяснено недостаточным горизонтальным пространственным разрешением модели (около 8 км) по сравнению со спутниковыми данными (1 км).

**Заключение.** Результаты моделирования долговременной эволюции экосистемы Черного моря показали ее существенную изменчивость на протяжении рассматриваемого периода. С начала семидесятых до девяностых годов прошлого столетия значительно выросла биомасса в верхнем слое Черного моря. Этот период характеризуется как стадия эвтрофикации Черного моря. Затем с середины девяностых годов популяция планктона начинает уменьшаться, что соответствует периоду выздоровления экосистемы Черного моря.

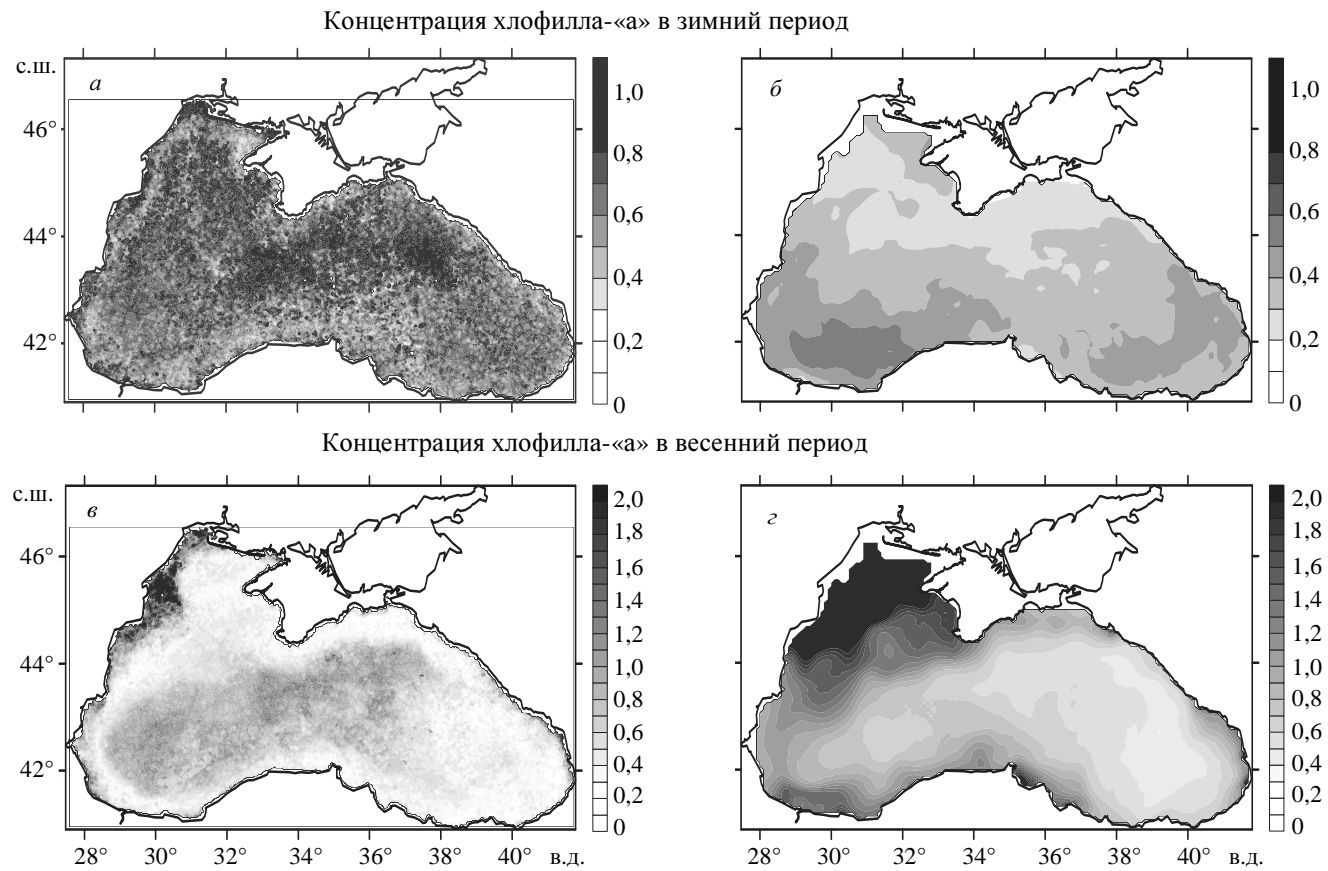


Рис. 14. Средние за сезон карты полей поверхностной концентрации хлорофилла-«а» (в  $\text{мг}/\text{м}^3$ ) для зимнего и весеннего периодов 1998 г.: *а, в* – рассчитанные по модели; *б, з* – рассчитанные по спутниковым данным.

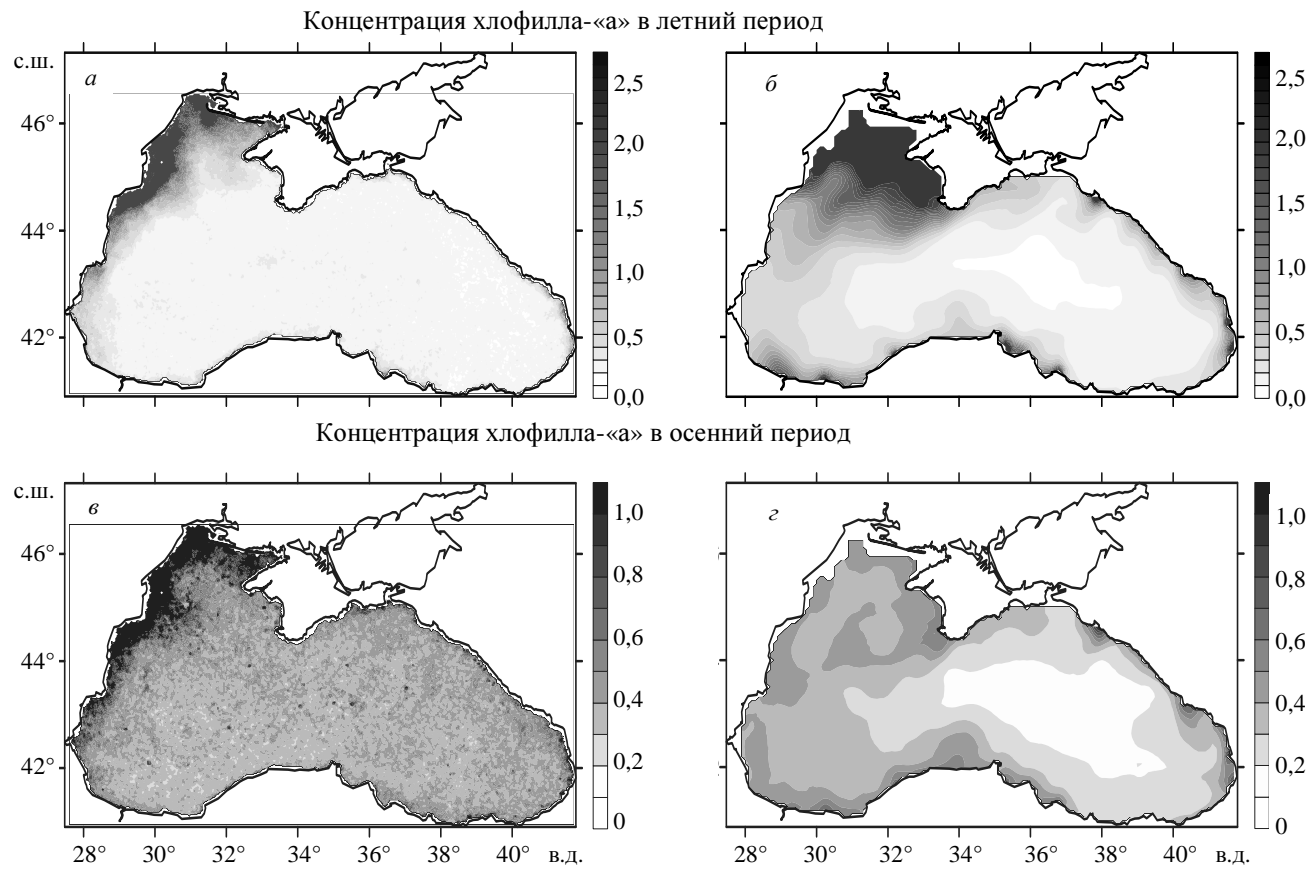


Рис. 15. Средние за сезон карты полей поверхностной концентрации хлорофилла-«а» (в  $\text{мг}/\text{м}^3$ ) для летнего и осеннего периодов 1998 г.: *а, в* – рассчитанные по модели; *б, г* – рассчитанные по спутниковым данным.



При этом изменение состояния экосистемы проявлялось не только в увеличении объемов биопродукции, но и в изменении сезонного цикла основных компонентов. Показано, что объем биологической продукции в верхнем слое моря в глубоководной его части тесно связан со значением концентрации нитратов в слое максимума, расположенного между верхним и нижним нитроклином на глубине примерно 70 м. За рассматриваемый период эта величина изменилась в несколько раз, и в соответствии с этим менялся объем биопродукции в поверхностном слое Черного моря. Неплохое соответствие показало сравнение характеристик поверхностного хлорофилла-«а», полученного по результатам моделирования, со спутниковыми данными. Результаты численного моделирования в целом соответствуют тому поведению экосистемы Черного моря, которое известно по многочисленным измерениям биологических и геохимических параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеенко В.А., Коротаев Г.К., Кныш В.В., Кубряков А. И., Белокопытов В.Н., Инюшина Н. В. Межгодовая изменчивость термохалинных и динамических характеристик Черного моря по результатам реанализа за период 1971 – 1993 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2009. – вып. 19. – С. 216-227.
2. Кныш В.В., Кубряков А.И., Инюшина Н.В. Коротаев Г.К. Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в  $\sigma$ -координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солености // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – вып. 16. – С. 243-265.
3. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 1. – С. 52-68.
4. Oguz T., Ducklow H.W., Malanotte-Rizzoli P. et al. A physical-biochemical model of plankton productivity and nitrogen cycling in the Black Sea. // Deep-Sea Research. – 1999. – v. 1, № C46. – P. 597-636.
5. Oguz T., Ducklow H.W., Malanotte-Rizzoli P. Modeling distinct vertical biochemical structure of the Black Sea: Dynamical coupling of the oxic, suboxic, and anoxic layers // Global biochemical cycles. – 2000. – v.14, № 4. – P. 1331-1352.
6. Oguz T., Ducklow H.W., Purcell J.E., Malanotte-Rizzoli P. Modeling the response of top-down control exerted by gelatinous carnivores on the Black Sea pelagic food web // J. Geophys. Res. – 2001. – v. 106, № C3. – P. 4543-4564.
7. Ludwig W. River runoff and nutrient load data synthesis for hindcasting simulations // Deliverable 4.3.2, SESAME project.
8. Purcell J.E., Shiganova T.A., Decker M.B., Houde E.D. The ctenophore mnemiopsis in native and exotic habitats: U.S. estuaries versus the Black Sea basin // Hydrobiologia. – 2001. – 451. – P. 145-176.
9. Oguz, T., Gilbert, D. Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960–2000: Evidence for regime-shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations. // Deep-Sea Research. – 2007. – v.1. – P. 1-23.
10. Сайт «Black Sea Color». [Электронный ресурс]. <http://blackseacolor.com/> (Проверено 15.12.2010).

Материал поступил в редакцию 20.12.2010 г.