

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

Моделирование эволюции экосистемы Черного моря в течение трех деkad (1971 – 2001 годы)

В работе на основе трехмерной модели сделана попытка восстановить изменчивость экосистемы Черного моря на протяжении последних трех десятилетий лет предыдущего столетия. Согласно многочисленным измерениям за это время морская экосистема претерпела существенные изменения. Относительно здоровое состояние экосистемы, наблюдавшееся в 60-х – начале 70-х годов, сменилось стадией эвтрофикации в 80-х – середине 90-х. Помимо количественных вариаций биомассы в верхнем слое моря, изменения проявились также в составе компонентов экосистемы и в их сезонных циклах. Кроме того, эти изменения сопровождались перестройкой вертикальной структуры биогеохимических параметров в глубоководной части Черного моря. Наиболее заметным изменением биогеохимической вертикальной структуры явилось увеличение значения концентрации нитратов в слое максимума с 2 – 3 ммоль N/м³ в конце 60-х до 6 – 9 ммоль N/м³ – в первой половине 90-х годов.

Ключевые слова: Черное море, морская экосистема, моделирование, долговременная изменчивость экосистемы.

Введение

Черное море испытало за последние десятилетия серьезную трансформацию своей экосистемы. Ее относительно здоровое состояние в 60-х годах прошлого столетия в течение последующих лет сменилось интенсивной эвтрофикацией, уменьшением биологического разнообразия и рыбных запасов. Помимо количественных вариаций биомассы в верхнем слое моря, произошли изменения в сезонных циклах компонентов экосистемы. В частности, естественный годовой цикл фитопланктона с весенним и осенним цветением сменился более сложной картиной, характеризующейся несколькими максимумами. Эти изменения морской экосистемы были вызваны как климатическими изменениями в результате внешнего антропогенного воздействия, так и появлением новых видов. В дальнейшем с середины 90-х годов наблюдалось выздоровление экосистемы Черного моря, которое объясняется некоторыми защитными мерами, предпринятыми для ограничения антропогенного загрязнения и чрезмерного вылова рыбы. Результаты реанализа гидрофизических полей Черного моря, выполненного для периода с 1971 по 2001 гг., дают возможность восстановить изменчивость экосистемы Черного моря на основе численной междисциплинарной модели.

Описание модели

Междисциплинарная модель экосистемы Черного моря, описывающая нижние уровни пищевой цепи, состоит из двух основных частей: модели циркуляции и биогеохимической модели. Между ними существует односторонняя связь: гидрофизические поля, рассчитанные по модели циркуляции, принимаются в качестве входных параметров для биогеохимического блока.

© В.Л. Дорофеев, Г.К. Коротаев, Л.И. Сухих, 2012

В данной работе для периода 1971 – 1993 гг. использовались результаты реанализа гидрофизических полей, полученные в статье [1], а для 1994 – 2001 гг. – гидродинамические поля, рассчитанные по модели циркуляции с ассимиляцией спутниковой альтиметрии. В обоих случаях применялась модель циркуляции Черного моря на основе *POM* (*Princeton Ocean Model*), адаптированная к условиям Черного моря [2]. Отличительной чертой модели циркуляции на основе *POM* является наличие турбулентной подмодели, позволяющей реалистично воспроизводить процессы перемешивания в верхнем слое моря, играющие большую роль в снабжении питательными веществами верхнего фотического слоя, в котором в основном происходят биологические процессы, описываемые в модели. Пространственный шаг сетки модели циркуляции составляет примерно 7 км (141 × 88 узлов). Вертикальное разрешение модели – 26 расчетных уровней в σ -координатах, сгущающихся у поверхности. Процедура ассимиляции спутниковой альтиметрии, использовавшаяся в работе [3], была адаптирована к модели *POM*.

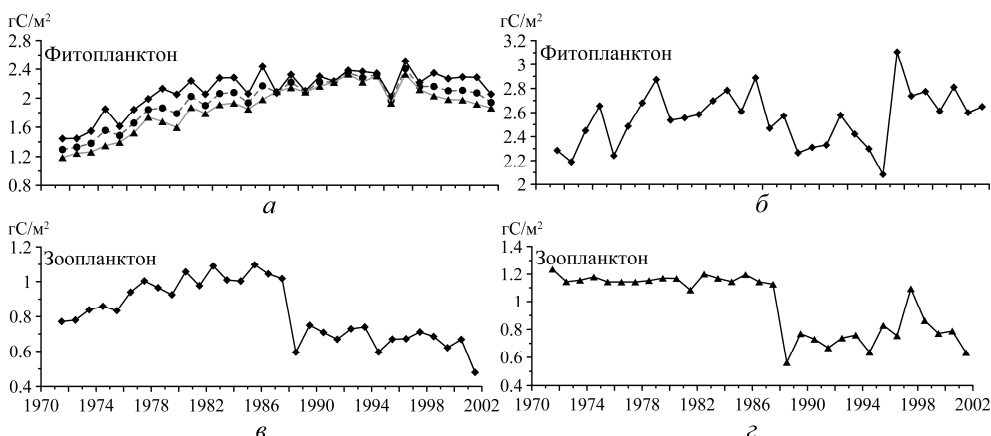
Трехмерная модель экосистемы Черного моря, применявшаяся в данной работе, является дальнейшим развитием использовавшейся ранее модели [4, 5]. Биогеохимическая часть модели состоит из 15 переменных состояния и описывает процессы в верхнем 200-метровом слое моря. Нижний уровень пищевой цепи представляют две группы фитопланктона (диатомовые и флагеллаты). Второй пищевой уровень составляют две размерные группы зоопланктона: микрозоопланктон (имеющий размер меньше 0,2 мм) и мезозоопланктон (0,2 – 3 мм). Верхний уровень пищевой цепи занимают медуза *Aurelia aurita* и гребневик *Mnemiopsis leidy*. В пищевую цепь входят, кроме того, нефотосинтезирующий бактериопланктон, растворенная и взвешенная органика, а также всеядная динофлагеллята *Noctiluca scintillans*, потребляющая фитопланктон, бактериопланктон, микрозоопланктон и взвешенную органику. В представленной модели азот рассматривается как единственный биогенный элемент, ограничивающий рост фитопланктона. Азотный цикл включает 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 [6 – 8]. 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. В мелководной части моря на дне принимаются условия отсутствия потоков для всех компонентов экосистемы, кроме взвешенной органики и диатомовых водорослей, имеющих вертикальную скорость седиментации. Такие же условия отсутствия потоков ставятся на боковых границах, за исключением устьев крупных рек, где задаются потоки питательных веществ, пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока [9]. Биогеохимическая модель имеет такое же горизонтальное пространственное разре-

ние, как и модель циркуляции. В вертикальном направлении 26 расчетных z-уровней расположены неравномерно – более часто у поверхности моря. Необходимые гидрофизические поля, получаемые по модели циркуляции, интерполируются на сетку биогеохимической модели.

Результаты моделирования

Эволюция биомассы в верхнем слое моря. Эволюция средней за год биомассы фито- и зоопланктона в верхнем 50-метровом слое для различных частей Черного моря показана на рис. 1. В глубоководной части Черного моря средняя по площади бассейна биомасса фитопланктона (рис. 1, а) выросла с начала 70-х по начало 90-х годов примерно вдвое, затем она начала уменьшаться. На этом же рисунке можно заметить значительную разницу в количестве фитопланктона для западной и восточной глубоководных частей Черного моря. Исключением является период с конца 80-х до середины 90-х годов. Как видно на рис. 1, б, в этот период в водах северо-западного шельфа (СЗШ) наблюдается некоторое уменьшение количества фитопланктона. То есть, в этот период влияние биопродукции из шельфовой зоны, где ее уровень в целом выше примерно в 1,5 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 до $\approx 2,7$ гС/м². Затем наблюдается снижение содержания фитопланктона на СЗШ до середины 90-х годов, после чего следует резкий подъем в 1995 г., а потом дальнейшее уменьшение содержания фитопланктона.

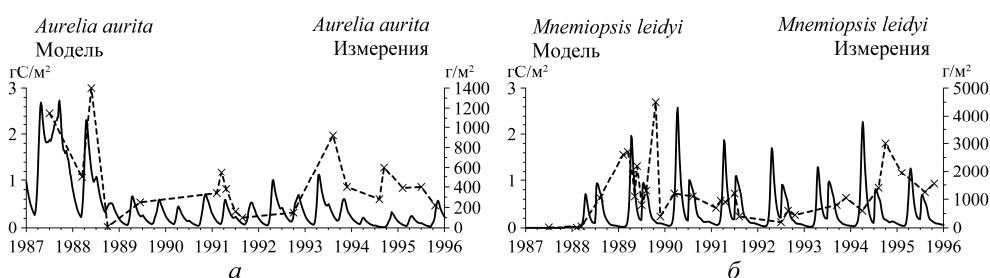


Р и с. 1. Временная эволюция за период 1971 – 2001 гг. среднегодовых значений биомассы фитопланктона (а, б) и зоопланктона (в, г) в глубоководной части Черного моря (а, в) и на его северо-западном шельфе (б, г) (на рис. 1, а квадратики обозначают результаты осреднения по западной глубоководной части, кружочки – по восточной, треугольники – по всей площади глубоководной части Черного моря)

Рост популяции фитопланктона в глубоководной части моря вызвал увеличение биомассы зоопланктона, которая затем в конце 80-х годов резко уменьшилась. На СЗШ среднегодовая биомасса зоопланктона держалась практически постоянной до конца 80-х годов и затем, как и в глубоководной части, резко снизилась. Это внезапное изменение популяции зоопланктона в

конце 80-х годов связано с появлением в морской экосистеме гребневика *Mnemiopsis leidy*, который в это время стали наблюдать в больших количествах во многих районах Черного моря.

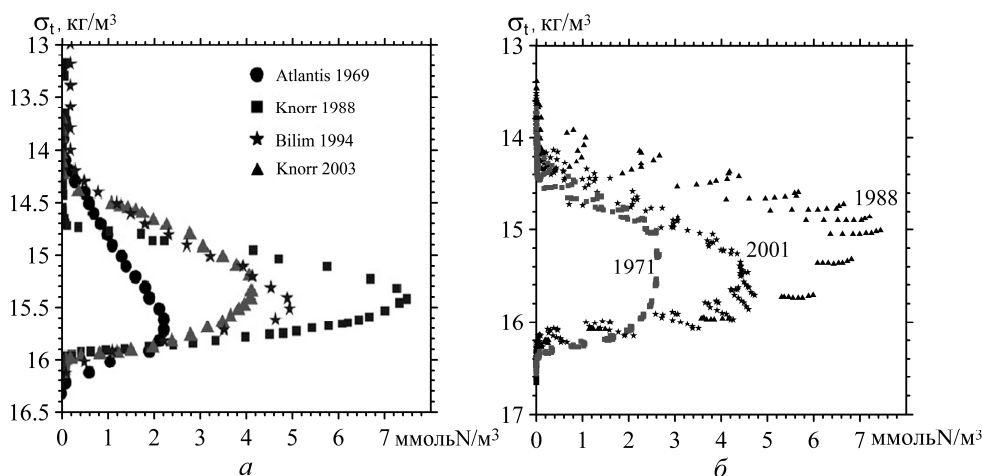
Эволюция биомассы *Aurelia aurita* и *Mnemiopsis leidy* в глубоководной части Черного моря за десятилетний период с конца 80-х до середины 90-х годов представлена на рис. 2. Здесь показаны как результаты моделирования, так и обобщенные результаты измерений в открытой части моря [10]. До 1988 г. *Aurelia aurita* доминировала в группе хищников пищевой цепи рассматриваемой системы. Затем гребневик *Mnemiopsis leidy*, занесенный в Черное море с балластными водами, стал доминировать в экосистеме, так как не имел в то время естественного хищника. В 1988 – 1991 гг. происходит перестройка экосистемы Черного моря от доминирования *Aurelia aurita* к доминированию *Mnemiopsis leidy*. В результате популяция медузы *Aurelia aurita* резко уменьшилась, а численность гребневика *Mnemiopsis leidy* возросла. Кроме того, появление дополнительного хищника привело к резкому уменьшению популяции зоопланктона, представленной в рассматриваемой модели, как упоминалось выше, двумя размерными группами.



Р и с. 2. Эволюция биомассы *Aurelia aurita* (а) и *Mnemiopsis leidy* (б) в глубоководной части Черного моря за десятилетний период по результатам моделирования (сплошные линии) и данным измерений (штриховые)

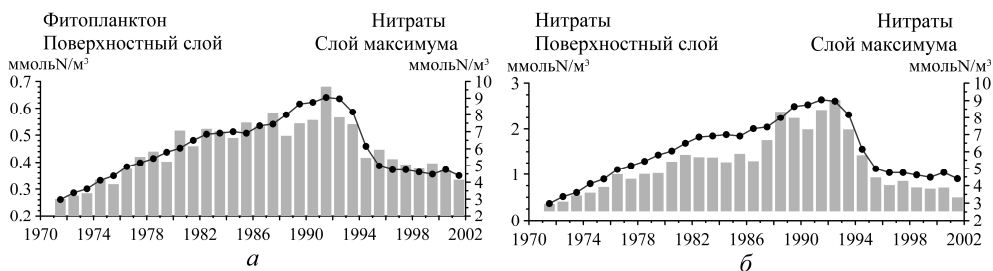
Изменения в количественных характеристиках биологической продукции в верхнем слое моря за рассматриваемый период связаны с трансформацией вертикальной структуры биогеохимических параметров в глубоководной части Черного моря. Особенно ярко это проявилось в эволюции значения максимума нитратов, находящегося в открытой части моря на границе кислородной зоны на глубине порядка 60 – 70 м. Во время интенсивного зимнего перемешивания, вызванного штормами и конвекцией, нитраты поступают в верхний слой моря, аккумулируются там и затем потребляются фитопланктоном, когда становится достаточно солнечного света для процесса фотосинтеза. Количество поступивших в верхний слой питательных веществ зависит напрямую от их величины в слое максимума. По данным измерений в рассматриваемый период времени значение максимума нитратов существенно менялось. В конце 60-х годов оно составляло 2 – 3 ммоль N/m^3 , затем выросло до 6 – 9 ммоль N/m^3 к первой половине 90-х и далее уменьшилось до ≈ 4 ммоль N/m^3 в начале нынешнего века. На рис. 3, а показаны профили концентрации нитратов, измеренной в разные годы в глубоководной части моря

(в центральной части западного круговорота). Эти данные взяты из работы [11]. На рис. 3, б представлены такие же профили, но полученные по модели. Особенностью изменения профиля нитратов в открытой части моря является то, что к концу 80-х годов максимум концентрации нитратов не только вырос по величине, но и несколько сместился к поверхности.

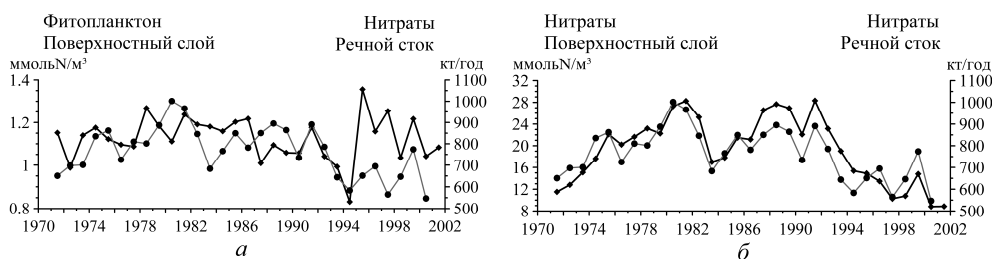


Р и с. 3. Распределение концентрации нитратов в зависимости от плотности морской воды для глубоководной части Черного моря: *а* – данные измерений на научно-исследовательских судах в разные годы [11], *б* – результаты моделирования

На рис. 4 и 5 представлена изменчивость осредненных за год и по площади бассейна поверхностных концентраций фитопланктона и нитратов для глубоководной части Черного моря (рис. 4) и СЗШ (рис. 5). На этих же графиках изображено поведение осредненных величин концентрации нитратов в слое максимума (для глубоководной части) и поступления нитратов на СЗШ с речным стоком, которые использовались в нашей работе. Данные по речному стоку взяты из работы [9] и представляют собой комбинацию данных измерений и результатов моделирования.



Р и с. 4. Временная эволюция средних за год и по площади бассейна поверхностных концентраций фитопланктона (*а*) и нитратов (*б*) (полоски), а также изменчивость осредненных концентраций нитратов в слое максимума (кружочки) в глубоководной части Черного моря



Р и с. 5. Временная эволюция средних за год и по площади бассейна поверхностных концентраций фитопланктона (*а*) и нитратов (*б*) на СЗШ Черного моря, а также изменчивость осредненных величин поступления нитратов на СЗШ с речным стоком (кружочки) [9]

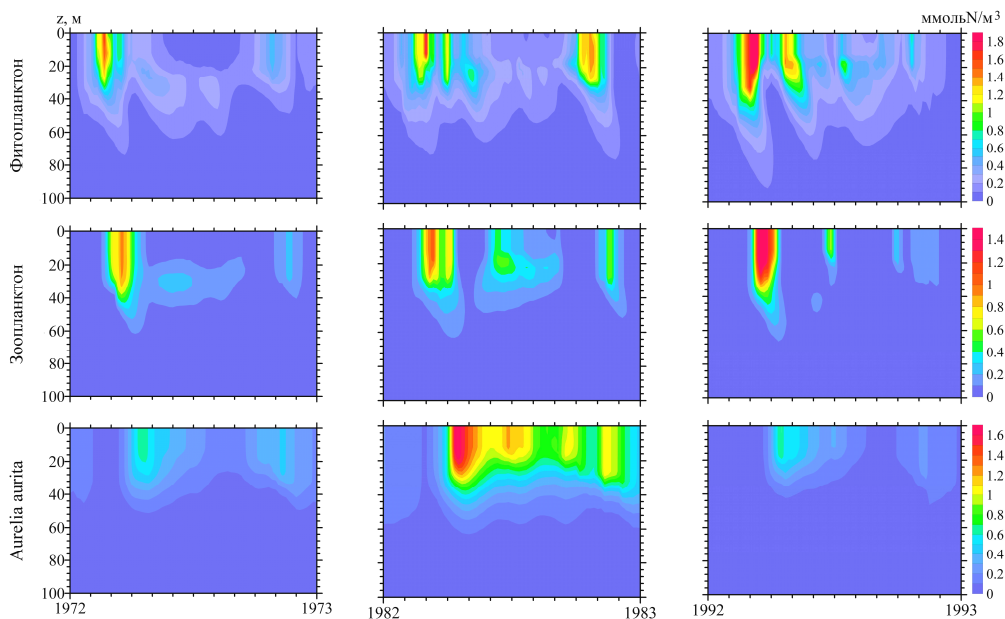
Концентрация поверхностного фитопланктона возросла в глубоководной части моря со значений $0,25 \text{ ммоль N/m}^3$ в начале 70-х годов до $0,7 \text{ ммоль N/m}^3$ в начале 90-х, а затем начала уменьшаться. При этом изменение концентрации фитопланктона очень хорошо соответствует кривой эволюции концентрации нитратов в слое максимума (рис. 4, *а*). Нитраты являются основным питательным веществом в рассматриваемой системе. Поэтому изменение количества фитопланктона в верхнем слое моря напрямую связано с содержанием в этом слое нитратов. В глубоководной части моря средняя концентрация нитратов в поверхностном слое за 20 лет выросла примерно в 5 раз и также четко следует изменениям величины концентрации нитратов в слое максимума (рис. 4, *б*). Это связано с тем, что во время интенсивного зимнего перемешивания в глубоководной части Черного моря нитраты поступают в поверхностный слой из нижних слоев с более высокой концентрацией. Поэтому количество поступивших в верхний слой нитратов зависит от величины их концентрации в слое максимума.

На СЗШ поверхностная концентрация фитопланктона в среднем в 2 раза и более выше, чем в глубоководной части моря. Она также увеличивается до середины 80-х годов вместе с ростом поступления нитратов с речным стоком, а затем начинает уменьшаться (рис. 5, *а*). В отличие от глубоководной части Черного моря на СЗШ основным фактором, влияющим на величину концентрации нитратов в поверхностном слое, является поступление нитратов со стоком рек, главным образом Дуная. Это хорошо видно на рис. 5, *б*, где кривая изменения содержания нитратов в поверхностном слое практически совпадает с кривой, показывающей поступление нитратов на СЗШ с речным стоком. В то же время, как видно на рис. 5, *а*, четкая корреляция между среднегодовым содержанием в поверхностном слое фитопланктона и поступлением нитратов отсутствует. Это, по-видимому, объясняется тем, что концентрация нитратов на шельфе достаточно высокая, и они не ограничивают рост фитопланктона. Его изменения в данном случае вызываются в большей степени другими факторами: погодными условиями, освещенностью и т. д.

Изменение сезонных циклов компонентов экосистемы. В течение рассматриваемого периода эволюция экосистемы Черного моря проявилась не только в изменении биомассы ее компонентов, но и в изменении их сезонных циклов. Естественный годовой цикл фитопланктона сменился на более сложный, характеризующийся несколькими максимумами. Основное цветение

фитопланктона происходит в конце зимы – начале весны, когда в поверхностном слое аккумуляровано в результате интенсивного зимнего перемешивания достаточное количество нитратов и поступает достаточно солнечного света. За цветением фитопланктона следует всплеск роста популяции зоопланктона, который питается фитопланктоном. В результате содержание фитопланктона в поверхностном слое моря резко уменьшается. В свою очередь, зоопланктон поедается медузой *Aurelia aurita*. К концу весны происходит резкое увеличение ее популяции (цветение) и, как следствие, численность зоопланктона резко уменьшается. Необходимо отметить, что в годовом цикле фитопланктона заметными чертами являются также летний подповерхностный максимум и цветение в конце осени – начале зимы.

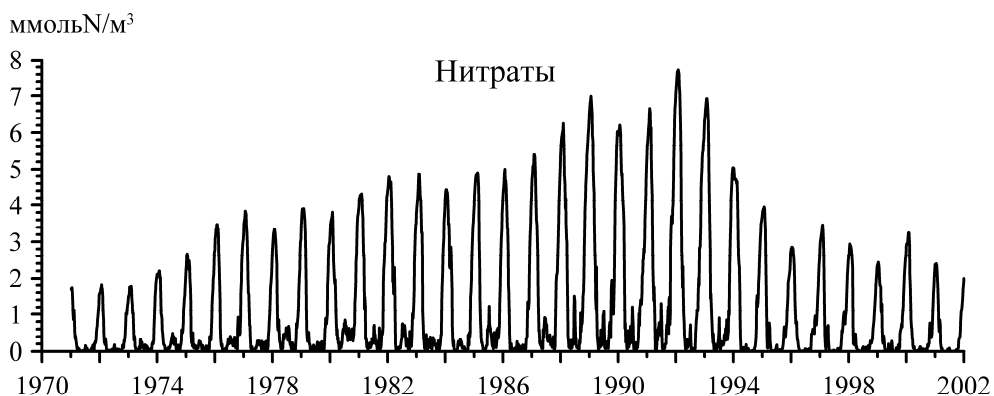
На рис. 6 показана сезонная эволюция концентраций трех компонентов экосистемы в верхнем 100-метровом слое глубоководной части моря для трех лет, соответствующих предэвтрофикационному состоянию экосистемы и периоду эвтрофикации.



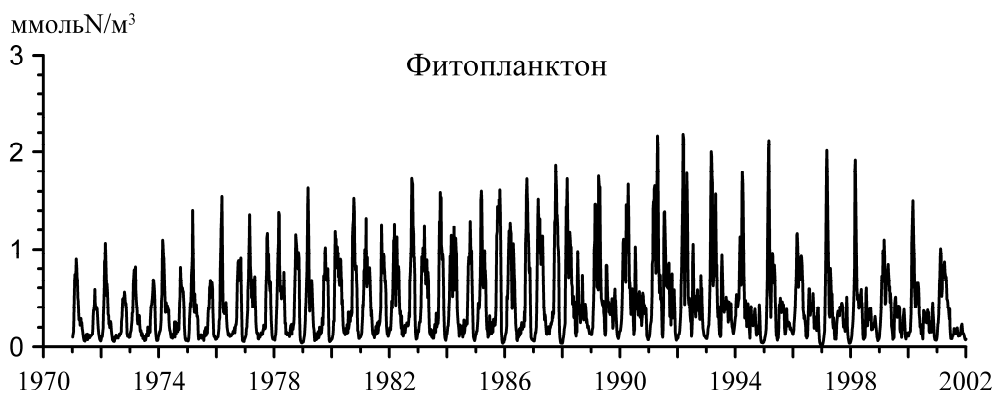
Р и с. 6. Сезонная эволюция фитопланктона, зоопланктона и медузы *Aurelia aurita* для 1972, 1982 и 1992 гг. в глубоководной части Черного моря

В 1982 г. интенсивность весеннего цветения фитопланктона стала выше по сравнению с началом 70-х годов. Кроме того, весенний максимум разбивается на два. Осеннее и летнее цветения также стали интенсивнее и имеют более сложную структуру, чем наблюдалось ранее. Весенний максимум в концентрации зоопланктона тоже разделился на два, расположенных рядом по времени. Цветение медузы *Aurelia aurita* имеет несколько максимумов, самый большой из которых приходится на апрель – май. С 1992 г., когда в экосистеме появился и стал доминировать новый хищник гребневик *Mnemiopsis leidyi*, отмечается несколько периодов цветения фитопланктона, самый интенсивный из которых наблюдается в начале весны. Сезонный ход

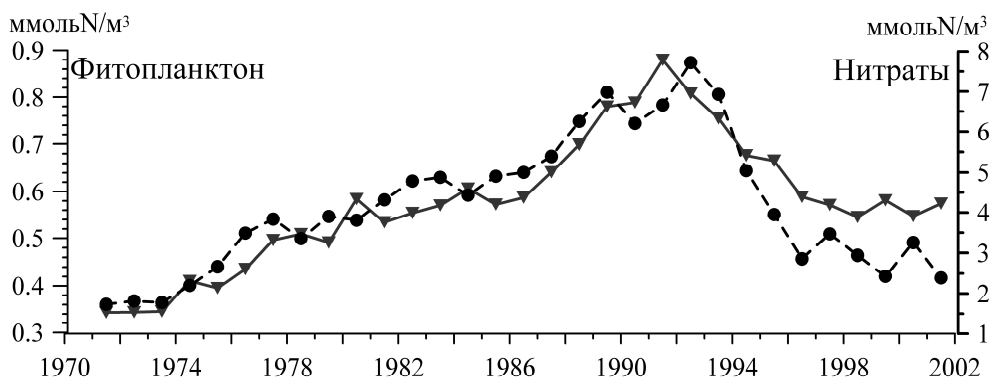
содержания зоопланктона в верхнем слое моря также имеет несколько пиков, при этом подповерхностный максимум в этом году не наблюдается. Сезонный ход концентрации медузы *Aurelia aurita* примерно такой же, какой наблюдался в 1972 г.: имеется максимум в апреле – мае и затем второй, меньшей интенсивности, в конце осени (рис. 6).



a



б



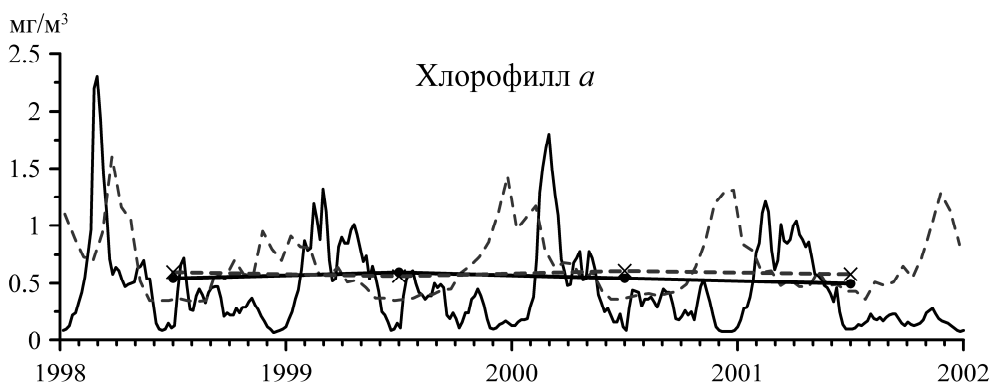
в

Р и с. 7. Временная изменчивость средней по площади бассейна поверхностной концентрации нитратов (*a*) и фитопланктона (*б*), а также эволюция значений зимнего максимума поверхностной концентрации нитратов (кружочки) и средней за весенний сезон поверхностной концентрации фитопланктона (треугольники) (*в*) в глубоководной части Черного моря

Как отмечалось выше, нитраты в рассматриваемой системе являются главным питательным веществом для фитопланктона, находящегося на нижнем уровне пищевой цепи. От насыщенности верхнего слоя моря питательным веществом зависит уровень концентрации фитопланктона. На рис. 7, а приведен график изменения со временем осредненной по площади бассейна поверхностной концентрации нитратов в глубоководной части Черного моря за рассматриваемый период. Ее сезонный ход имеет ярко выраженные пики в зимнее время, связанные с интенсивными зимними процессами перемешивания, в результате чего в поверхностный слой моря из нитроклина поступает большое количество нитратов. Затем они ассимилируются фитопланктоном в результате процесса фотосинтеза, и в течение остального времени года концентрация нитратов у поверхности низка. В то же время хорошо видна межгодовая изменчивость, связанная главным образом с изменением значений концентрации нитратов в слое максимума. С начала 70-х годов до пика в 1992 г. значение поверхностной концентрации выросло в 4 раза. В сезонном ходе концентрации фитопланктона основная черта – весеннее цветение, являющееся откликом на аккумуляцию зимой в верхнем слое питательных веществ (рис. 7, б). Хорошо также видна межгодовая изменчивость величины весеннего максимума, которая связана с величиной максимума нитратов у поверхности моря в зимний период. На рис. 7, в показана межгодовая эволюция средней за весенний сезон поверхностной концентрации фитопланктона в глубоководной части моря. Там же приведены значения зимнего максимума распределения нитратов в поверхностном слое моря. Видно, что эти две величины хорошо коррелируют – растет концентрация нитратов в зимний период и соответственно растет содержание фитопланктона в поверхностном слое в весенний сезон.

Сопоставление результатов моделирования с данными спутниковых измерений. Появившиеся в последнее время спутниковые данные о содержании поверхностного хлорофилла *a*, получаемые цветовыми сканерами, дают возможность сравнить результаты моделирования с реальной картиной, наблюдаемой в природе. На рис. 8 представлена эволюция в течение четырех лет осредненных по площади бассейна значений поверхностной концентрации хлорофилла *a*, полученных как по модели, так и в результате обработки спутниковых данных. Спутниковые данные любезно предоставлены В.В. Суслиным и представляют собой осредненные за две недели данные измерений сканером *SeaWiFS*, обработанные по специально разработанному для Черного моря алгоритму [12]. Модельные значения хлорофилла *a* получены путем пересчета суммарной поверхностной концентрации фитопланктона. Наибольшие различия между данными измерений и результатами моделирования отмечаются для сезона максимума хлорофилла *a*: по данным измерений основной максимум наблюдается в середине зимы, тогда как по результатам моделирования он сдвинут во времени к началу марта. Исключением является 1998 г., когда время весеннего цветения фитопланктона по результатам моделирования почти совпало со временем его максимума из данных измерений. На этом же графике приведены осредненные за год значения концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое (по данным измерений и результатам

моделирования), из анализа которых следует, что модель правильно восстанавливает средний уровень этой величины.

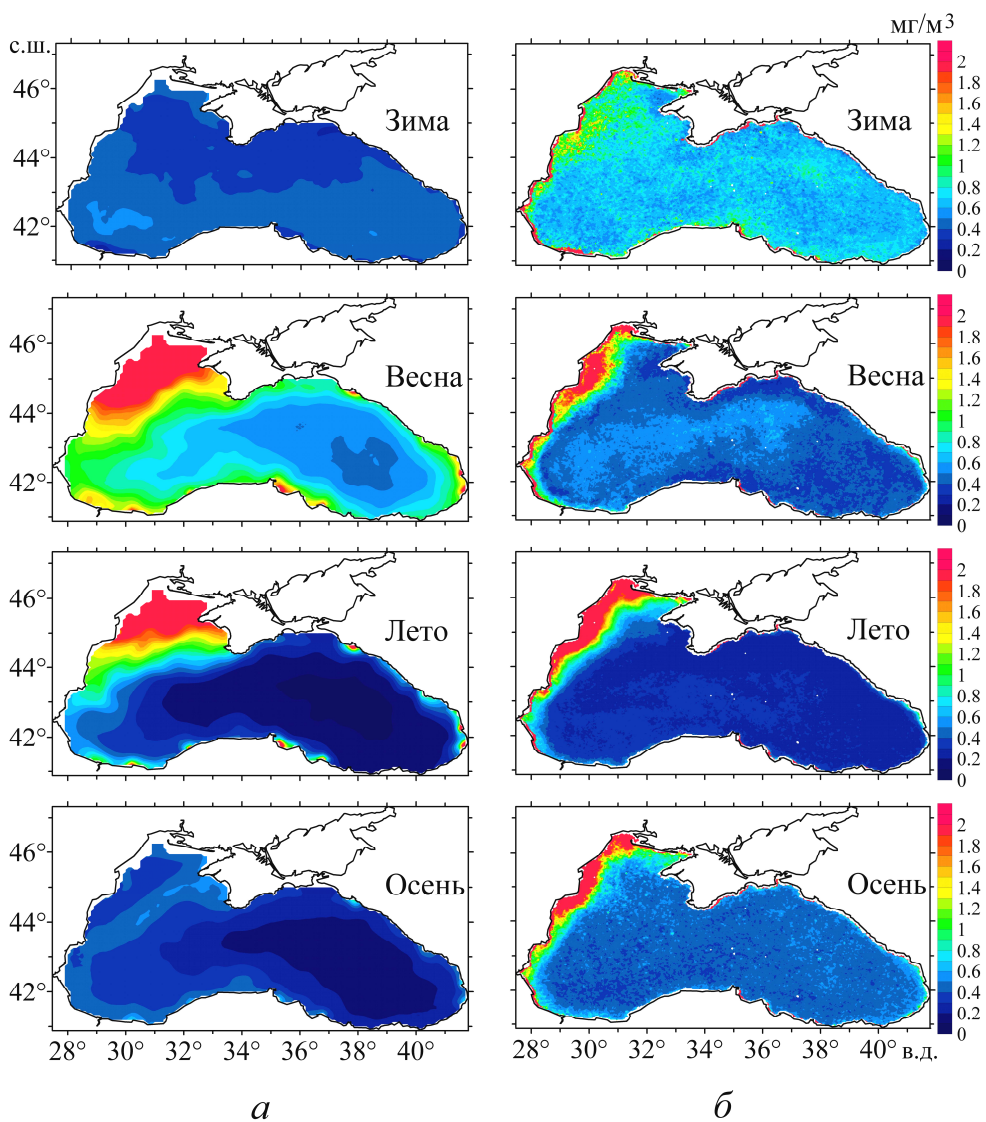


Р и с. 8. Временная изменчивость осредненных по площади бассейна значений поверхностной концентрации хлорофилла *a*, полученных по модели (сплошная линия) и спутниковым данным (штриховая), а также среднегодовые значения поверхностной концентрации по результатам моделирования (кружочки) и спутниковым данным (крестики)

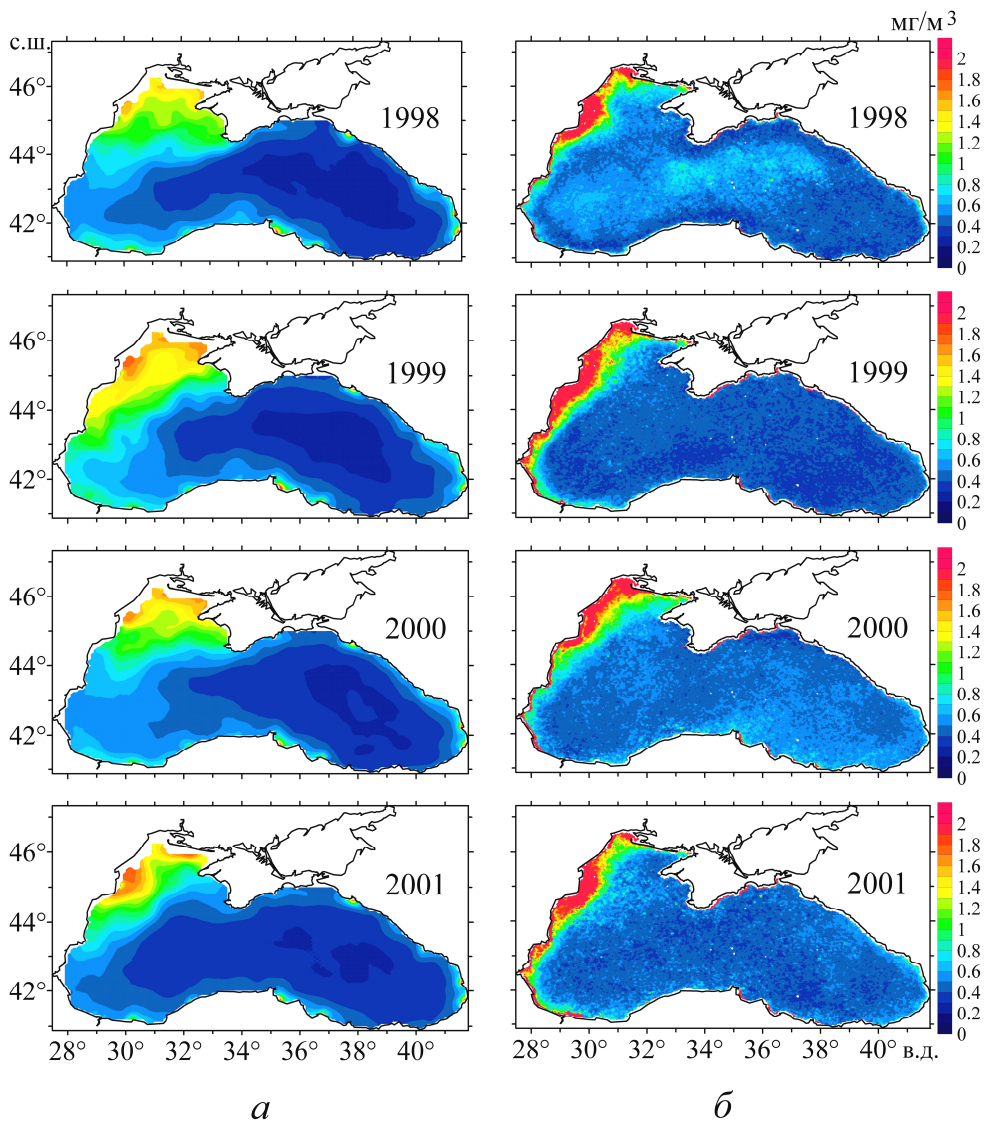
Пространственное распределение концентрации поверхностного хлорофилла *a* как по результатам моделирования, так и по данным наблюдений приведено на рис. 9 и 10. На рис. 9 представлены карты сезонного распределения концентрации поверхностного хлорофилла *a*, осредненной за четыре года (с 1998 по 2001 гг.). Данные измерений, использовавшиеся для построения карт, получены с сайта «*Black Sea Color*» [13] и представляют собой осредненные за сезон концентрации поверхностного хлорофилла *a*, рассчитанные по данным измерений сканером *SeaWiFS*. Согласно результатам моделирования (рис. 9, *a*) самые высокие его концентрации наблюдаются весной. В то же время на картах, построенных по данным спутниковых измерений (рис. 9, *б*), максимальное количество поверхностного хлорофилла *a* наблюдается в зимний сезон, что соответствует временной эволюции, изображенной на рис. 8. В зимний и осенний сезоны поверхностная концентрация хлорофилла *a*, получаемая по модели, занижена по сравнению со спутниковыми измерениями.

На рис. 10 демонстрируются для четырех лет карты среднегодового распределения концентрации поверхностного хлорофилла *a*. Средний уровень поверхностной концентрации мало менялся в течение этих лет. Пространственно максимальные величины концентрации как по спутниковым, так и по модельным данным расположены в районе СЗШ вследствие поступления большого количества биогенов с водами Дуная. Повышенное содержание поверхностного хлорофилла *a* наблюдается также вдоль побережья Черного моря, что вызвано преобладающей циклонической циркуляцией, которая переносит часть биогенов и биопродукции с СЗШ, где их концентрация в поверхностных водах существенно выше, в другие районы моря. В целом на картах, полученных по данным спутниковых измерений, распределение хлорофилла *a* в глубоководной части моря более равномерно по сравнению с ре-

зультатами моделирования. В частности, поверхностная концентрация по данным моделирования (рис. 10, *а*) заметно убывает к центру восточного круговорота, чего не наблюдается по спутниковым данным (рис. 10, *б*). Другим различием является то, что по результатам моделирования область повышенной концентрации вдоль западного берега Черного моря значительно шире, чем по данным измерений. Это может быть объяснено сравнительно грубым горизонтальным пространственным разрешением модели (около 7 км) по сравнению со спутниковыми данными (1 км).



Р и с. 9. Карты сезонного распределения осредненной за 1998 – 2001 гг. концентрации поверхностного хлорофилла *a* по результатам моделирования (*а*) и данным сканера *SeaWiFS* (*б*)



Р и с. 10. Карты среднегодового распределения концентрации поверхностного хлорофилла *a* по результатам моделирования (*a*) и данным сканера *SeaWiFS* (*б*)

Заключение

Выполненные численные эксперименты по моделированию тридцатилетней эволюции экосистемы Черного моря показали, что она существенно менялась на протяжении рассматриваемого периода. С начала 70-х (предэвтрофикационный период) до середины 90-х годов (период эвтрофикации) значительно выросла биомасса в верхнем слое Черного моря. Затем с середины 90-х годов популяция планктона начинает уменьшаться, что соответствует периоду выздоровления экосистемы Черного моря. Изменение состояния морской экосистемы проявлялось не только в вариации объемов биопродукции в верхнем слое моря, но и в изменении сезонных циклов основных ком-

понентов экосистемы. Результаты моделирования показали, что объем биологической продукции в верхнем слое моря в глубоководной его части тесно связан со значением концентрации нитратов в слое максимума, расположенном между верхним и нижним нитроклинами на глубине примерно 70 м. За рассматриваемый период их концентрация изменялась в несколько раз, и в соответствии с этим изменялось содержание питательных веществ в поверхностном слое глубоководной части Черного моря и, как следствие, – биомасса планктона. В работе было проведено сравнение характеристик поверхностного хлорофилла *a*, полученных по результатам моделирования, со спутниковыми данными. Основное различие проявилось в том, что максимум весеннего цветения по результатам моделирования сдвинут во времени к началу марта по сравнению с данными спутниковых измерений (середина зимы). В пространственном распределении основное различие наблюдается в том, что полоса повышенной концентрации хлорофилла *a* возле западного берега Черного моря, полученная по модели, существенно шире. В целом результаты численного моделирования соответствуют тому представлению об эволюции экосистемы Черного моря, которое известно по многочисленным измерениям биологических и геохимических параметров.

Работа выполнена при частичной поддержке проектов *SESAME (FP6)* и *MyOcean (FP7 CA 18122008)*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеенко В.А., Коротаев Г.К., Кныш В.В. и др. Межгодовая изменчивость термохалинных и динамических характеристик Черного моря по результатам реанализа за период 1971 – 1993гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – Вып. 19. – С. 216 – 227.
2. Кныш В.В., Кубряков А.И., Инюшина Н.В. и др. Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в σ -координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солености // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 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. Огуз Т., Дорофеев В. Л., Коротаев Г.К. Моделирование экосистемы Черного моря // Там же. – 2007. – № 1. – С. 59 – 72.
5. Дорофеев В.Л. Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря // Там же. – 2009. – № 6. – С. 49 – 61.
6. 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 Res. – 1999. – 46, № 4. – P. 597 – 636.
7. 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 // Glob. biochem. cycles. – 2000. – 14, № 4. – P. 1331 – 1352.
8. Oguz T., Ducklow H.W., Purcell J.E. et al. Modeling the response of top-down control exerted by gelatinous carnivores on the Black Sea pelagic food web // J. Geophys. Res. – 2001. – 106, № C3. – P. 4543 – 4564.
9. Ludwig W. River runoff and nutrient load data synthesis for hindcasting simulations // Deliverable 4.3.2, SESAME project.

10. Purcell J.E., Shiganova T.A., Decker M.B. et al. The ctenophore mnemiopsis in native and exotic habitats: U.S. estuaries versus the Black Sea basin // *Hydrobiologia*. – 2001. – 451. – P. 145 – 176.
11. 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 Res.* – 2007. – 54, № 2. – P. 220 – 242.
12. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла *a* в Черном море по спутниковым данным *SeaWiFS* // *Морской экологический журнал*. – 2008. – № 2. – С. 24 – 42.
13. <http://blackseacolor.com/>

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: dorofeyev_viktor@mail.ru

Материал поступил
в редакцию 25.01.11

АНОТАЦІЯ У роботі на основі тривимірної моделі зроблена спроба відновити мінливість екосистеми Чорного моря впродовж останніх трьох десятиріч попереднього століття. Згідно багаточисленним вимірюванням за цей час морська екосистема зазнала суттєвих змін. Відносно здоровий стан екосистеми, який спостерігався в 60-х роках – початку 70-х років, змінився стадією евтрофікації в 80-х – середині 90-х. Крім кількісних варіацій біомаси у верхньому шарі моря, зміни виявилися також у складі компонентів екосистеми і в їх сезонних циклах. Крім того, ці зміни супроводжувалися перебудовою вертикальної структури біогеохімічних параметрів в глибоководній частині Чорного моря. Найпомітнішою зміною біогеохімічної вертикальної структури виявилось збільшення значення концентрації нітратів у шарі максимуму з 2 – 3 ммоль N/м³ наприкінці 60-х до 6 – 9 ммоль N/м³ в першій половині 90-х років.

Ключові слова: Чорне море, морська екосистема, моделювання, довготривала мінливість екосистеми.

ABSTRACT Based on a three-dimensional model an attempt is made to reconstruct the Black Sea ecosystem evolution during the last three decades of the 20th century. According to numerous measurements, the marine ecosystem underwent significant changes during this period. Rather healthy state of ecosystem in the 60ies – early 70ies changed to an eutrophication stage in the 80ies – mid 90ies. Apart from quantitative changes of biomass in the sea upper layer, the variations are also observed in the ecosystem components' composition and their seasonal cycles. In addition, these changes are accompanied by modification of the vertical structure of bio-geochemical parameters in the deep-water part of the Black Sea. The most pronounced change of bio-geochemical vertical structure is the increase of nitrate concentration in the layer of maximum: from 2 – 3 μM in the late 60ies to 6 – 9 μM in the first half of the 90ies.

Keywords: Black Sea, marine ecosystem, modeling, long-term variability of ecosystem.