

В.Л. Дорофеев

Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря

В работе рассматривается десятилетняя эволюция экосистемы Черного моря. Для этого используется трехмерная междисциплинарная модель экосистемы, которая состоит из модели циркуляции Черного моря и биогеохимического блока. Модель циркуляции основана на широко применяемой модели *POM (Princeton Ocean Model)*. Рассчитанные гидрофизические поля интерполируются затем на уровни биогеохимической модели, которая охватывает верхний 150-метровый слой. В работе показана тесная связь межгодовой изменчивости гидрофизических полей с эволюцией основных элементов экосистемы. Рассматриваемый период (1992 – 2001 гг.) характеризуется нагреванием верхнего слоя Черного моря, что можно проследить по тренду роста поверхностной температуры. На основе результатов моделирования получено, что процесс потепления проявляется также в подповерхностных гидрофизических характеристиках и динамике основных элементов экосистемы Черного моря.

Введение. Экосистема Черного моря за последние 30 – 40 лет претерпела существенную трансформацию. После относительно здорового состояния 60-х годов прошлого столетия она испытала интенсивную эвтрофикацию, резкое уменьшение биологического разнообразия и рыбных запасов в течение следующих лет. Кризис экосистемы Черного моря был прямым следствием как климатических изменений, так и внешнего антропогенного воздействия, поэтому моделирование долговременной эволюции экосистемы и выявление механизмов, управляющих этой эволюцией, являются актуальной задачей. Выздоровление экосистемы Черного моря, наблюдавшееся в первой половине 90-х годов, объясняется некоторыми защитными мерами, предпринятыми для контроля за антропогенным загрязнением и чрезмерным выловом рыбы. Вместе с тем по данным турецких ученых по вылову анчоусовых [1], а также аналогичным данным для российского, украинского и грузинского секторов Черного моря [2] можно сделать вывод о систематическом тренде в сторону уменьшения после 1995 г. В работе [1] показано, что аналогичная неблагоприятная ситуация наблюдалась во второй половине 90-х годов на всех уровнях пищевой цепи Черного моря от фитопланктона до рыб. Там же отмечено, что эти изменения могут быть результатом изменений в физическом состоянии Черного моря, вызванных климатическими факторами, а именно потеплением, имеющем место в Черном море после 1993 г.

В данной работе представлен анализ декадной эволюции экосистемы Черного моря и ее связи с эволюцией гидрофизических полей. Анализ проведен на основе результатов численного моделирования, выполненного по трехмерной междисциплинарной модели Черного моря.

Описание модели. Трехмерная модель экосистемы Черного моря представляет собой междисциплинарную модель, объединяющую модель

© В.Л. Дорофеев, 2009

циркуляции Черного моря и биогеохимическую часть, посредством которой исследуется взаимодействие между различными компонентами экосистемы.

В основном эта модель экосистемы повторяет представленную в работе [3], но есть отличия. Циркуляция и термодинамика рассчитываются на основе численной модели *POM*, модифицированной для бассейна Черного моря [4]. Преимуществом модели циркуляции на основе *POM*, по сравнению с ранее использовавшейся моделью, является наличие турбулентной подмодели, благодаря чему лучше воспроизводятся 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 составлял примерно 8 км (141 × 88 узлов). Вертикальное разрешение модели – 26 расчетных уровней в σ -координатах, сгущающихся у поверхности, для более точного воспроизведения процессов перемешивания в приповерхностном слое. В качестве внешнего воздействия в модели были заданы поля поверхностной температуры, потоков тепла и пресной воды, а также солнечная радиация. Эти поля брались с периодичностью в 6 ч из данных реанализа *ERA-40* и затем интерполировались на сетку модели циркуляции. Другим источником данных для модели циркуляции была спутниковая альтиметрия. Эти данные представляют собой вдольтрековые аномалии возвышений уровня моря, полученные с различных спутников. Данные были предварительно обработаны и представлены в виде конечного продукта для пользователей космическим центром в Тулузе (Франция). Предварительная обработка включала в себя атмосферную коррекцию, устранение влияния поверхностных волн и неоднородности атмосферного давления у морской поверхности. Ассимиляция альтиметрических данных происходила по схеме, аналогичной той, что была описана в работе [5]. При этом процедура ассимиляции была адаптирована к модели *POM*, в частности коэффициенты корреляции между отклонениями морской поверхности и отклонениями солёности (и температуры) на различных горизонтах были пересчитаны с z -координат на σ -координаты.

Биогеохимическая часть модели также несколько отличается от той, что была представлена в [3]. В настоящей работе эта часть модели экосистемы включает в себя двенадцать компонентов, а не девять, как в предыдущей. Пищевая цепь биологической части модели состоит из двух групп фитопланктона (диатомовые и флагелляты), двух размерных групп зоопланктона (микрзоопланктон и мезозоопланктон), гетеротрофного бактериопланктона, всеядной динофлагелляты *Noctiluca scintillans*; верхний уровень пищевой цепи образуют медуза *Aurelia aurita* и *Mnemiopsis leidyi*, которые питаются зоопланктоном. Геохимическая часть модели представлена нитратом и аммонием. Для связи между биологической и геохимической частями модели введены также растворенное и взвешенное органические вещества. Концентрация всех биологических и химических компонентов модели выражена в микромолях азота на литр.

Биогеохимическая часть модели экосистемы реализована на той же самой пространственной сетке, что и модель циркуляции. По вертикали она занимает верхний 150-метровый слой, разбитый на 23 горизонта, сгущаю-

щихся к поверхности моря (расстояние между расчетными горизонтами у поверхности составляет 2 м, у нижней границы области оно увеличивается до 10 м). Поля скоростей течений, температуры и коэффициентов вертикальной диффузии, полученные по модели циркуляции в σ -координатах, интерполируются затем на расчетные горизонты биогеохимической модели и используются для расчета биологических параметров. Их эволюция описывается уравнениями переноса – диффузии, включающими в правую часть слагаемые типа источников – стоков:

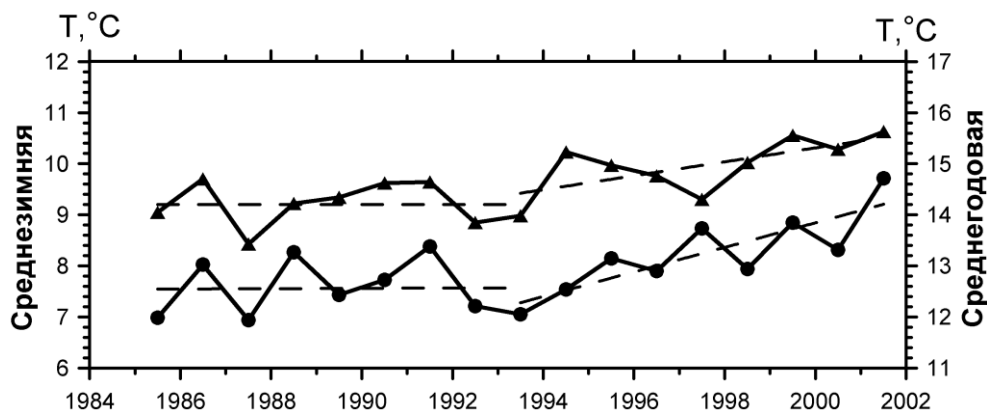
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(vF)}{\partial y} + \frac{\partial[(w + w_s)F]}{\partial z} = K_h \nabla^2 F + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \mathfrak{R}(F),$$

где F – концентрация компонента биогеохимической части модели, w_s – скорость оседания, равная нулю, для всех компонентов, кроме взвешенной органики и диатомовой группы фитопланктона; u, v, w – компоненты скорости течений; K_h, K_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии; $\mathfrak{R}(F)$ – член, описывающий взаимодействие компонента F экосистемы с другими. Последний член в правой части уравнения содержит большое количество параметров, характеризующих взаимодействие между различными компонентами модели экосистемы. Они выбирались в соответствии с работами [6 – 8], в которых рассмотрены различные варианты одномерной модели экосистемы открытой части Черного моря. На верхней и нижней, а также на боковых границах области интегрирования уравнений биогеохимической модели задавались нулевые диффузионные потоки, за исключением района северо-западного шельфа, где на дне задавались вертикальные потоки нитратов, которые моделировали их вынос Дунаем в этот регион Черного моря. В качестве начальных условий в модели экосистемы задавались равномерное по глубине распределение нитратов и малые ненулевые начальные распределения остальных характеристик. Примерно на второй год интегрирования параметры экосистемы выходят на квазипериодический режим, поэтому перед исследованием интересующего периода времени (1992 – 2001 гг.) должны быть проведены модельные расчеты примерно за год, которые не анализируются. Как показано в работах [3, 9], в трехмерной междисциплинарной модели правильно воспроизводится сезонная изменчивость компонентов экосистемы Черного моря. В данной работе рассматриваются в основном межгодовая изменчивость параметров экосистемы Черного моря и ее связь с изменчивостью физических полей.

Основные черты межгодовой изменчивости гидрофизических полей.

На рис. 1 приведены графики временной изменчивости среднегодовой и среднезимней температур поверхности Черного моря для 1985 – 2002 гг. Величины на графиках получены в результате осреднения по площади бассейна Черного моря и по соответствующему промежутку времени полей поверхностной температуры, взятых из массива данных реанализа ERA-40, которые являются входными параметрами используемой модели циркуляции. Приведенный на рисунке период времени с 1985 по 2002 гг. можно разделить на два: 1985 – 1993 гг. и 1994 – 2002 гг. Первый период характеризуется

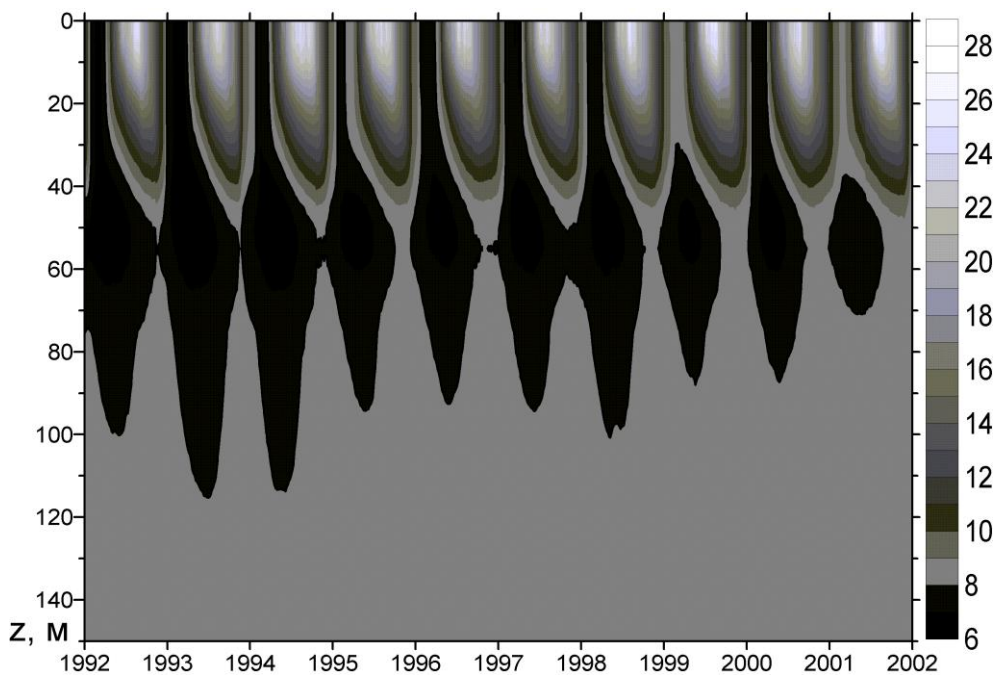
практически отсутствием трендов в среднегодовой и среднезимней поверхностных температурах, а после 1993 г. наблюдается потепление, когда среднегодовая температура поднялась приблизительно с 14 °С в 1992 г. до 15,6 °С в 2001 г. Аналогичные тренды видны и в поведении среднезимней температуры.



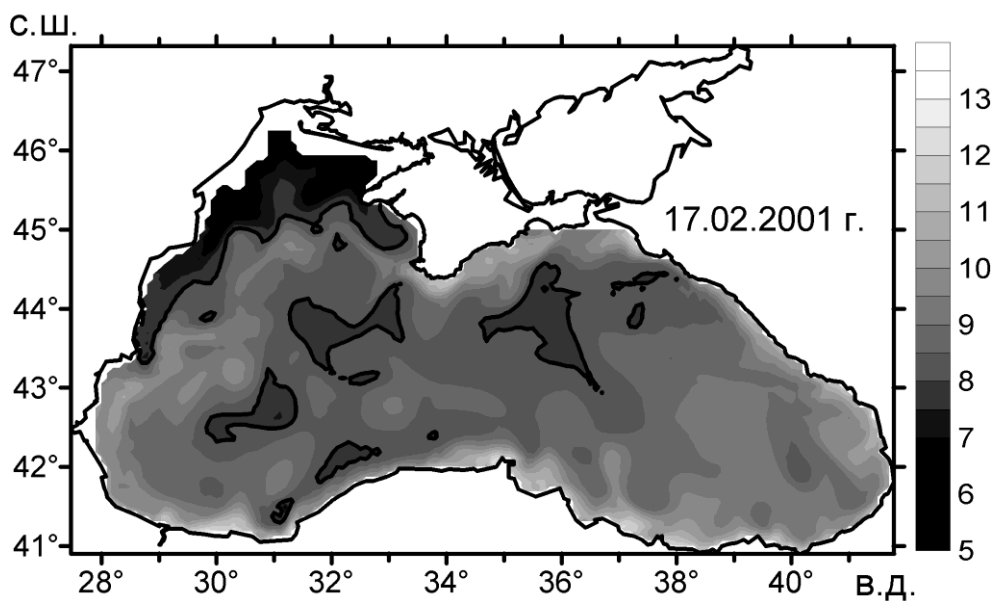
Р и с. 1. Временная эволюция осредненных по площади бассейна Черного моря среднегодовой (треугольники) и среднезимней (точки) поверхностных температур, полученных по данным реанализа ERA-40 (штриховые линии – тренды за соответствующие периоды времени)

Рассматриваемый в данной работе период времени приходится на период потепления после двух лет (1992 и 1993 гг.) с холодными зимами. В результате моделирования мы имеем набор всех трехмерных гидрофизических полей. Поэтому можно проследить, как процесс нагревания верхнего слоя моря, наблюдаемый по тренду роста поверхностной температуры, проявляется в других полях. Одним из индикаторов потепления Черного моря может служить изменчивость холодного промежуточного слоя (ХПС).

На рис. 2 изображена временная изменчивость средней по площади бассейна температуры в верхнем 150-метровом слое моря. Темные пятна с центром на глубине ~60 м обозначают области с температурой воды ниже 8 °С, что примерно соответствует границам ХПС. По этому рисунку видно, что после 1994 г. толщина ХПС уменьшается. Минимальных размеров она достигает в 1999 и 2001 гг., в которые, согласно рис. 1, наблюдались самые теплые зимы. Кроме того, в эти годы видно отсутствие связи областей низкой температуры с поверхностью моря. Это говорит о том, что в эти годы даже в зимние месяцы средняя температура в слоях, близких к поверхности, была выше 8 °С. Тем не менее, как следует из рис. 2, ХПС все же наблюдался, хотя и был слабым. На рис. 3 показана карта поверхностной температуры для середины февраля 2001 г. Видно наличие холодной воды на северо-западном шельфе, и лишь небольшие пятна ее отмечаются в открытой части моря. То есть в этот год ХПС поддерживался главным образом за счет холодных вод северо-западного шельфа.

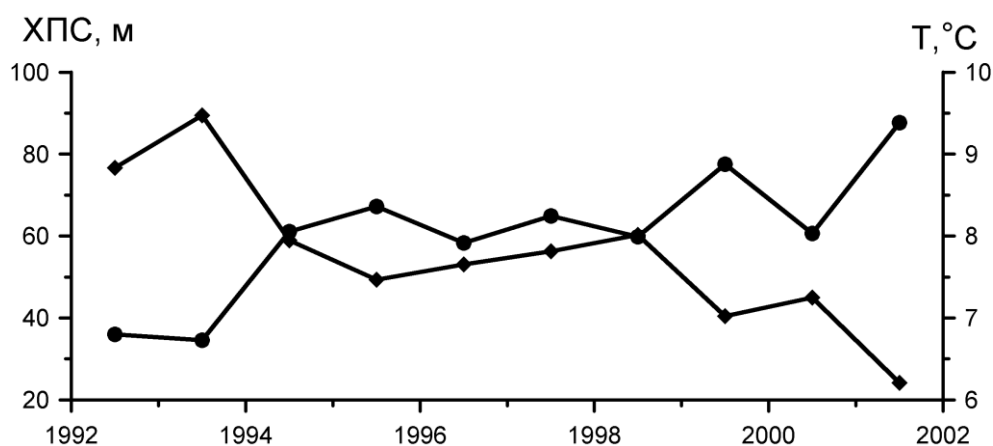


Р и с. 2. Декадная эволюция осредненной по площади бассейна температуры ($^{\circ}\text{C}$) в верхнем 150-метровом слое Черного моря, полученной по результатам моделирования (темные пятна – области с температурой ниже 8°C)



Р и с. 3. Карта поверхностной температуры Черного моря ($^{\circ}\text{C}$), полученной по результатам моделирования (сплошными линиями выделены области с температурой ниже 8°C)

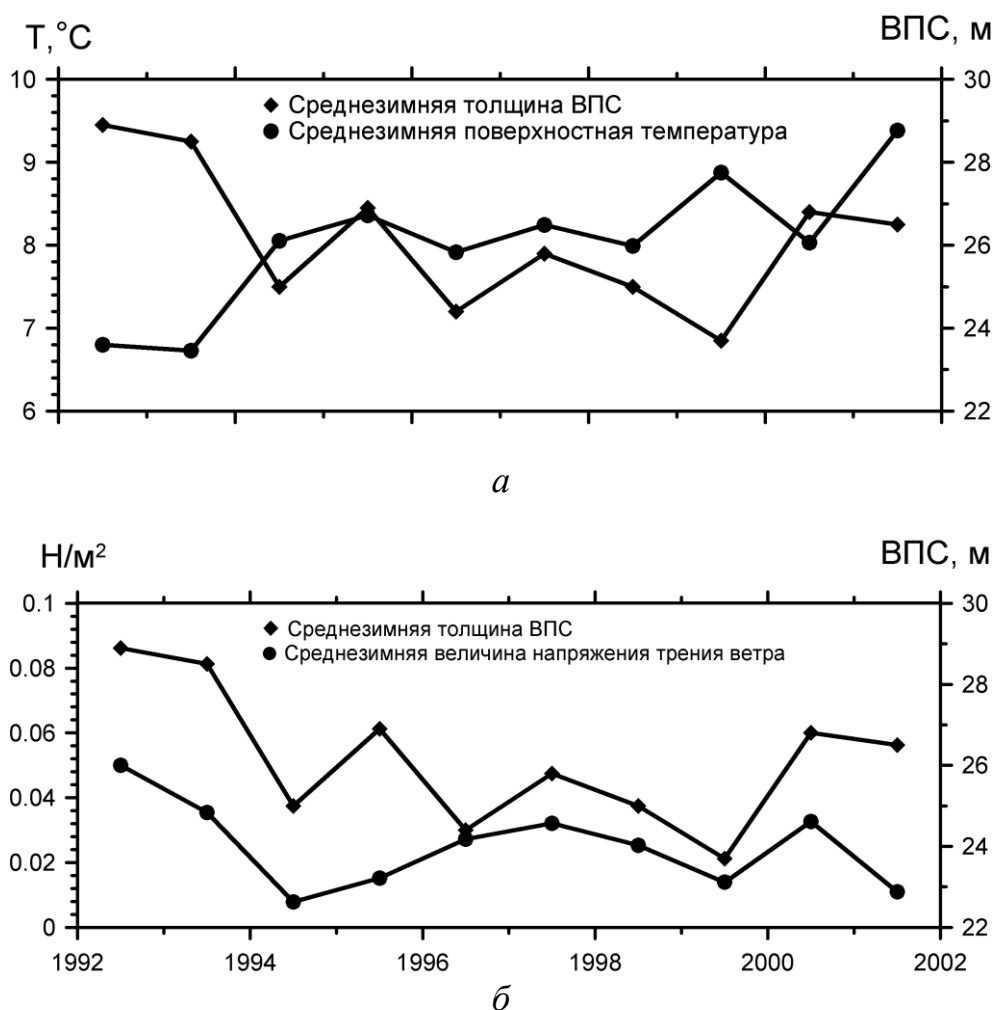
На рис. 4 приведен график временной эволюции средней по площади бассейна толщины ХПС в летний сезон, полученной по результатам моделирования. Толщина ХПС определялась как расстояние между изотермами 8 °С. На этом же графике представлено поведение среднезимней поверхностной температуры. Видно значительное уменьшение средней толщины ХПС в течение периода расчета. Средняя толщина ХПС в летний сезон уменьшилась с 80 – 90 м в 1992, 1993 гг. до 25 м в 2001 г. Сравнение двух кривых показывает очень хорошую корреляцию – чем ниже средняя поверхностная температура в зимний сезон, тем толще ХПС летом, что подтверждает представление о главном механизме образования ХПС за счет интенсивной зимней конвекции, за исключением лет с теплыми зимами, когда ХПС снабжается в зимний сезон холодной водой с северо-западного шельфа.



Р и с. 4. Временная эволюция осредненных по площади бассейна Черного моря зимней поверхностной температуры (точки) и толщины ХПС в летний сезон (квадраты), полученных по результатам моделирования

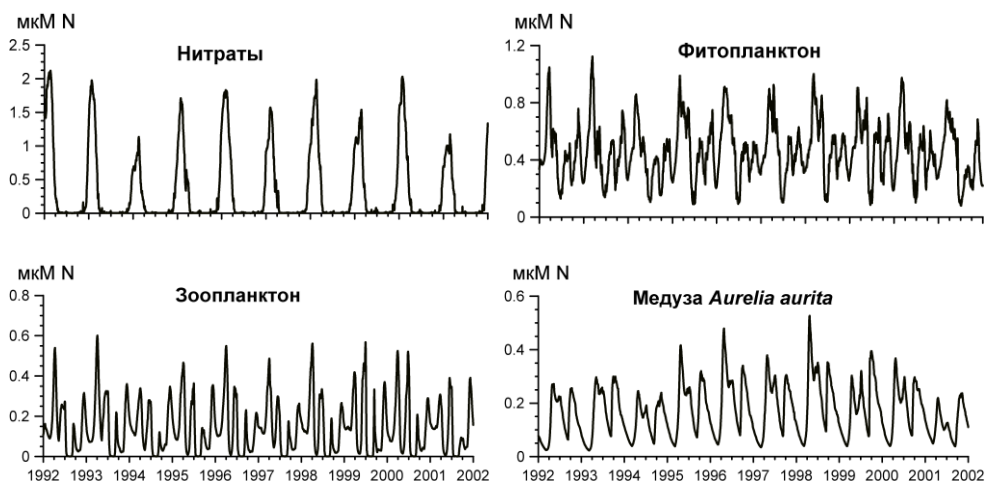
Другим индикатором потепления Черного моря во второй половине 90-х годов может служить изменчивость толщины верхнего перемешанного слоя (ВПС). На рис. 5 для глубоководной части бассейна (глубина больше 200 м) приведен график временной эволюции средней по площади бассейна толщины ВПС в зимний период, полученной по результатам моделирования. Толщина ВПС определялась как расстояние от поверхности моря до горизонта, на котором плотность воды на $0,2 \text{ кг/м}^3$ превышает поверхностную плотность. Глубина ВПС в зимний период важна для процессов поступления в верхний слой моря питательных веществ из глубины и во многом определяет интенсивность весеннего цветения фитопланктона в открытой области моря. За расчетный период проявляется тенденция уменьшения средней толщины ВПС от 29 м в 1993 г. до 24 м в 1999 г. При этом видны положительная корреляция толщины ВПС с интенсивностью ветра и отрицательная – со средней поверхностной температурой. Это объясняется тем, что форми-

рование ВПС зимой определяется в основном двумя факторами: конвекцией и генерируемой ветром турбулентной энергией.



Р и с. 5. Временная эволюция осредненных по площади бассейна Черного моря зимней поверхностной температуры и толщины ВПС зимой (а), а также средней величины напряжения трения ветра (Н/м²) и толщины ВПС зимой (б), полученных по результатам моделирования

Межгодовая изменчивость элементов экосистемы. На основе трехмерных гидрофизических полей, полученных по модели циркуляции Черного моря, был проведен анализ эволюции экосистемы Черного моря за расчетный период. На рис. 6 представлена временная изменчивость средней поверхностной концентрации четырех компонентов экосистемы: нитратов, фитопланктона, зоопланктона и медузы *Aurelia aurita*, которая находится на верхнем уровне пищевой цепи рассматриваемой системы.



Р и с. 6. Временная эволюция средних поверхностных концентраций нитратов, фитопланктона, зоопланктона и медузы *Aurelia aurita*, полученных по результатам моделирования

График поверхностной концентрации нитратов имеет четко выраженные пики в зимнее время. Это связано с поступлением нитратов из области нитроклина к поверхности во время интенсивного зимнего перемешивания. В то же время поверхностная концентрация фитопланктона в зимний сезон незначительна. На этом же графике четко прослеживается межгодовая изменчивость. В годы с мягкой зимой (1994, 2001 гг.) величина пиков значительно меньше, чем в годы с холодной зимой.

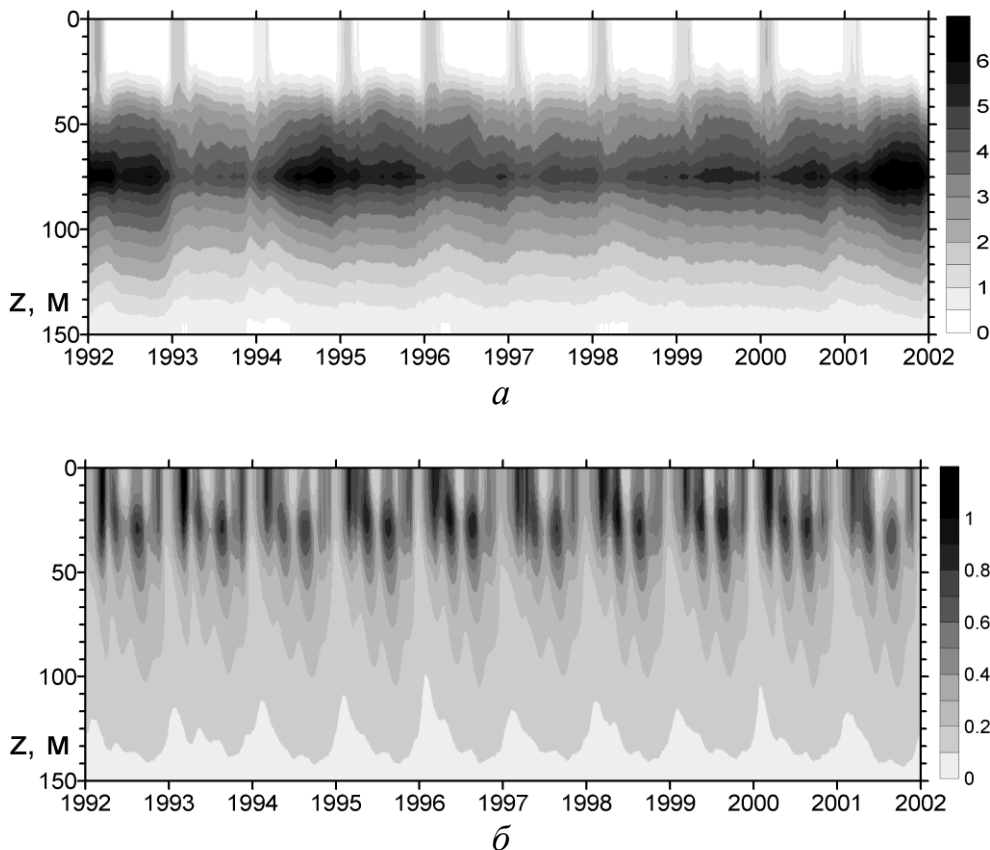
Сезонная изменчивость поверхностной концентрации фитопланктона содержит ряд максимумов, главный из которых приходится на начало весны и связан с весенним цветением фитопланктона. Помимо сезонной здесь на рисунке видна также межгодовая изменчивость. В частности, в те годы, когда величина максимума поверхностной концентрации нитратов низкая, интенсивность весеннего цветения фитопланктона невелика.

В сезонной изменчивости зоопланктона основной пик также приходится на весну и следует за весенним пиком графика для фитопланктона. Это увеличение концентрации зоопланктона связано с обилием пищи во время весеннего цветения. Затем концентрация зоопланктона падает, что вызвано его истреблением хищниками (*Aurelia* и *Mnemiopsis*).

Поверхностная концентрация медузы *Aurelia* в течение года имеет два максимума, первый из которых следует за весенним максимумом в концентрации зоопланктона. На рисунке также видна выраженная межгодовая изменчивость. Наименьшие величины поверхностных концентраций зоопланктона (потребителя фитопланктона), а также медузы *Aurelia* (потребителя зоопланктона) наблюдаются в 1994 и 2001 гг., когда величина максимума нитратов была минимальной.

На рис. 7 представлена временная эволюция средних по площади концентраций нитратов и суммарного фитопланктона в верхнем 150-метровом слое моря. Обращает на себя внимание сильная межгодовая изменчивость концентрации нитратов на горизонте 75 м, расположенном между верхним и

нижним нитроклинами. На этом горизонте наблюдается максимум концентрации нитратов. Наибольшие величины отмечаются в 1994 и 2001 гг., когда процессы перемешивания зимой были слабыми. Это проявилось в низкой поверхностной концентрации нитратов (рис. 6). На диаграмме эволюции фитопланктона, помимо весеннего цветения, которое проявляется в виде максимумов поверхностной концентрации, хорошо виден также летний подповерхностный максимум.

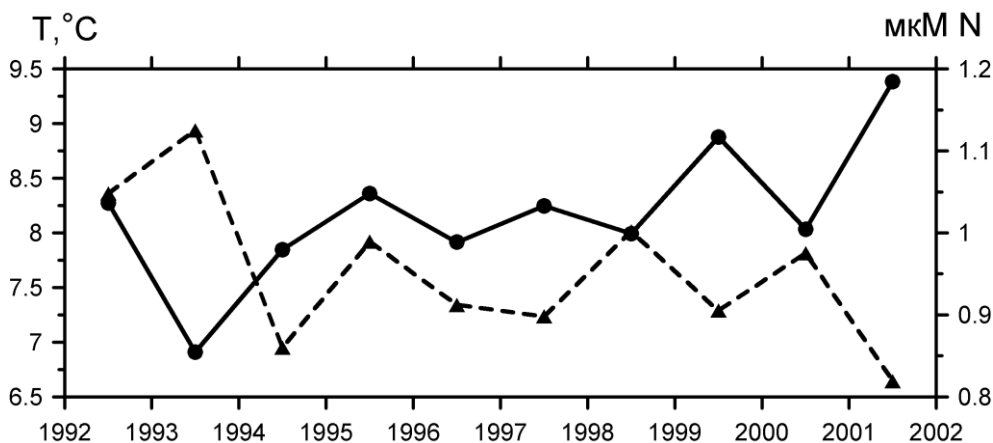


Р и с. 7. Декадная эволюция осредненных по площади бассейна концентраций (мкМ N) нитратов (а) и фитопланктона (б) в верхнем слое Черного моря, полученных по результатам моделирования

Как отмечалось выше, одной из главных черт сезонной изменчивости концентрации фитопланктона является весеннее цветение, которое связано с поступлением питательных веществ в верхний слой моря из глубины во время интенсивного зимнего перемешивания. Поэтому интенсивность этого явления должна зависеть от интенсивности процессов перемешивания, в частности конвекции. На рис. 8 представлены графики зависимости от времени средней за зиму поверхностной температуры для десяти лет и средней величины концентрации фитопланктона на поверхности во время максимума весеннего цветения. Как отмечалось выше, средняя зимняя поверхностная температура за рассматриваемый период выросла, соответственно поверх-

ISSN 0233-7584. *Мор. гидрофиз. журн.*, 2009, № 6 79

ностная концентрация фитопланктона имеет явную тенденцию к понижению. Максимальное значение поверхностной концентрации (1,1 мкМ N) наблюдается в 1993 г. (год с холодной зимой), а минимальная концентрация (около 0,8 мкМ N) – в 2001 г., когда зима была самая теплая за рассматриваемый период. Кроме того, видна довольно хорошая корреляция между высокой зимней температурой и низкими значениями поверхностной концентрации фитопланктона во время весеннего цветения. То есть прослеживается явная связь межгодовой изменчивости гидрофизических полей и элементов экосистемы.



Р и с. 8. Временная эволюция осредненных по площади бассейна Черного моря зимней поверхностной температуры (точки) и поверхностной концентрации фитопланктона (треугольники) во время максимума весеннего цветения

Заклучение. В работе проведен анализ эволюции экосистемы Черного моря за десятилетний период с 1992 по 2001 гг. Этот период характеризуется нагреванием верхнего слоя Черного моря, индикатором которого является динамика среднегодовых и средних за зиму значений поверхностной температуры, которые получены по данным реанализа *ERA-40*. На основе результатов моделирования можно сделать вывод о том, что тенденция потепления наблюдается также по изменчивости толщины ХПС и толщины ВПС в зимний период. ХПС по результатам расчетов существенно уменьшился к 2001 г. Уменьшение зимой толщины ВПС, вызванное главным образом ослаблением конвекции, ведет к уменьшению поступления в верхний фотический слой моря глубинных вод, богатых нитратами и аммонием. Это, в свою очередь, приводит к меньшей интенсивности весеннего цветения фитопланктона и в целом к уменьшению общей биомассы в верхнем слое. Результаты проведенных расчетов показали тесную связь гидрофизических процессов с эволюцией параметров экосистемы Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Ducklow H.W.* Climatic warming and accompanying changes in the ecological regime of the Black Sea during 1990s // *Glob. Biogeochem. cycles.* – 2003. – 17, № 3. – P. 1088 – 1098.
2. *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.
3. *Огуз Т., Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К.* Моделирование экосистемы Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 2007. – № 1. – С. 59 – 72.
4. *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 // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 16. – С. 243 – 265.
5. *Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К.* Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихре-разрешающей модели циркуляции Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 2004. – № 1. – С. 52 – 68.
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. Part 1.* – 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. *Дорофеев В.Л., Огуз Т., Коротаев Г.К.* Моделирование биологической изменчивости Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – Вып. 13. – С. 71 – 82.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 14.08.08
После доработки 15.09.08

ABSTRACT Decadal evolution of the Black Sea ecosystem is analyzed using a three-dimensional coupled model which consists of the Black Sea circulation model and the biogeochemical block. The circulation model is based on the widely used model *POM (Princeton Ocean Model)*. Hydrophysical fields calculated due to the circulation model are interpolated onto the levels of the biogeochemical model which covers the upper 150-m layer. The performed analysis shows close relation between inter-annual variability of hydrophysical fields and evolution of the ecosystem basic parameters. The considered period (1992 – 2001) is characterized by heating of the Black Sea upper layer that is evident from the surface temperature trend. The obtained results make it clear that the warming process is manifested both in subsurface hydrophysical characteristics and in dynamics of the basic parameters of the Black Sea ecosystem.