

ЭКОЛОГИЯ ЧЕРНОГО МОРЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРИБРЕЖНОЙ И ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНАХ

УДК 551.043

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

Морской гидрофизический институт НАН Украины. г. Севастополь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЭКОСИСТЕМЫ ЧЕРНОГО МОРЯ В ТЕЧЕНИЕ ПЕРВОЙ ДЕКАДЫ 2000-х.

На основе расчетов по трехмерной междисциплинарной модели анализируется эволюция экосистемы Черного моря на протяжении девяти лет первой декады 21-го столетия. Данная работа является дополнением к предыдущим исследованиям динамики экосистемы Черного моря с 1971 по 2001 годы. Первое десятилетие 2000-х характеризуется общим потеплением в регионе, что проявляется в повышении среднегодовой и среднезимней температуры поверхности моря и уменьшении холодозапаса и толщины холодного промежуточного слоя. В работе изучается отклик нижних уровней пищевой цепи морской экосистемы на эти изменения климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *численное моделирование, экосистема, Черное море.*

Введение. В работах [1, 2] были описаны результаты моделирования динамики экосистемы Черного моря в течение трех десятилетий (1970 – 2001 гг.) с помощью трехмерной междисциплинарной модели. Этот период характеризовался существенной трансформацией морской экосистемы, которая проявилась в изменении биомассы, структуры 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 следующих лет. Результаты численного моделирования, выполненные по трехмерной междисциплинарной модели и описанные в [1, 2], в целом отразили основные черты эволюции экосистемы Черного моря, известные по многочисленным измерениям биологических и геохимических параметров. С начала семидесятых до девяностых годов значительно выросла биомасса в верхнем слое Черного моря. Этот период характеризуется как стадия эвтрофикации Черного моря. При этом изменение состояния экосистемы проявлялось не только в увеличении объемов биопродукции, но и в изменении сезонного цикла основных компонентов. Было показано, что биомасса верхнего слоя моря в глубоководной его части тесно связана со значением концентрации нитратов в слое максимума, расположенного между верхним и нижним нитроклином на глубине примерно 70 м. За рассматриваемый период величина этой концентрации изменилась в несколько раз, и в соответствии с этим менялся объем био-

продукции в поверхностном слое Черного моря. Было также проведено сравнение пространственного распределения поверхностной концентрации хлорофилла, полученного по результатам моделирования и по спутниковым данным, что показало неплохое их соответствие. В данной работе приводятся результаты моделирования экосистемы для периода времени с 2002 по 2010 годы, что дополняет предыдущие работы.

Модель экосистемы Черного моря. Динамика нижнего уровня пищевой цепи экосистемы описывается междисциплинарной трехмерной моделью, состоящей из численной модели циркуляции Черного моря и биогеохимического блока. Между этими частями существует односторонняя связь: гидрофизические поля, получаемые по модели циркуляции (температура, соленость, скорости течений и коэффициенты турбулентной диффузии), являются входными параметрами биогеохимической части модели. В качестве модели циркуляции использовалась модель Принстонского университета (*The Princeton Ocean Model – POM*), адаптированная к условиям Черного моря [3]. Преимуществом этой модели является наличие турбулентной подмодели, позволяющей реалистично воспроизводить процессы перемешивания в верхнем слое моря, играющие важную роль в биологических процессах в слое фотосинтеза. Пространственный шаг сетки модели циркуляции составляет примерно 8 км (141 × 88 узлов). Вертикальное разрешение – 26 расчетных уровней в σ -координатах, сгущающихся у поверхности. В качестве внешнего воздействия использовались поля поверхностной температуры, потоков тепла и пресной воды, а также солнечная радиация. Эти поля представляют собой результат атмосферного реанализа *MM5 (Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model, NCAR – National Centers of Atmospheric Research)* 2001 – 2011 гг. для Черноморского региона, выполненного в МГИ НАН Украины М.В. Шокуровым [4]. Горизонтальное пространственное разрешение полей реанализа равно 18 км, дискретность по времени – 1 час.

Биогеохимическая часть модели экосистемы охватывает верхний двухсотметровый слой моря и включает 15 переменных состояния. Нижний уровень пищевой цепи представляют две группы фитопланктона (диатомовые и флагеллаты), следующий уровень представляют две размерные группы зоопланктона: микрозоопланктон и мезозоопланктон. Верхний уровень пищевой цепи занимают медузообразные *Aurelia aurita* и *Mnemiopsis leidyi*. Отдельную группу представляет всеядная динофлагеллата *Noctiluca scintillans*, потребляющая фитопланктон, бактериопланктон, микрозоопланктон и взвешенную органику. Пищевая цепь включает в себя также нефотосинтезирующий бактериопланктон, растворенную и взвешенную органику. Представленная модель основана на азотном цикле (азот рассматривается как единственный ограничивающий элемент). В азотный цикл входят также три неорганических соединения: аммоний, нитраты и нитриты. В качестве отдельных переменных состояния биогеохимической модели рассматриваются также растворенные кислород и сероводород. Изменение во времени составляющих экосистемы 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 $\mathcal{R}(F)$ описывает взаимодействие различных компонентов модели, w_s – скорость оседания, отличная от нуля для диатомовых водорослей и взвешенной органики и равная нулю для остальных переменных состояния, (u, v, w) – компоненты скорости течений, K_h, K_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно.

Параметризация потоков азота при взаимодействии различных компонентов биогеохимической модели содержит большое количество размерных или безразмерных коэффициентов. Величины этих коэффициентов выбираются согласно работам [5 – 7]. На поверхности моря задаются нулевые потоки всех переменных состояния кроме кислорода. На жидкой части нижней границы (горизонт 200 м), задаются нулевые условия для всех компонентов экосистемы кроме аммония и сероводорода, а в мелководной части моря на дне – условия отсутствия потоков. Так же условия отсутствия потоков ставятся на боковых границах, за исключением устьев крупных рек, где потоки биогенов пропорциональны их концентрации и интенсивности речного стока. В данной работе использовались климатические значения этих величин, полученные на основе данных из [8]. Биогеохимическая модель имеет горизонтальную сетку такую же, как модель циркуляции. В вертикальном направлении двадцать шесть расчетных z -уровней расположены неравномерно – более часто у поверхности, где шаг сетки равен 2 м, а на глубинах более 150 м – 20 м. Гидродинамические поля, получаемые в модели циркуляции, интерполируются затем на вертикальную сетку биогеохимической части и используются в качестве входных параметров. Вертикальная скорость рассчитывается на новой сетке из уравнения неразрывности.

Изменчивость физических полей. Рассматриваемый нами период (2002 – 2010 гг.) характеризуется повышением температуры верхнего слоя Черного моря. Рост поверхностной температуры моря хорошо виден на графиках эволюции среднегодовой и среднезимней температур, полученным по результатам моделирования (см. рис. 1, *a*). Для сравнения рядом приведены аналогичные графики, демонстрирующие эволюцию тех же величин, полученных по спутниковым измерениям поверхностной температуры.

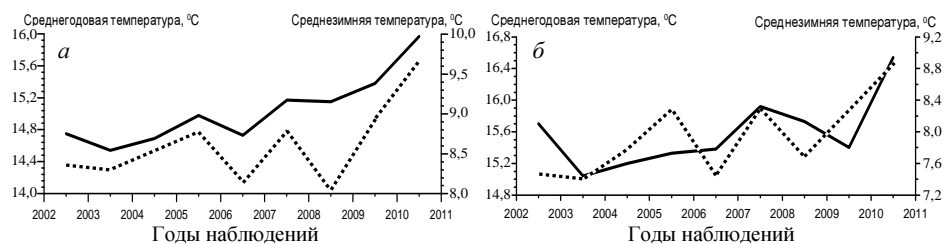


Рис. 1. Временная эволюция среднегодовых (сплошная линия) и среднезимних (пунктирная линия) значений поверхностной температуры, осредненных по мелководной части бассейна Черного моря: *a* – результаты моделирования; *б* – результаты спутниковых измерений.

Как среднегодовая, так и среднезимняя температура поверхности Черного моря поднялась за рассматриваемый период примерно на 1 °C. Хотя количественно значения температуры, полученные по модели, отличаются

от соответствующих значений температуры, полученных по спутниковым наблюдениям, качественно их поведение со временем близко. В частности, в изменчивости зимней температуры имеются локальные минимумы в 2006 и 2008 гг. и максимумы в 2005 и 2007 гг.

Нагревание верхнего слоя моря может также быть видно по поведению холодного промежуточного слоя (ХПС), характеризующегося водной массой с температурой ниже 8°C . На рис. 2 представлены графики зависимости от года средней за летний сезон толщины ХПС и его холодозапаса.

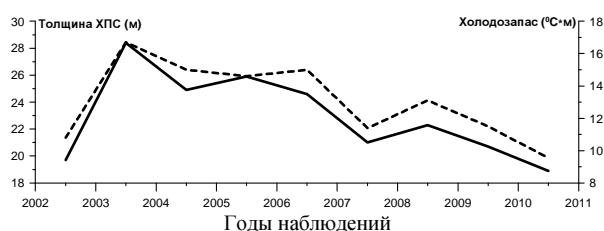


Рис. 2. Временная эволюция средних за лето значений поверхностной толщины ХПС (сплошная линия) и его холодозапаса (пунктирная линия), осредненных по глубоководной части бассейна Черного моря.

После роста в 2003 году летние толщина ХПС и его холодозапас уменьшаются. Эволюцию ХПС можно также проследить на временной диаграмме (рис. 3), где изображено поведение средней по горизонтам температуры моря на разных глубинах.

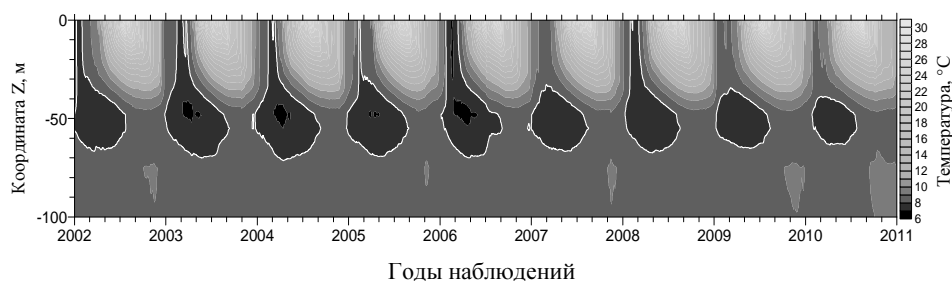


Рис. 3. Временная изменчивость средних по площади температур в верхнем 100-метровом слое Черного моря. Белой линией проведена изотерма 8°C .

Рис. 3. иллюстрирует процесс уменьшения холодного промежуточного слоя. В годы с теплой зимой (2007 г., 2009 г. и 2010 г.) средняя по горизонтам температура не достигает величины ниже 8°C даже зимой, в отличие от лет с более холодной зимой. В годы с теплой зимой основным механизмом поддержания ХПС является проникновение вдоль западного берега холодных зимних вод с северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ) на глубину его ядра и дальнейший перенос в центральную часть бассейна течениями.

На рис. 4 приведены карты осредненной за зимний сезон поверхностной температуры для двух лет с холодной зимой (2006 и 2008 гг.) и двух лет с теплой зимой (2007 и 2010 гг.). В годы с холодной зимой на большей час-

ти поверхности Черного моря температура ниже 8 °С, в то время как в два других года низкая температура занимает небольшие области поверхности.

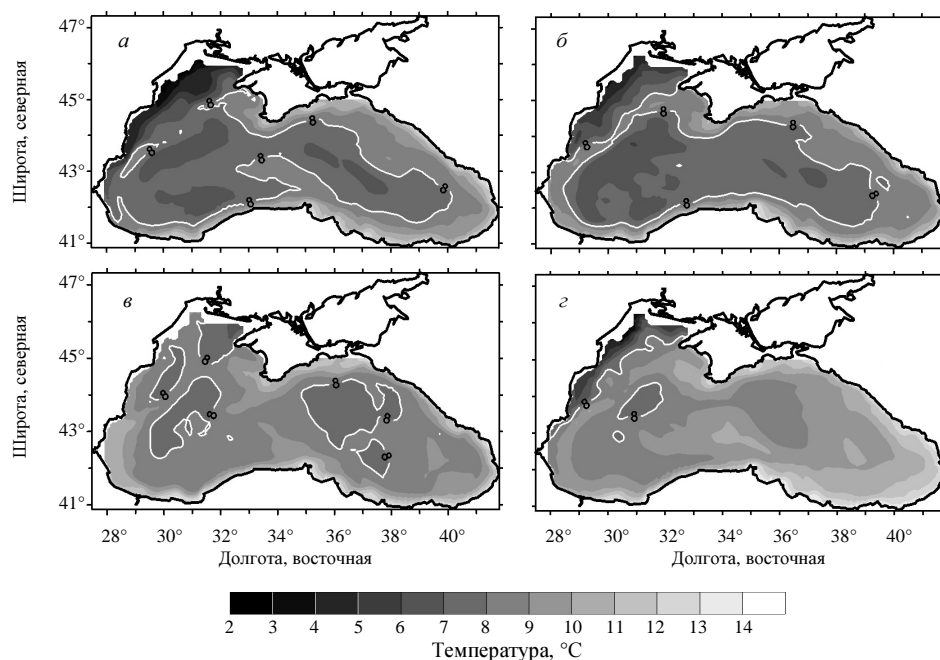


Рис. 4. Карты средней за зиму поверхностной температуры, полученной по результатам моделирования, для четырех лет, соответствующих холодным зимам (*a* – 2006 г., *б* – 2008 г.) и мягким (*в* – 2007 г., *з* – 2010 г.). Белой линией проведена изотерма 8 °С.

Важность изучения гидродинамических процессов, происходящих в Черном море в зимний сезон, определяется тем, что поступление питательных веществ в верхний слой глубоководной части бассейна осуществляется из нижележащих слоев, в основном, в зимнее время, как результат интенсивного перемешивания. Одним из механизмов такого перемешивания является термическая конвекция, зависящая от охлаждения поверхностного слоя моря – чем ниже температура поверхности моря, тем интенсивнее конвекция. Другим механизмом, влияющим на интенсивность перемешивания, является сила ветра во время сезона зимних штормов.

Величина напряжения трения ветра влияет прямо на генерацию турбулентной энергии в приповерхностном слое моря и, как следствие, на интенсивность перемешивания.

На рис. 5, *a* представлена эволюция осредненной по площади бассейна интенсивности ветра. На графике четко виден сезонный ход с максимумом в зимнее время. Кроме того, межгодовая изменчивость также проявляется достаточно ярко. На рис. 5, *б* изображена временная эволюция ротора напряжения трения ветра. Здесь также присутствует сезонный цикл с максимумом в середине зимы, однако он не так ярко выражен, как в случае интенсивности ветра.

В частности, высокие значения завихренности поля напряжения трения ветра наблюдаются в 2003, 2004, 2006, 2008 и 2010 гг., а в 2007 и 2009 гг. в зимний сезон завихренность поля ветра имела довольно низкую величину.

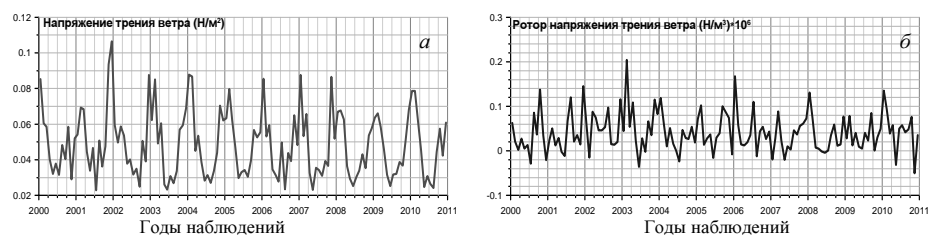


Рис. 5. Временная эволюция среднемесячных значений величины напряжения трения ветра ($\text{H}/\text{м}^2$), осредненной по площади глубоководной части бассейна (*a*), и ротора напряжения трения ветра ($\text{H}/\text{м}^3 10^6$) (*б*).

На рис. 6 показаны осредненные за зиму карты полей течений в верхнем 30-метровом слое для четырех лет. Карты, представленные на рис. 6, *a* и рис. 6, *б*, соответствуют зимам, когда ротор поля ветра был большим – 2004 и 2006 гг., соответственно. Как следствие – в поле течений хорошо просматривается интенсивное Основное Черноморское течение.

На картах, представленных на рис. 6, *в* и рис. 6, *г*, показаны поля течений, соответствующие зимам с низкими значениями ротора ветра – 2007 и 2009 гг., соответственно. На этих картах течение не такое интенсивное и разбивается на ряд вихревых структур. Следует отметить, что величина ротора напряжения трения ветра с точностью до множителя равна скорости Экмана. Большая положительная величина завихренности приводит к дополнительной накачке питательных веществ в поверхностный слой моря за счет вертикальной адвекции.

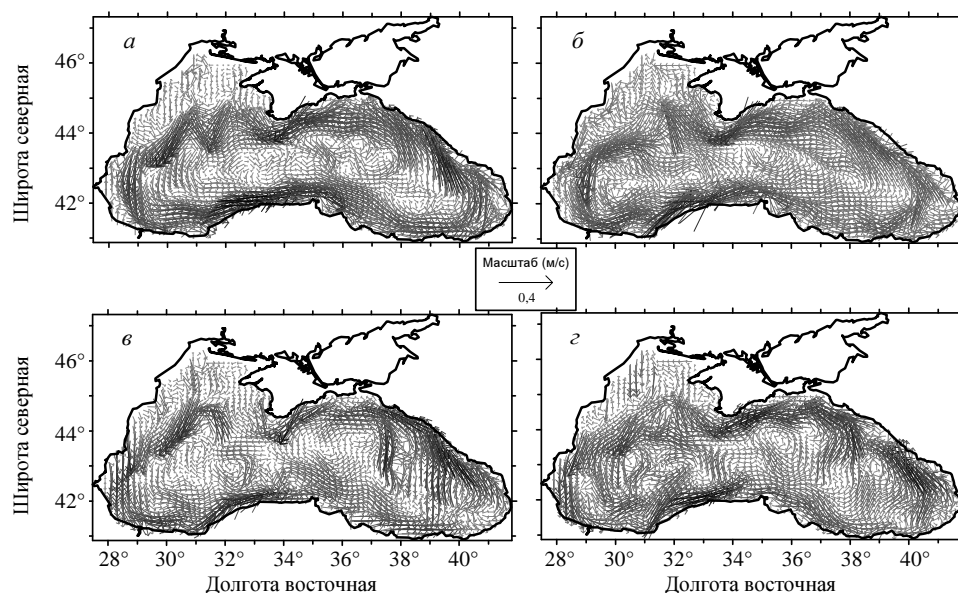


Рис. 6. Карты средней за зиму циркуляции в поверхностном 30-метровом слое, полученные по результатам моделирования: *a* – 2004 г., *б* – 2006 г., *в* – 2007 г., *г* – 2009 г.

Эволюция экосистемы. Как отмечалось выше, зимний сезон является ключевым для развития морской экосистемы в течение всего года, так как в

это время в зону фотосинтеза глубоководной части черноморского бассейна поступает основное количество питательных веществ из нижних слоев. На рис. 7 представлена эволюция средних по площади поверхностных концентраций некоторых компонентов экосистемы.

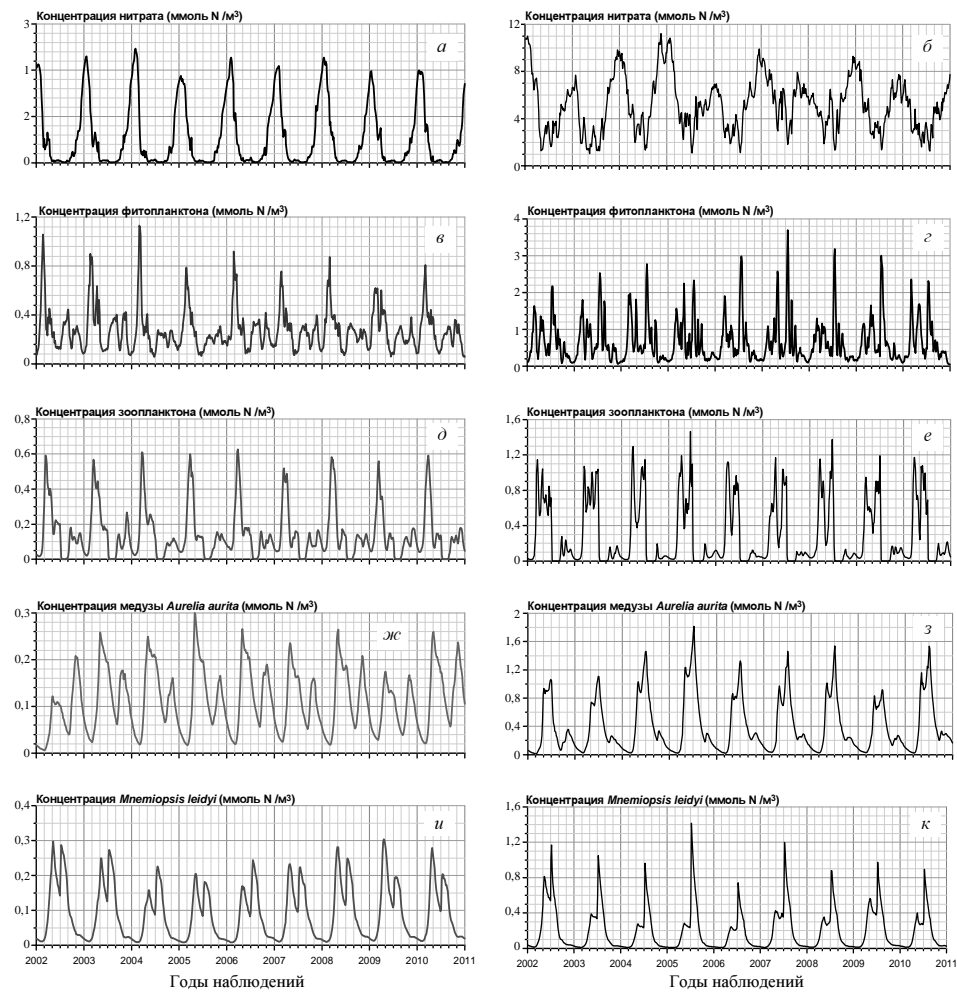


Рис. 7. Временная эволюция средних по площади значений поверхностной концентрации (ммоль N/m^3): а, б – нитратов; в, г – фитопланктона; д, е – зоопланктона; ж, з – медузы *A. Aurita*; и, к – гребневика *M. leidy*. для глубоководной части бассейна (а, в, д, ж, и) и СЗШ Черного моря (б, г, е, з, к).

Сезонный ход концентрации нитратов в поверхностном слое глубоководной части моря (см. рис. 7, а) имеет четкий максимум в середине зимы, вызванный интенсивным зимним перемешиванием. Затем с началом весеннего цветения фитопланктона содержание нитратов падает до низкого уровня и остается таким до следующей зимы. Величина пиков меняется от года к году, что связано с погодными условиями зимой. Например, в 2005 и 2007 гг. зимы были сравнительно теплыми, соответственно значения зимних концентраций нитратов были ниже. На северо-западном шельфе (СЗШ) Черного моря (см. рис. 7, б)

концентрация нитратов существенно выше, чем в глубоководной части моря, что связано с постоянным притоком, вызванным стоком рек, главным образом Дуная.

Поверхностное содержание фитопланктона в глубоководной части моря имеет основной максимум в конце зимы – начале весны (весеннее цветение), когда верхний слой моря насыщен питательными веществами и света становится достаточно для процессов фотосинтеза. Кроме того, небольшие максимумы наблюдаются в середине лета и в конце осени – начале зимы. Биомасса фитопланктона на СЗШ существенно выше, чем в открытой части моря. Её сезонный ход имеет основной максимум летом в июле, сразу за максимумом в концентрации медузы *A. aurita*, в результате цветения которой резко падает популяция зоопланктона, и пищевая нагрузка на фитопланктон ослабевает. Концентрация же питательных веществ на СЗШ остается достаточно высокой в течение всего года, а освещенность поверхности моря солнечным светом максимальна в летний сезон.

Концентрация зоопланктона в поверхностном слое глубоководной части Черного моря (см. рис. 7, д) достигает максимума в марте – апреле, как отклик на весеннее цветение фитопланктона. Затем его биомасса падает, что вызвано резким увеличением в мае популяции медузы *A. aurita* и гребневика *M. leidyi*, которые питаются зоопланктоном. Максимум концентрации *A. aurita* достигается в мае, и затем – в конце осени. На мелководье её биомасса выше примерно в пять раз, чем в глубоководной части бассейна с максимумом в середине летнего сезона. *M. leidyi* также имеет два максимума в своем развитии: в мае и в конце лета. На шельфе же второй летний максимум становится основным.

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. В глубоководной части Черного моря нитраты в поверхностный слой поступают, в основном, во время интенсивного зимнего перемешивания из нижележащих слоев с высоким их содержанием. Количество нитратов 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. 8 приведены значения зимнего максимума нитратов в поверхностном слое глубоководной части Черного моря вместе с зимней температурой поверхности моря.

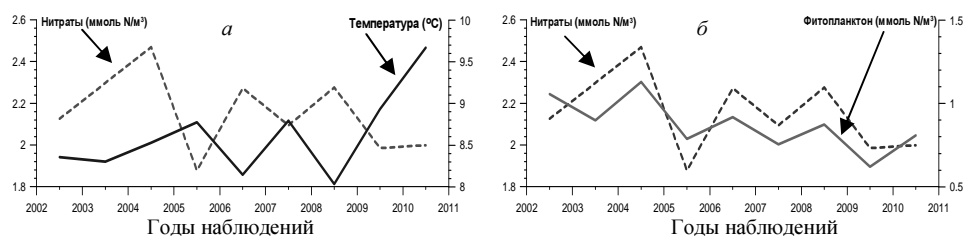


Рис. 8. Временная эволюция среднезимних значений поверхностной температуры и январских значений максимума концентрации нитратов в поверхностном слое (ммольN/м³) – (а). Значения максимума концентрации нитратов и весеннего максимума фитопланктона (ммольN/м³) – (б).

Низкие значения поверхностной температуры хорошо коррелируют с высокими концентрациями нитратов в зимний период. Соответственно с зимним содержанием нитратов в поверхностном слое хорошо коррелирует интенсивность весеннего цветения фитопланктона.

Примеры пространственного распределения нитратов и фитопланктона представлены на рис. 9. Максимальные значения концентрации нитратов в поверхностном слое Черного моря наблюдаются на СЗШ. Это вызвано поступлением большого количества биогенов с дунайскими водами. Повышенное содержание нитратов наблюдается также вдоль западного берега и Анатолийского побережья, что вызвано циклонической циркуляцией в Черном море.

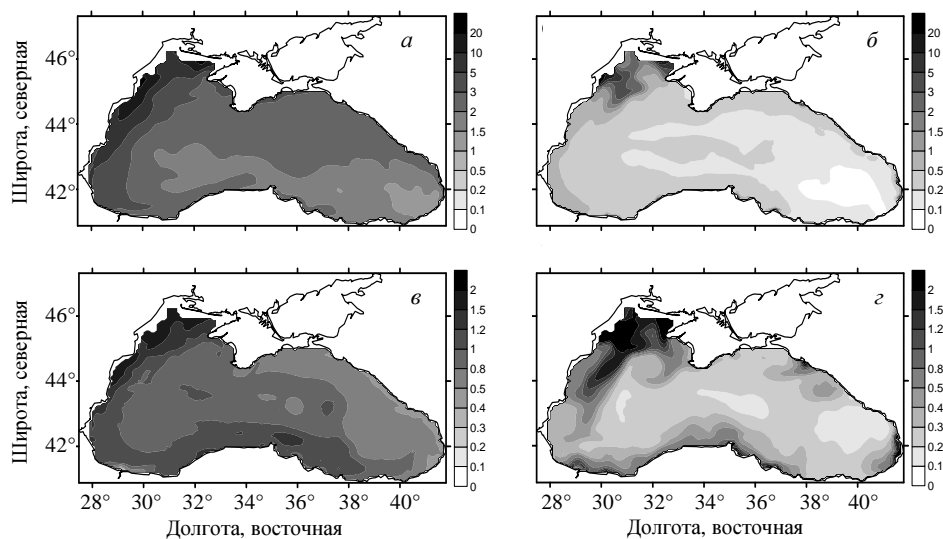


Рис. 9. Карты распределения поверхностных концентраций нитратов (*a*, *б*) и фитопланктона (*в*, *г*) для 2004 г. ($\text{ммольN}/\text{м}^3$): *a*, *в* – соответствуют январскому распределению нитратов и мартовскому распределению фитопланктона; *б*, *г* – соответствуют распределениям этих величин в июле.

В глубоководной части моря в зимнее время наблюдаются высокие концентрации нитратов по всей поверхности моря. Летом высокие значения в поверхностном слое присутствуют только на северо-западном шельфе. Пространственное распределение фитопланктона также показывает наибольшие значения на СЗШ, вдоль западного и южного берегов бассейна. Во время весеннего цветения биомасса фитопланктона достигает больших значений и во внутренней части бассейна. Летом же фитопланктон концентрируется, в основном, на шельфе и в местах впадения рек. Как проявление синоптической изменчивости на летней карте виден процесс переноса фитопланктона с северо-западного шельфа во внутреннюю область севастопольским антициклоном.

На рис. 10 представлены разрезы распределения нитратов в январе и в июле вдоль параллели $42,5^\circ$ с.ш. Хорошо виден слой максимума нитратов с центром на глубине примерно 70 м. В зимнее время высокие значения нитратов доходят до поверхности, при этом, верхний нитроклин оказывается

размытым. В летнее время поверхностная концентрация нитратов низкая, отчетливо проявляются верхний и нижний нитроклины.

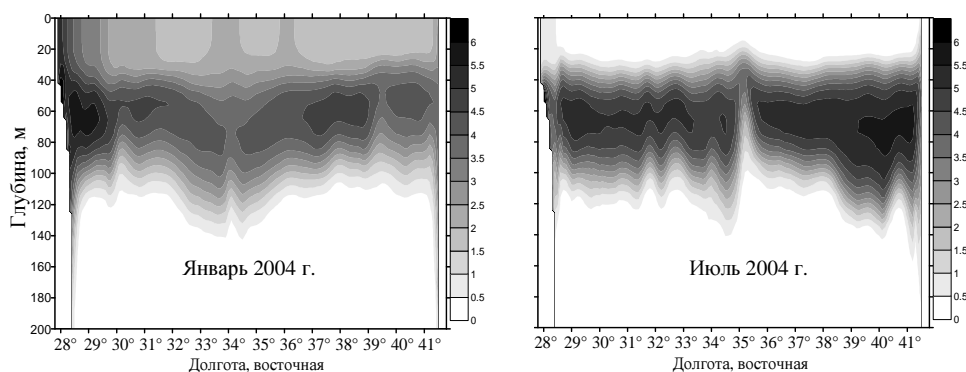


Рис. 10. Распределение нитратов по параллели 42,5° с.ш.

Рис. 11 демонстрирует такие же сечения для распределения концентрации фитопланктона в марте во время весеннего цветения и в июле. В марте максимальные значения наблюдаются у поверхности моря. Концентрация фитопланктона примерно постоянна до глубины около 20 м, затем она падает. Высокие значения наблюдаются не только возле СЗШ, но и в центре бассейна. В летнее время биомасса фитопланктона в поверхностном слое довольно низка, что вызвано малым содержанием в этом слое питательных веществ. Максимум фитопланктона находится на глубине примерно тридцати метров. В этом слое концентрация нитратов уже значительна, и, кроме того, в летнее время на эту глубину проникает достаточно солнечного света для процессов фотосинтеза.

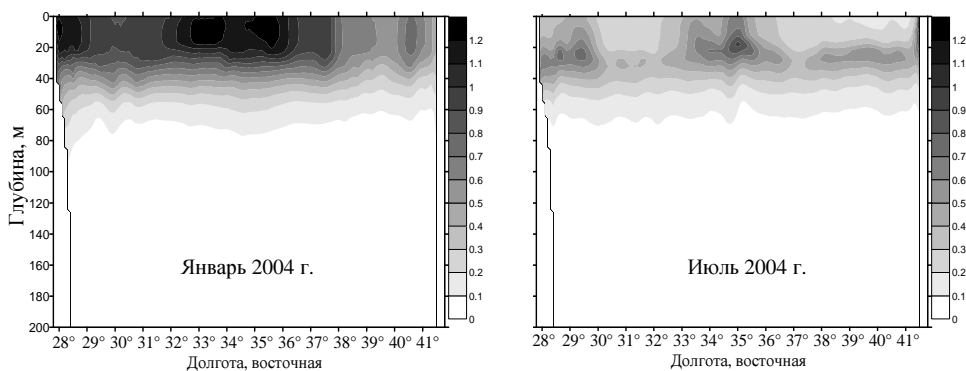


Рис. 11. Распределение фитопланктона по параллели 42,5° с.ш.

Заключение. Проведенные расчеты эволюции экосистемы Черного моря являются дополнением к работе, выполненной ранее. Таким образом, получены непрерывные поля биогеохимических полей Черного моря для периода времени в сорок лет. Последние десять лет этого промежутка времени, которым посвящена данная работа, характеризуются общим потеплением в регионе Черного моря, что проявилось как в спутниковых данных, так и в результатах моделирования. Одним из результатов этого потепления стала деградация холодного перемешанного слоя, полученная

по результатам моделирования. Откликом экосистемы на повышение температуры в зимнее время стало то, что в поверхностный слой моря в глубоководной части бассейна поступает меньше питательных веществ из глубоких слоев, богатых нитратами. В результате уменьшается первичная продукция и, как результат становится меньше биомасса остальных компонентов системы.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта «MyO2» – *My Ocean2* (GA № 283367) ЕС FP7/2007-2013.

Авторы благодарят С.В. Станичного, любезно предоставившего необходимые спутниковые данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорофеев В.Л., Кортаев Г.К., Сухих Л.И.* Моделирование эволюции экосистемы Черного моря в течение трех декад (1971 – 2001) // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 3. – С. 61-74.
2. *Дорофеев В.Л., Кортаев Г.К., Сухих Л.И.* Моделирование долговременной изменчивости экосистемы Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2011. – Вып. 24. – С. 116-126.
3. *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 солёности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – Вып. 16. – С. 243-265.
4. *Шокуров М. В.* Мезомасштабное моделирование атмосферы в Черноморском регионе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2011. – № 25, том 2. – С. 91-117.
5. *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. – Vol. 46, № 1. – P. 597-636.
6. *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. – Vol. 14, № 4. – P. 1331-1352.
7. *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 // *Journal Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106, № C3. – P. 4543-4564.
8. *Ludwig W.* River runoff and nutrient load data synthesis for hindcasting simulations // Deliverable 4.3.2, SESAME project.

Материал поступил в редакцию 12.11.2012 г.

АНОТАЦІЯ На основі розрахунків за допомогою тривимірної міждисциплінарної моделі аналізується еволюція екосистеми Чорного моря впродовж дев'яти років першої декади 21-го сторіччя. Ця робота є доповненням до попередніх досліджень динаміки екосистеми Чорного моря з 1971 по 2001 роки. Перше десятиліття 2000-х характеризується загальним потеплінням в регіоні, що проявляється в підвищенні середньорічної і середнєзимої температури поверхні моря і в зменшенні холодозапасу і товщини холодного проміжного шару. В роботі вивчається відгук нижніх рівнів харчового ланцюга морської екосистеми на ці зміни клімату.

ABSTRACT The Black Sea ecosystem evolution during nine years of the first decade of the 21st century is analyzing on the basis of calculations carried out by the three-dimensional interdisciplinary model. This work is an addition to previous studies of the Black Sea ecosystem dynamic from 1971 to 2001. The first decade of the 2000s is characterized by a general warming in the region, which is pronounced in the form of elevation of annual- and winter-mean sea surface temperature and decrease in cold content and thickness of the Cold Intermediate Layer. We study the response of the lower levels of the food chain of the marine ecosystem to these changes in climate.