

Математическое моделирование морских систем

УДК 511.46

Т. Огуз, В.Л. Дорофеев, Г. К. Коротаев

Моделирование экосистемы Черного моря

Изучается сезонная изменчивость экосистемы Черного моря на основе трехмерной физико-биогеохимической модели. Физическая часть модели представляет собой модель циркуляции Черного моря с высоким пространственным разрешением, которая описывает как крупномасштабную циркуляцию бассейна, так и мезомасштабные вихри. За основу экологического модуля модели взята обобщенная для трехмерного случая версия использовавшейся ранее одномерной модели. Она включает две компоненты фитопланктона, две размерные группы зоопланктона, бактерии, растворенное и взвешенное органическое вещество, совместно описываемые нитраты и нитриты, аммоний. Использование в качестве основы вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря позволило качественно воспроизводить процессы вертикального вовлечения в верхний слой богатых биогенами глубинных вод моря и трансфронтальный перенос прибрежных вод в открытую часть моря. Проведенные численные эксперименты показали также, что модель реалистично воспроизводит сезонную динамику распределения фитопланктона в Черном море. Кроме того, модель воспроизводит пространственную структуру биогеохимических переменных состояния, связанную с мезомасштабными чертами циркуляции.

В условиях ограниченных возможностей организации непрерывных и многофакторных наблюдений биогеохимических процессов, также как и непрерывного мониторинга морской динамики, потенциально существенная роль отводится моделям экосистемы Черного моря. Численные модели экосистемы, объединенные с моделью морской динамики, должны позволить интерполировать и экстраполировать в пространстве и времени регулярные спутниковые наблюдения цвета моря и отрывочные биогеохимические контактные наблюдения, а также непрерывно восстанавливать ряд непосредственно не измеряемых переменных. Однако построение математической модели, позволяющей количественно описывать декадную изменчивость экосистемы Черного моря, является чрезвычайно сложной задачей. Экосистема Черного моря в последние 30 – 40 лет претерпела существенную трансформацию, связанную с климатическими изменениями и антропогенным воздействием. Поэтому модель, используемая для непрерывного мониторинга экосистемы, должна правильно воспроизводить многообразные и сложные взаимодействия между различными видами или группами видов, играющих разную роль на различных стадиях эволюции экосистемы.

Эксперименты по моделированию экосистемы Черного моря начались достаточно давно и описаны в работах Виноградова с соавторами [1, 2] и

© Т. Огуз, В.Л. Дорофеев, Г. К. Коротаев, 2007

Беляева с коллегами [3, 4]. Разного рода модели были представлены в работах [5, 6]. Модели экосистемы основаны главным образом на азотном цикле. В силу этого все переменные выражаются в эквивалентной концентрации азота, а уравнения, описывающие эволюцию экосистемы, отражают баланс азота при переходе из одной формы в другую. Однако наибольшие успехи в последнее время были достигнуты в работах [7 – 10]. Исходной в этих исследованиях являлась одномерная модель экосистемы, воспроизводящая вертикальные распределения полей и учитывающая пять различных составляющих. Затем эта модель была усложнена и применена для описания азотного цикла, динамики кислорода и окислительно-восстановительных реакций на границе сероводородного слоя [8, 9]. В итоге авторами работ [7 – 10] была разработана довольно сложная единая модель экосистемы, описывающая пелагическую пищевую цепь и окислительно-восстановительные реакции.

Пищевая цепь модели состоит из двух групп фитопланктона (диатомовые и флагелляты), двух размерных групп зоопланктона (микрозоопланктон и мезозоопланктон), гетеротрофного бактериопланктона, медузы *Aurelia aurita* и всеядной динофлагелляты *Noctiluca scintillans*. Предложенная структура пищевой цепи увязывается через потоки взвешенного и растворенного вещества с органическими и неорганическими (нитраты плюс нитриты и аммоний) формами растворенного азота. Этот блок связан с моделью кислорода и окислительно-восстановительной динамикой посредством набора уравнений, описывающих взаимодействие кислорода, азота, серы и соединений марганца. Основными переменными состояниями модели окислительно-восстановительных процессов являются сероводород, молекулярная сера, растворенный кислород, растворенный и взвешенный марганец. Растворенный кислород окисляет взвешенную органику, сероводород, аммоний и поступающий из глубинных слоев растворенный марганец. В бедных кислородом водах растворенный оксид марганца вступает в реакцию с нитратами с выпадением в осадок взвешенного оксида марганца и выделением газообразного азота. Сероводород и аммоний затем окисляются взвешенным оксидом марганца, образуя серу, газообразный азот и растворенный марганец. Сера сульфатов превращается бактериями в сероводород, газообразный азот поступает в атмосферу, а растворенный марганец вновь окисляется нитратами.

В работах [7 – 9] выполнен ряд численных экспериментов с использованием одномерной версии этой модели. В этих экспериментах основное внимание уделялось исследованию влияния антропогенного воздействия на экосистему Черного моря. В расчетах показано, как возрастание поступлений биогенных элементов со стоком рек и давление на пищевую цепь со стороны привнесенных видов приводят к изменениям функционирования экосистемы и ее трансформации от здорового состояния, наблюдавшегося в 60-е годы, до эвтрофизированного состояния конца 80-х годов прошлого века. В 60-е годы наблюдалась относительно невысокая концентрация фитопланктона, что соответствовало высокой прозрачности воды. Связанное с увеличением применения удобрений в сельском хозяйстве

возрастание поступления биогенных элементов со стоком рек в начале 70-х годов и быстрый рост популяции медузы *Aurelia aurita*, как показывают расчеты, привели к практически непрерывному цветению фитопланктона в течение года и существенному сокращению биомассы микро- и мезозoopланктона [10]. Основное цветение происходит в конце зимы – начале весны как следствие поступления биогенов в поверхностные воды в результате зимнего перемешивания. Два последующих и более длительных периода цветения наблюдаются в конце весны – начале лета и осенью. Цветение фитопланктона ранней весной сопровождается, с некоторым сдвигом во времени, цветением мезозoopланктона, приводящего к сокращению биомассы фитопланктона до довольно низких значений, а затем развитием медузы *Aurelia aurita*, сокращающей аналогичным образом численность зоопланктона. Фитопланктон восстанавливается поздней весной, что вызывает постоянный рост биомассы *Noctiluca scintillans* до середины лета. Популяция *Aurelia aurita* сокращается в августе, что обуславливает осеннее цветение, выражающееся в росте мезозoopланктона, затем фитопланктона с последующим нарастанием биомассы *Noctiluca scintillans* и *Aurelia aurita*.

Появление в бассейне Черного моря *Mnemiopsis leidyi* привело к проявлению еще более ярко выраженных и долго длящихся периодов цветения фитопланктона. Объяснение такого явления кроется в значительно более интенсивном регулировании экосистемы на верхних уровнях трофической цепи. В результате в сезонном ходе биомассы фитопланктона наблюдаются три последовательных максимума зимой, весной и летом. Интенсивное зимнее цветение фитопланктона является новым элементом годового хода его биомассы, появившимся после вторжения *Mnemiopsis leidyi*. Влияние *Mnemiopsis leidyi* заключается в подавлении развития микрзоопланктона и *Noctiluca scintillans* в конце осени. В отсутствии ограничений в развитии фитопланктона, связанном с потреблением зоопланктоном, его цветение начинается уже в начале января, раньше, чем в отсутствии *Mnemiopsis leidyi*. Зимнее цветение фитопланктона такой интенсивности наблюдалось с начала 90-х годов прошлого столетия и отмечено в спутниковых и корабельных наблюдениях в течение первой половины десятилетия [10]. Два других пика цветения фитопланктона представляют собой модификацию наблюдавшихся ранее пиков поздней весны – начала лета и осени.

Почти непрерывная продукция взвешенного органического вещества в течение годового цикла биологической активности поддерживает циркуляцию азота в пределах верхнего 75-метрового слоя моря. Здесь же растворенный кислород, поступающий в результате взаимодействия моря с атмосферой и фотосинтеза, потребляется при разложении взвешенного вещества.

Более глубокий слой не вентилируется даже в условиях чрезвычайно холодной зимы из-за высокой устойчивости плотностной стратификации Черного моря. В силу этого модель [9] воспроизводит квазиравновесное распределение химических характеристик в окрестности верхней границы сероводородного слоя. Наиболее важными процессами, поддерживающими

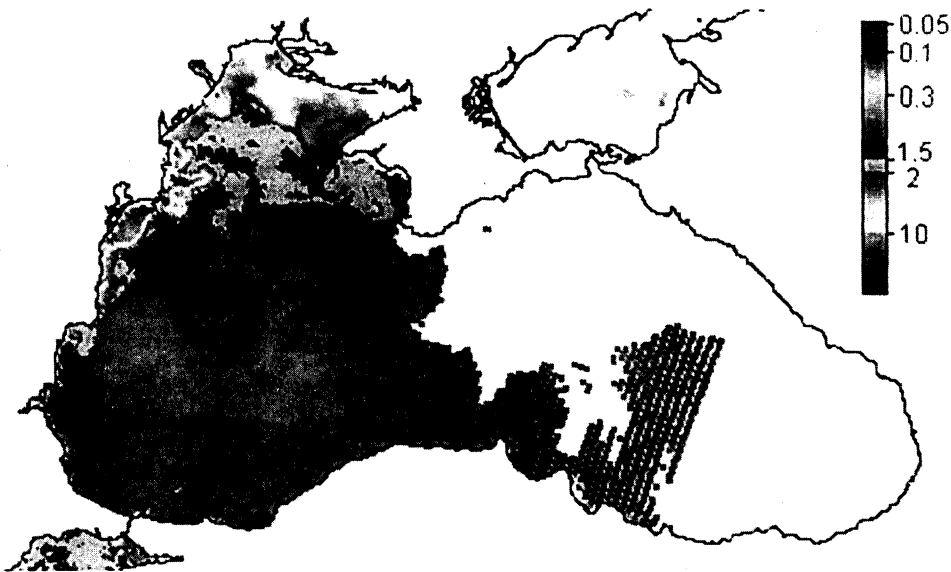
структуру переходной зоны, являются направленный в глубину поток нитратов из зоны нитроклина и направленный вверх перенос растворенного марганца из анаэробного слоя.

Общее качественное соответствие модельных вертикальных распределений биогеохимических параметров и их сезонной эволюции данным наблюдений позволяет считать, что модель, предложенная в работах [7 – 10], может использоваться в качестве основы для создания системы оперативного мониторинга состояния экосистемы Черного моря. Однако особенности динамики бассейна и интенсивная синоптическая изменчивость, несомненно, влияют на биогеохимические процессы. Важным процессом является перенос течениями богатых биогенными элементами вод северо-западного шельфа моря. На изображениях Черного моря, полученных цветовым сканером *SeaWiFS*, отчетливо видно (рис. 1), как перенос продуктивных вод вдоль западного берега моря поддерживает повышенные концентрации хлорофилла вблизи Анатолийского побережья.



Р и с. 1. Изображение Черного моря, полученное со спутника цветовым сканером *SeaWiFS*, иллюстрирует то, что перенос продуктивных вод вдоль западного берега моря поддерживает повышенные концентрации хлорофилла вблизи Анатолийского побережья

Влияние синоптических процессов также отражено на снимках цветовых сканеров, где неоднородности в распределении цвета моря, связанные с изменениями продуктивности вод бассейна, обусловлены синоптическими вихрями, меандрами Основного Черноморского течения и филаментами, формирующимися в процессе трансфронтального переноса (рис. 2). Трансфронтальный перенос в целом обуславливает поступление богатых биогенами вод из прибрежной зоны в открытую часть моря и тем самым, наряду с процессами, развивающимися по вертикали, участвует в поддержании и развитии продуктивности в открытой части моря.



Р и с. 2. Влияние синоптических процессов, видимое на снимке цветового сканера *SeaWiFS*

Таким образом, учесть все детали эволюции экосистемы возможно только в рамках трехмерной междисциплинарной модели морской динамики и экосистемы. В настоящее время совместными усилиями специалистов МГИ НАН Украины и Института морских наук (*IMS METU*, Турция) реализована трехмерная модель экосистемы Черного моря. Циркуляция и термодинамика Черного моря рассчитываются на основе численной вихреразрешающей модели общей циркуляции, реализованной в работах [11, 12]. Исходные уравнения модели, записанные в форме Громеки – Лемба в декартовой системе координат с осями X , Y , Z , направленными на восток, север и вертикально вниз соответственно, имеют следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - (\xi + f)v + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(P+E)}{\partial x} - \nu_H \Delta^2 u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\xi + f)u + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(P+E)}{\partial y} - \nu_H \Delta^2 v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\partial P / \partial z = g\rho, \quad P = g\rho_0 \zeta + g \int_0^z \rho dz, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = K_H \nabla^2 T + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} + \frac{\partial(wS)}{\partial z} = K_H \nabla^2 S + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S). \quad (7)$$

В уравнениях (1) – (7) введены следующие обозначения: u, v, w – проекции скорости течения на оси X, Y и Z соответственно; $\xi = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ – вертикальная составляющая вектора вихря скорости; $E = \rho_0(u^2 + v^2) / 2$; T, S и P – температура, соленость и давление соответственно; f – параметр Кориолиса, g – ускорение свободного падения; ν_V и ν_H – коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной вязкости; K_V, K_H – коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии; ρ – плотность морской воды; ρ_0 – средняя плотность; ζ – возвышение свободной поверхности.

Численное интегрирование системы уравнений (1) – (7) проводится со следующими граничными условиями:

на морской поверхности ($z = 0$):

$$\nu_V \partial u / \partial z = -\tau^X, \quad \nu_V \partial v / \partial z = -\tau^Y, \quad w = -\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{PR - EV}{\rho_w}, \quad (8)$$

$$K_V \partial T / \partial z = Q^T, \quad K_V \partial S / \partial z = (PR - EV) S_0;$$

на дне ($z = H(x, y)$):

$$u = v = w = 0, \quad \partial T / \partial z = \partial S / \partial z = 0; \quad (9)$$

на твердых границах:

$$u_n = \partial v / \partial l = \partial^3 v / \partial l^3 = 0, \quad \partial T / \partial n = \partial S / \partial n = 0; \quad (10)$$

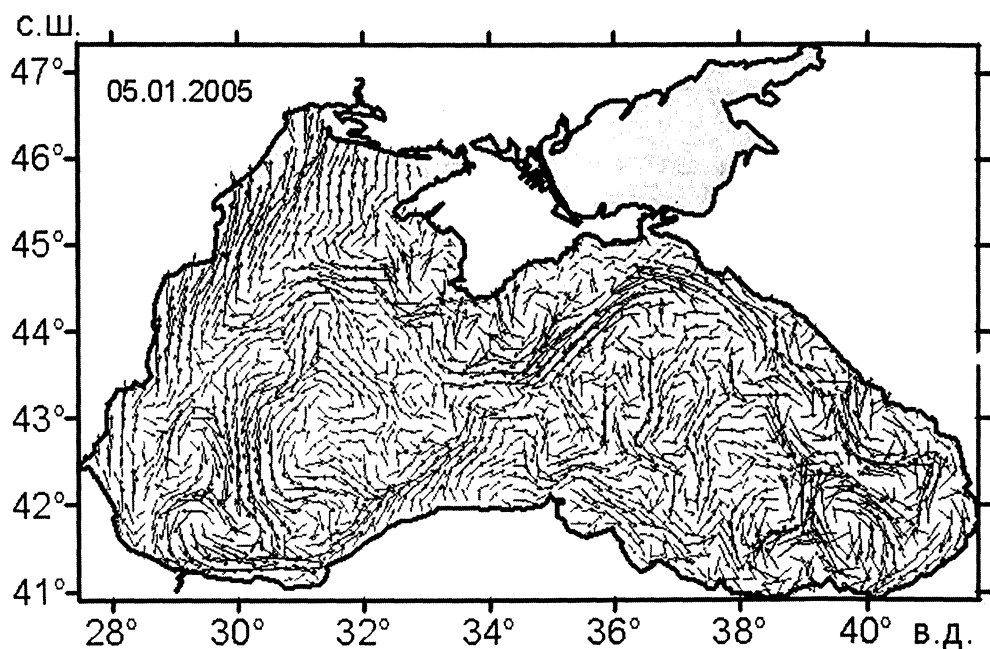
в устьях рек и проливов:

$$u_n = u_r, \quad T = T_\Pi, \quad S = S_\Pi. \quad (11)$$

При постановке граничных условий введены следующие обозначения: (τ^X, τ^Y) – вектор тангенциального напряжения трения ветра, Q – поток тепла, PR – осадки и EV – испарение на поверхности моря, T_Π и S_Π – известные из наблюдений значения температуры и солености в устьях рек или проливах. В рассматриваемой модели используются заданные наперед коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии. Их значения и профили изменения с глубиной коэффициентов вертикальной диффузии и вязкости чрезвычайно важ-

ны для правильного описания вовлечения богатых биогенами глубинных вод в верхний слой моря. В этой связи коэффициенты вертикальной диффузии и вязкости задавались сезонно меняющимися во времени в соответствии с расчетами по одномерной модели Мелора – Ямады.

Модель общей циркуляции вод Черного моря реализована на сетке 5×5 км, что позволяет хорошо описывать общую циркуляцию вод и мезомасштабные особенности морских течений. На рис. 3 приведен пример карты поверхностных течений, рассчитанных по модели динамики Черного моря. На этом рисунке видно положение Основного Черноморского течения, его меандры и вихревые структуры, располагающиеся вдоль побережья. Таким образом, рассчитываемые поля течений воспроизводят необходимые подробности синоптической изменчивости, обеспечивающей трансфронтальный перенос прибрежных вод в открытую часть моря.

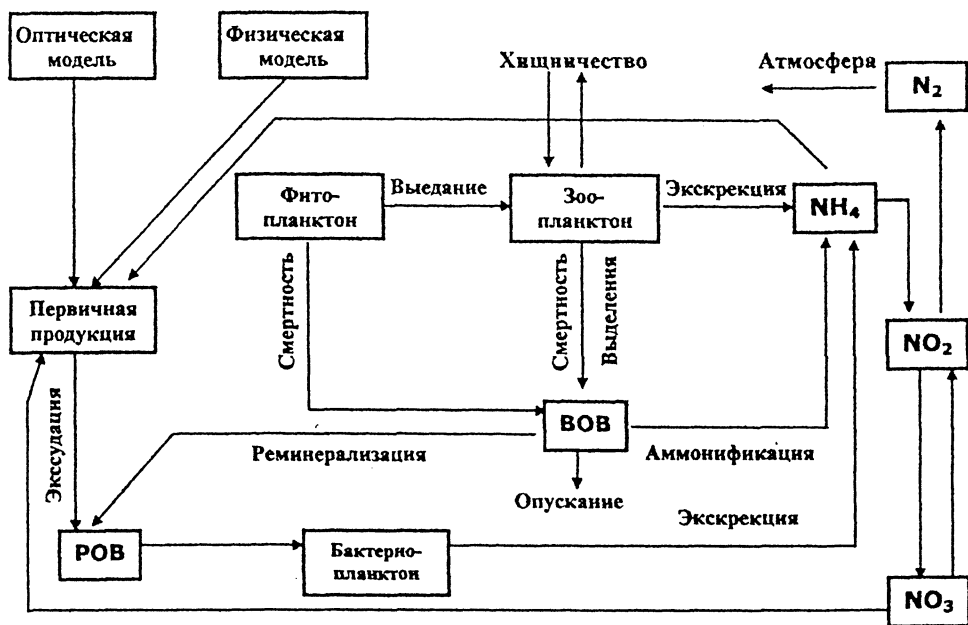


Р и с. 3. Пример карты поверхностных течений, рассчитанных по модели циркуляции Черного моря

Учитывая современное относительно благополучное состояние экосистемы Черного моря, за основу экологического модуля модели взята упрощенная версия одномерной модели [7]. Она включает два компонента фитопланктона, две размерные группы зоопланктона, бактерии, растворенное и взвешенное органическое вещество, совместно описываемые нитраты и нитриты, а также аммоний. Модель предполагается использовать для мониторинга экосистемы Черного моря. Учитывая, что экосистема Черного моря начиная с середины 90-х годов прошлого столетия претерпела позитивные изменения, сказавшиеся в существенном сокращении влияния оппортунистических видов, а также то, что окислительно-восстановительные

реакции не являются критически важными для описания пищевой цепи в верхнем слое моря, предложенная модель представляется разумным компромиссом.

Изменение во времени составляющих экосистемы описывается уравнениями переноса – диффузии, включающими в правую часть слагаемые типа источников – стоков. Вид этих слагаемых представлен в работах [9, 10]. Источники и стоки так представлены в модели, чтобы было видно сохранение суммарного количества азота при взаимодействии каждой пары компонентов. В силу этого матрица, описывающая источники и стоки, является кососимметричной. Параметризация потоков азота при взаимодействии различных компонентов содержит некие размерные или безразмерные коэффициенты. Величины этих коэффициентов выбирались согласно работам [9, 10]. Отдельные коэффициенты являются функциями температуры и солености морской воды, концентрации кислорода и т.д. Схема взаимодействия между различными компонентами экосистемы представлена на рис. 4.



Р и с. 4. Схема взаимодействия между различными компонентами экологической модели (ВОВ – взвешенное органическое вещество, РОВ – растворенное органическое вещество)

В настоящее время модель экосистемы реализована совместно с вихреразрешающей моделью циркуляции на сетке с шагом в 5 км. В качестве начальных условий в модели экосистемы задавалось равномерное по глубине распределение нитратов и малые ненулевые начальные распределения остальных характеристик. На поверхности моря задавались нулевые потоки всех характеристик, на глубине 120 м, примерно соответствующей среднему положению верхней границы сероводородного слоя, все величины

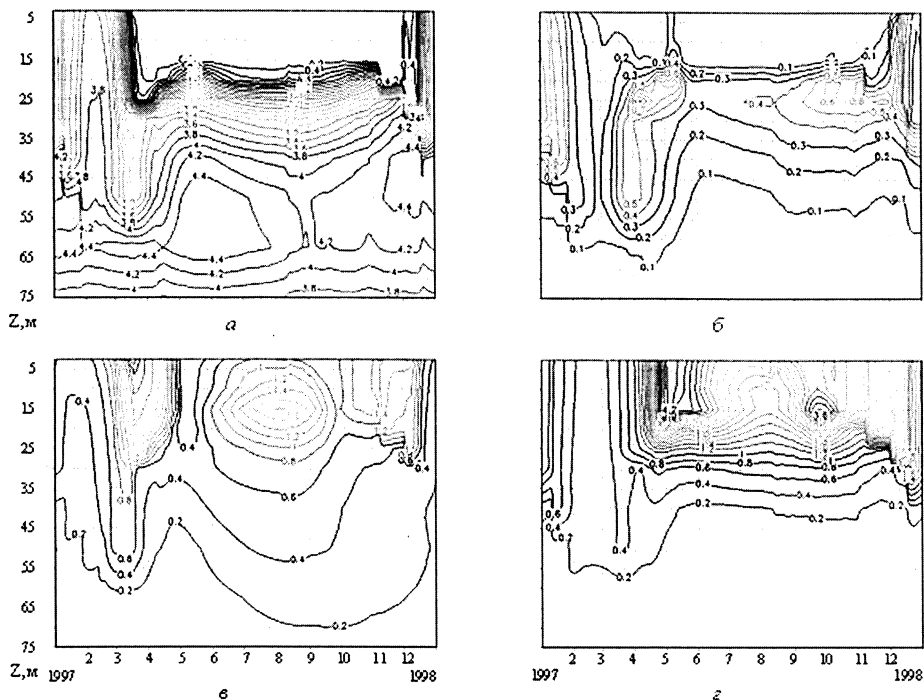
полагались равными нулю. В устьях Дуная, Днепра и Днестра задавались потоки биогенов, пропорциональные интенсивности речного стока. Коэффициент пропорциональности выбирался в соответствии с данными работы [13]. Приток биогенов в основном компенсировался диффузионным потоком на верхней границе сероводородного слоя. Однако поскольку уже на второй год интегрирования параметры экосистемы выходят на периодический режим, анализируется только третий год расчетов. При этом суммарная концентрация нитратов имеет слабый положительный тренд. Проведены только прогностические расчеты, но высокое пространственное разрешение модели позволяет описывать такие важные для экосистемы динамические процессы как неустойчивость Основного Черноморского течения, его меандрирование и циклогенез.

Обсудим некоторые результаты расчетов годового хода характеристик экосистемы. Остановимся, прежде всего, на временной эволюции осредненных по горизонтам концентраций фито- и зоопланктона, нитратов и аммония. На рис. 5, а, б приведены диаграммы, показывающие эволюцию во времени концентраций нитратов и аммония, являющихся основой функционирования экосистемы. Распределение нитратов характеризуется максимумом на глубине около 60 м, наблюдающимся в течение всего года и моделирующим природный нитроклин. Максимальные концентрации нитратов по величине примерно соответствуют натурным данным. В верхних слоях моря наблюдается заметный сезонный ход. Зимой, в период конвективного перемешивания верхнего слоя моря, начиная с середины декабря и до середины марта нитраты практически равномерно распределены до глубин 30 – 60 м. Величины концентрации нитратов на поверхности моря при этом максимальны. Однако с середины марта и до середины декабря концентрация нитратов в пределах верхнего перемешанного слоя моря близка к нулю. С глубиной происходит нарастание их концентрации вплоть до максимального значения на глубине около 60 м.

Вертикальная структура распределения аммония подвержена значительным сезонным изменениям. В зимние месяцы, с середины декабря до середины марта, концентрация аммония довольно равномерно распределена в пределах верхнего квазиоднородного слоя моря, слегка возрастающая с глубиной. В остальное время года содержание аммония в пределах перемешанного слоя незначительно, однако в пределах сезонного термоклина формируется максимум его концентрации, существующий непрерывно с начала апреля и до начала декабря.

Сезонный ход концентраций нитратов и аммония неразрывно связан с развитием фитопланктона. В течение года наблюдается три максимума развития фитопланктона (рис. 5, в). Первый период, наиболее интенсивный, наблюдается в марте, когда верхний перемешанный слой насыщен биогенными элементами и условия освещенности становятся благоприятными для фотосинтеза. В этот период цветения наивысшая концентрация фитопланктона наблюдается на поверхности моря. Бурное цветение фитопланктона обуславливает высокое потребление биогенных элементов, поступивших в перемешанный слой благодаря зимней конвекции и вовлечению вод, обогащенных нитратами и аммонием. В результате

повышенного потребления концентрация биогенов ко второй половине марта сокращается до незначительных величин, а фитопланктон сам потребляется зоопланктоном, концентрация которого достигает своего максимального значения спустя полтора месяца после бурного цветения фитопланктона (рис.5,з).

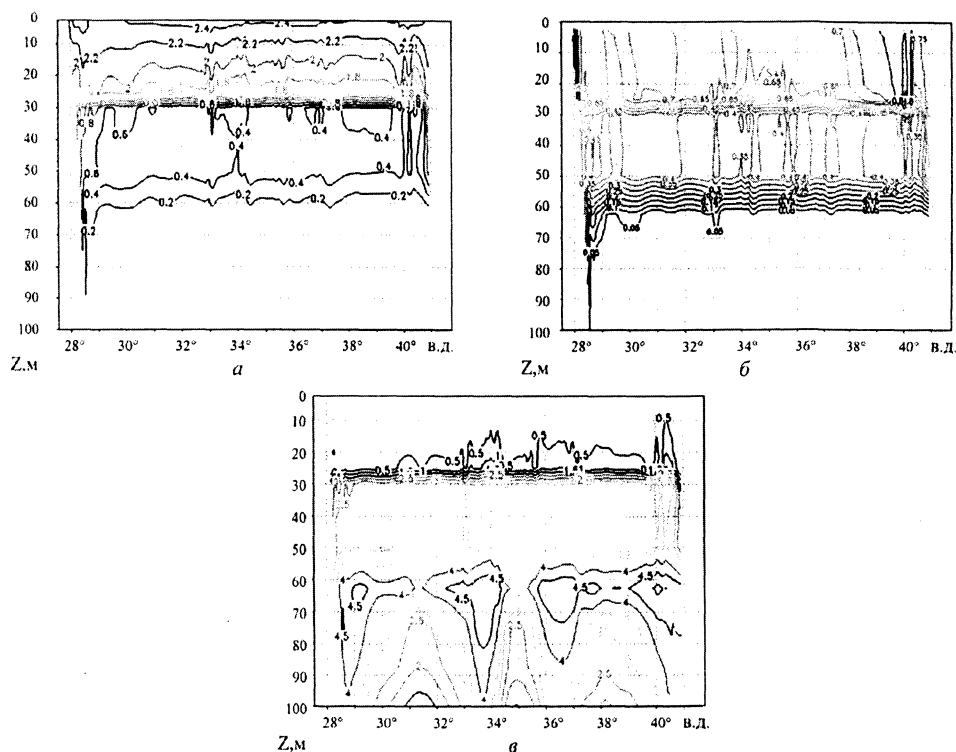


Р и с. 5. Диаграммы эволюции во времени средних по горизонтам концентраций (ммоль N/м³) нитратов (а), аммония (б), суммарного фитопланктона (в) и суммарного зоопланктона (з)

Второй максимум фитопланктона наблюдается в июне – сентябре с наибольшими концентрациями в конце июля – начале августа. Интенсивность летне-осеннего максимума на поверхности моря оказывается меньшей в три раза по сравнению с зимне-весенним цветением. Однако с глубиной концентрация фитопланктона увеличивается, достигая максимального значения на верхней границе термоклина. В результате увеличения концентрации фитопланктона увеличивается кормовая база зоопланктона, что приводит к его интенсивному развитию во второй половине сентября. Характерно, что максимальные концентрации зоопланктона также привязаны к верхней границе термоклина.

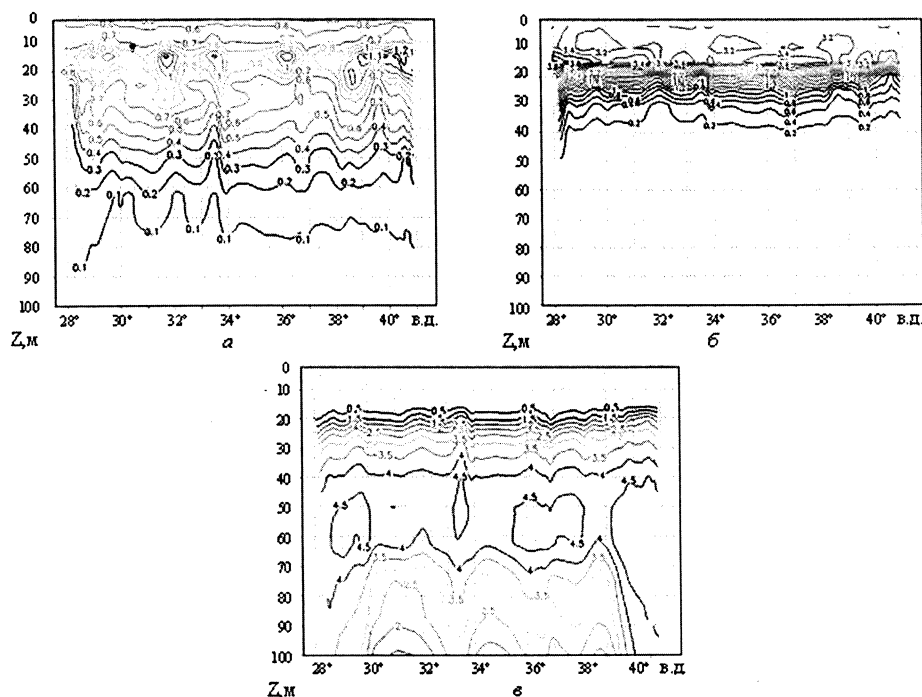
В конце ноября – начале декабря наблюдается еще один короткий период цветения фитопланктона, связанный с вовлечением в поверхностный слой биогенов в результате увеличения глубины конвективного перемешивания. Однако ввиду синхронного возрастания биомассы зоопланктона и неблагоприятных световых условий он достаточно быстро заканчивается.

Пространственная характеристика распределения параметров экосистемы представлена на разрезах вдоль 43° с.ш. для двух периодов цветения фитопланктона. На рис. 6, а, б, в приведены разрезы распределений концентраций фитопланктона, зоопланктона и нитратов для периода весеннего цветения. Характерной особенностью этого периода является относительно однородное по горизонтали развитие процессов. Это указывает, что основным механизмом развития цветения по всей поверхности моря является вовлечение биогенных элементов в верхний перемешанный слой в результате зимней конвекции. Однородности пространственного распределения характеристик экосистемы способствует также структура зимней черноморской циркуляции с явно выраженным Основным Черноморским течением и относительно низкой интенсивностью циклогенеза.

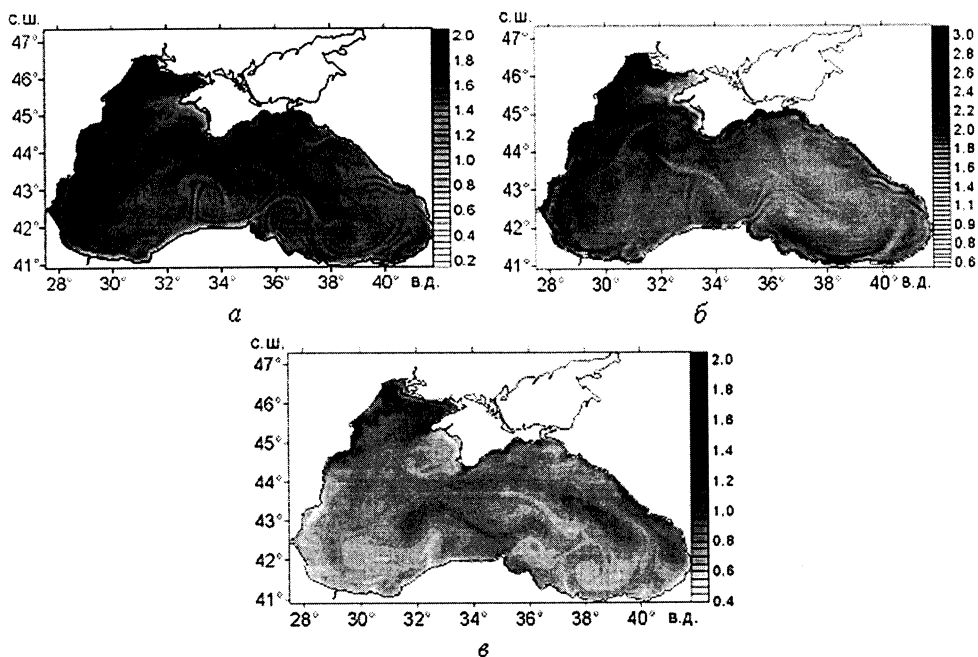


Р и с. 6. Разрезы вдоль 43° с.ш. распределений концентраций (ммоль N/m³) суммарного фитопланктона (а), суммарного зоопланктона (б) и нитратов (в) для периода весеннего цветения

В период летнего максимума пространственное распределение параметров экосистемы становится значительно более неоднородным, что объясняется повышенной вихревой активностью в этот сезон (рис. 7, а, б, в). По-видимому, повышается и роль трансфронтального переноса биогенных элементов из прибрежных районов в открытое море.



Р и с. 7. Разрезы вдоль 43° с.ш. распределений концентраций (ммоль N/м³) суммарного фитопланктона (а), суммарного зоопланктона (б) и нитратов (в) для периода летнего максимума фитопланктона



Р и с. 8. Распределение концентрации (ммоль N/м³) поверхностного фитопланктона 11 марта в начале периода весеннего цветения (а), 23 марта в пик весеннего цветения (б) и в начале летнего максимума (в)

Характерные распределения концентрации фитопланктона на поверхности моря представлены на рис. 8, а, б, в. На рис. 8, а показано распределение концентрации фитопланктона 11 марта в начале периода весеннего цветения. В это время повышенная биопродуктивность наблюдается в районе северо-западного шельфа и вдоль западного побережья Черного моря, что связано с речным выносом биогенных элементов. К 23 марта (рис. 8, б) цветение охватывает уже все море, хотя наивысшие концентрации фитопланктона по-прежнему наблюдаются в районе северо-западного шельфа моря. В начале летнего цветения (рис. 8, в) перепад в интенсивности развития фитопланктона в открытом море и на северо-западном шельфе уже не столь значителен. На рис. 8 видны также следы влияния синоптических вихрей на цветение планктона.

Выводы. В настоящей работе одномерная модель экосистемы Черного моря, показавшая высокую эффективность при анализе различных этапов эволюции экосистемы, обобщается для трехмерного случая. Использование в качестве основы вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря позволяет качественно верно воспроизводить как процессы вертикального вовлечения в верхний слой богатых биогенами глубинных вод моря, так и трансфронтальный перенос прибрежных вод в открытую часть моря. Как показывают наши расчеты, оба процесса важны для функционирования черноморской экосистемы. Сопоставление результатов моделирования экосистемы Черного моря с данными цветковых сканеров показывает их качественное соответствие, несмотря на то, что морская циркуляция и биогеохимические процессы описывались в прогностическом режиме. Таким образом, можно надеяться, что ассимиляция спутниковой информации в модели морской динамики и данных цветковых сканеров в модели экосистемы позволит осуществлять количественный мониторинг биогеохимии Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов М.Е.* Динамические модели пелагических экосистем // Модели океанических процессов / Под ред. М.Е. Виноградова, А.С. Монина, Д.Г. Сеидова. – М.: Наука, 1989. – С. 252 – 259.
2. *Shushkina E.A., Vinogradov M.E., Lebedeva L.P. et al.* Studies of structural parameters of planktonic communities of the open part of the Black Sea relevant to ecosystem modeling // Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea / Eds. L.I. Ivanov, T. Oguz. – Nowell Mass.: Kluwer Academic Publisher, 1998. – 1. – P. 311 – 326.
3. *Беляев В.И.* Моделирование морских систем. – Киев: Наук. думка, 1987. – 202 с.
4. *Беляев В.И., Совга Е.Е.* Математическая модель экосистемы сероводородной зоны Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1991. – № 6. – С. 42 – 53.
5. *Lyubartseva S.P., Lyubartsev V.G.* Modeling of the Black Sea anoxic zone processes // Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea / Eds. L.I. Ivanov, T. Oguz. – Nowell Mass.: Kluwer Academic Publisher, 1998. – 2. – P. 385 – 396.
6. *Любарцева С.П., Михайлова Э.Н., Шаниро Н.Б.* Экологическая трехмерная численная модель Черного моря. Сезонная эволюция эвфотической зоны // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 5. – С. 55 – 80.
7. *Oguz T., Ducklow H.W., Malanott-Rizzoli P. et al.* Simulation of annual plankton productivity cycle in the Black Sea by a one-dimensional physical-biochemical model // J. Geophys. Res. – 1996. – 101, № C7. – P. 16585 – 16599.

8. *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. – Pt 1, 46. – P. 597 – 636.
9. *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. Cycl.* – 2000. – 14, № 4. – P. 1331 – 1352.
10. *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, № С 3. – P. 4543 – 4564.
11. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163 – 231.
12. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном. – Севастополь, 1989. – 9 с.– (Препринт / АН УССР.МГИ).
13. Альтман Э.Н., Гершман И.Ф., Голубева З.А. Климатические поля солености и температуры воды Черного моря. – Севастополь: СО ГОИН, 1987. – 108 с.

Институт морских наук Ближневосточного
технического университета,
г. Эрдемли, Турция

Материал поступил
в редакцию 01.09.05
После доработки 07.10.05

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

ABSTRACT Seasonal variability of the Black Sea ecosystem is studied based on the three-dimensional coupled physical-biogeochemical model. Its physical part is based on the model of the Black Sea circulation with high spatial resolution describing both large-scale currents and meso-scale dynamics. The ecological module of the model is a version of the used before one-dimensional model generalized for a three-dimensional case. It consists of nine components and includes two groups of phytoplankton, two groups of zooplankton, bacteria, dissolved and particulate organic matter, jointly described nitrates and nitrites, ammonium. Use of the eddy-resolving model of the Black Sea circulation as a basis permits to reproduce both the processes of vertical involving of deep nitrate-rich waters to the upper layer and trans-frontal transport of shelf waters to the open part of the basin. The simulations also show that the model realistically reproduces seasonal dynamics of phytoplankton distribution in the Black Sea. Besides, the model sufficiently reproduces spatial structure of the biochemical variables related to the meso-scale circulation features.