



УДК 551.465

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

© В. А. Иванов, С. П. Любарцева, Э. Н. Михайлова, Н. Б. Шапиро

Морской гидрофизический институт Национальной Академии Наук Украины, Севастополь, Украина

*Поступила 12 марта 2003 г.*

Обсуждается наш опыт моделирования экосистемы Черного моря. Трехкомпонентная модель экосистемы (планктон, биоген, детрит) объединяется с трехмерной гидротермодинамической моделью для исследования причинно-следственных связей между вынуждающими физическими силами и биогеохимической изменчивостью в приустьевой зоне Дуная. С учетом механизма физического переноса, фотосинтеза, смертности планктона, оседания и реминерализации детрита решаются уравнения типа адвекция-диффузия-реакция. Чтобы изучить влияние метеорологических условий на состояние экосистемы, было проведено три численных эксперимента: при отсутствии ветра и слабом (5 м/с) северо-восточном и северо-западном ветре. Была разработана объединенная трехмерная крупномасштабная модель Черного моря, описывающая циркуляцию и азотный цикл. В качестве гидротермодинамического блока используется многослойная квази-изопикническая модель с верхним квазиоднородным слоем (ВКС). В качестве биогеохимического блока прилагается семикомпонентная (фитопланктон, зоопланктон, бактерии, растворенное органическое вещество, аммоний, нитраты, детрит) пелагическая модель. В качестве внешнего воздействия в модели задается среднемесячная изменчивость солнечной радиации, атмосферной циркуляции, стока рек, водообмена через Босфор и внешних источников нитратов. Рассчитывается типичный сезонный цикл в ВКС. Обсуждаются особенности полученных распределений.

**Ключевые слова:** экосистема, трехмерное численное моделирование, верхний квазиоднородный слой, азотный цикл, приустьевая зона Дуная, Черное море

Our experience of the Black Sea ecosystem modeling is discussed. The three-compartment (plankton, nutrient, detritus) ecosystem model is coupled with the three-dimensional hydrothermodynamic model to investigate causal-consequential relationships between physical forcing and biogeochemical variability in Danube's mouth zone. The advection-diffusion-reaction equations are solved to take into account physical transport, photosynthesis, plankton lost due to mortality, detritus sinking and remineralization. Three numeric experiments were carried out for study an influence of meteorological conditions on the ecosystem state, namely a wind absence and weak (5 m/s) north-eastern and northwestern wind. Spatial and temporal distributions of ecosystem state variables as well as their fluxes are analyzed. The 3D coupled basin scale model of the Black Sea circulation and nitrogen cycling is developed. The multi-layer quasi-isopycnical model with upper mixed layer (UML) is used as hydrothermodynamic block. The seven-compartment (phytoplankton, zooplankton, bacteria, dissolved organic matter, ammonium, nitrates, detritus) pelagic model is applied as biogeochemical block. Model is forced by monthly mean variability of solar radiation,

atmospheric circulation, river inflows, water exchange through the Bosphorus and external sources of nitrate. Typical seasonal cycle is simulated in UML. Features of the computed distributions are discussed.

**Key words:** ecosystem, 3D numerical modeling, upper mixed layer, nitrogen cycle, Danube's mouth zone, the Black Sea

Поиски приемлемого компромисса между усиливающейся индустриализацией и необходимостью сохранения ценных природных ресурсов стимулировали развитие экологических исследований в современной океанологии. Одним из относительно новых направлений этих исследований является математическое моделирование морских экосистем. По мере понимания места данного метода в исследовании структуры и поведения экосистем увеличивается не только число публикаций на эту тему, но и ее популярность.

Экологическое моделирование предполагает решение уравнения или системы уравнений класса адвекция-диффузия-реакция относительно компонент характеристического вектора экосистемы  $C^i$  с начальными и граничными условиями:

$$(C^i)_t + (uC^i)_x + (vC^i)_y + ((w+w')C^i)_z - (\kappa_z C^i)_z - \kappa \Delta C^i = F^i \quad (1)$$

где  $u$ ,  $v$ ,  $w$  - компоненты скорости течения;  $w'$  - вертикальная скорость оседания взвешенной компоненты;  $\kappa_z$  и  $\kappa$  - коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии соответственно,  $F^i$  - функции мощности источников ("источники минус стоки"). Конкретный вид характеристического вектора, начальные и граничные условия определяются задачей исследования.

Распределение компонент характеристического вектора экосистемы в водной среде естественно рассматривать вместе с движением, температурой и соленостью самой воды.

В этом случае задача сводится к совместному решению полной системы уравнений гидротермодинамики и переноса компонент экосистемы. Такой постановкой характеризуется подавляющее большинство современных междисциплинарных моделей.

В данной работе обобщается наш опыт моделирования экосистемы приустьевой зоны Дуная в рамках трехмерной многоуровневой NPD-модели и экосистемы пелагиали Черного моря с помощью трехмерной адаптированной модели Фешема-Даклоу. Следуя принятому в данной области исследования академическому стилю, мы будем придерживаться следующей последовательной схемы изложения: постановка задачи исследования; выбор характеристического вектора экосистемы; параметризация транспортных процессов, источников и стоков; постановка начальных и граничных условий; определение полуэмпирических параметров; реализация численных алгоритмов; проведение модельных экспериментов; анализ и интерпретация полученных результатов с помощью имеющихся экспериментальных данных.

**Моделирование экосистемы черноморского шельфа приустьевой зоны Дуная.** Исследовалось влияние стока Дуная и ветрового режима на эволюцию экосистемы в синоптическом временном масштабе. Был реализован расчет нестационарной задачи на 35 суток, имитирующий несколько циклов развития планктона. Расчет на таком временном интервале с одной стороны позволил получить основные тенденции изменчивости экосисте-

мы, с другой - обеспечил независимость найденного решения от начального распределения компонент. Для моделирования был выбран летний период. Это позволило исключить из рассмотрения ряд сложных высокочастотных процессов: перераспределение стока, вызванное половодьем или паводком; характерные для межсезонья резкие изменения освещенности поверхности, температуры воздуха, интенсивности атмосферной деятельности. Полученные в такой постановке связи между гидрофизическими и биогеохимическими полями можно в полной мере рассматривать как результат влияния стока Дуная и ветрового режима на изучаемую экосистему.

Гидродинамический блок [6, 12] был представлен многоуровневой численной моделью, основанной на так называемых "примитивных" уравнениях гидротермодинамики моря, т. е. на нелинейных уравнениях в приближении Буссинеска и гидростатики. На поверхности моря были заданы тангенциальное напряжение ветра, температура и соленость, выполнение кинематического условия. На дне принимались условия обтекания с трением по квадратичному закону, а также отсутствия потоков тепла и соли. На боковых твердых границах выполнялись условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли. В устьях рек была задана скорость течения. На жидкой границе, отделяющей северо-западную часть от остального моря, ставились условия свободного протекания. При этом там, где вода втекает, фиксировались температура и соленость, а там, где вытекает, выполнялось условие равенства нулю потоков тепла и соли.

В качестве компонент характеристического вектора экосистемы рассматривались:  $C^1$  - планктон (P),  $C^2$  - детрит (D),  $C^3$  - биоген

(N), в единицах измерения  $\text{мМN}/\text{м}^3$ . Таким образом, биогеохимический блок представлял собой систему с высокой степенью агрегированности компонент [3]. Планктон объединял в себе фито-, зоо- и бактериопланктон, детрит - взвешенное и растворенное органическое вещество в лабильной и стойкой фазах. Биогенами, для определенности, считались нитраты. Вопрос о ценности моделей с небольшой размерностью характеристического вектора экосистемы неоднократно обсуждался в литературе [11, 15]. Несмотря на известные трудности, возникающие при сравнении модельных результатов с экспериментом, данные модели обладают хорошими имитационными и робастными свойствами, легки в применении для трехмерных задач.

Функции мощности источников записывались в виде:

$$F^1 = \Phi_{\text{PHOTO}} C^1 - m_p C^1, \quad (2)$$

$$F^2 = m_p C^1 - \varepsilon C^2, \quad (3)$$

$$F^3 = -\Phi_{\text{PHOTO}} C^1 + \varepsilon C^2, \quad (4)$$

$\Phi_{\text{PHOTO}}(I, C^3)$  - функция, описывающая зависимость скорости фотосинтеза от освещенности  $I$  и концентрации биогенов  $C^3$ . В соответствии с принципом Либиха представим ее в форме:

$$\Phi_{\text{PHOTO}}(I, C^3) = V_{\text{PHOTO}}^{\text{max}} \min[\alpha(I), \beta(C^3)], \quad (5)$$

где  $V_{\text{PHOTO}}^{\text{max}}$  - удельная максимальная скорость фотосинтеза. Следуя формуле Михаэлиса-Ментена:

$$\beta(C^3) = C^3 / (R_N + C^3), \quad (6)$$

где  $R_N$  - константа полунасыщения.

Лимитирующее влияние света на фотосинтетически активном участке спектра учитывалось в виде функции [22]:

$$\alpha(I) = \text{th}[aI(z,t)], \quad (7)$$

где  $a$  - параметр эффективности фотосинтеза.

$$I(z,t) = I_S \exp(-k_H z), \quad (8)$$

$I_S$  - освещенность на поверхности моря;

$k_H$  - коэффициент ослабления света,  $\text{м}^{-1}$ .

$$k_H = \max\{0.08; \min[0.3; (3/2H(x,y))]\}, \quad (9)$$

где  $H(x,y)$  - глубина моря, в м. Эта зависимость с достаточной точностью описывает  $k_H$  как для глубоководных, так и для мелководных районов, учитывая, в частности, мутный придонный слой.

В качестве граничных условий задавалось условие отсутствия потоков компонент экосистемы на поверхности моря, на дне, на твердой боковой границе. На жидкой границе задавались средние климатические распределения.

Были выбраны следующие значения [22] полуэмпирических параметров модели:  $V_{\text{PHOTO}}^{\text{max}} = 1.5 \text{ сут}^{-1}$  - максимальная удельная скорость фотосинтеза;  $R_N = 0.5 \text{ мМN/м}^3$  - константа полунасыщения;  $m_p = 0.08 \text{ сут}^{-1}$  - удельная скорость естественной смертности планктона;  $\varepsilon = 0.3 \text{ сут}^{-1}$  - удельная скорость реминерализации детрита;  $a = 0.01 \text{ (Вт/м}^2\text{)}^{-1}$  - параметр эффективности фотосинтеза;  $w_3 = 1 \text{ м/сут}$  - скорость оседания детрита.

Расчетная область, охватывающая северо-западный шельф к северу от  $44.37^\circ$  с. ш. и к западу от  $35^\circ$  в. д., разбивалась на боксы,

размеры которых  $2.5'$  вдоль параллели,  $1.25'$  вдоль меридиана с неравномерным шагом по глубине (0.5; 1.5; 6.5; 11.5; 16.5; 21.5; 30.5; 39.5; 60.5; 139.5 и 260.5 м). Толщина нижних боксов равнялась разности между реальной глубиной моря  $H(x,y)$  и глубиной залегания нижней границы предпоследнего бокса. Минимальная глубина в прибрежной зоне моря считалась равной 7 м. Остров Змеиный учитывался заданием глубины моря равной нулю в одной точке разностной сетки, так что его размер по горизонтали соответствует одному боксу.

Исходная система нелинейных дифференциальных уравнений аппроксимировалась разностными аналогами на основе консервативной схемы с использованием монотонизаторов при расчете температуры и солености и схемной диффузии при расчете биогеохимических компонент. Предложенная схема - двухслойная по времени, неявная при аппроксимации вертикальной диффузии, вязкости, адвекции, придонного трения и ускорения Кориолиса. Была использована явная аппроксимация биогеохимических реакций. Разностная сетка - неравномерная и сдвинута как по горизонтали (сетка В), так и по вертикали.

Особенностью экосистемы данного района является то, что она функционирует за счет поступления биогенных элементов в море с речным стоком с разной интенсивностью практически круглый год. Классическая для открытой части моря поставка биогенов глубинными слоями играет здесь гораздо меньшую роль. Поставка биогенов Дунаем была задана в виде равномерно распределенного по трем гирлам (Килийское, Сулинское и Георгиевское) источника с суммарным расходом  $1.665 \cdot 10^4 \text{ мМN}/(\text{м}^3\text{с})$ . Концентрация биогенов

в речной воде считалась постоянной и равной  $2 \text{ мМN/м}^3$ .

Имитировался период поздней весны - начала лета, когда завершилось весеннее цветение планктона, а освещенность на поверхности ( $200 \text{ Вт/м}^2$ ) была достаточной, чтобы обеспечить высокую скорость фотосинтеза. В начальный момент времени в морской воде задавался постоянный по горизонтали вертикальный профиль биогенов: концентрация линейно возрастала от нуля до  $2 \text{ мМN/м}^3$  в верхнем 50-метровом слое, далее линейно росла до  $8 \text{ мМN/м}^3$  на глубине 70 м и ниже не менялась. Для планктона в расчетной области была задана "фоновая" концентрация  $0.01 \text{ мМN/м}^3$ . Считалось, что детрит в начальный момент отсутствует. Профиль солености был взят соответствующим характерному многолетнему профилю для глубоководной части Черного моря:  $S = 18 \text{ ‰}$  в 1-5 слоях, т. е. до глубины 19 м; в следующих слоях соленость равнялась 18.3; 18.5; 19.5; 20.5; 21.5; 22.0 ‰ соответственно. Вертикальный профиль температуры воды был взят соответствующим состоянию начала летнего прогрева:  $T = 15^\circ\text{C}$  в верхнем 9-метровом слое,  $12^\circ\text{C}$  на горизонте 11.5 м и равной  $8^\circ\text{C}$  ниже.

Для исследования особенностей, связанных с действием ветра при различных его направлениях, было проведено три численных эксперимента. В первом моделировалась эволюция экосистемы в отсутствии ветра, во втором - при относительно слабом (скорость 5 м/с) северо-восточном ветре, в третьем - при таком же северо-западном ветре. Выбор ветрового режима был обоснован тем, что для придунайского района шельфа Черного моря в рассматриваемом сезоне со среднегодовой повторяемостью 40 - 50% характерны ветры северного сектора [23]. С шагом по времени

15 мин, выбранным из условий устойчивости гидродинамического блока и заведомо достаточным для приведенного выше набора полупэмпирических параметров модели, проводился численный эксперимент на 35 суток.

Сначала кратко остановимся на результатах расчета гидротермодинамического блока на горизонте 0.5 м на пятые расчетные сутки. В отсутствие ветра течения были относительно слабыми и сосредоточенными около дунайских гирл. Движение здесь характеризовалось антициклонической направленностью. Со временем зона распреснения на поверхности распространялась в открытое море до о. Змеиный. У острова фиксировалось формирование ячейкой вертикальной циркуляции. Далее происходило увеличение пространственного размера ячейки, и к югу от острова у берега имело место пятно относительно высокой солености, свидетельствующее о происшедшем здесь апвеллинге. Действие ветра приводило к усилению течений на поверхности и в глубинных слоях. При этом формировались различные поля солености. При северо-восточном ветре пятно воды пониженной солености было прижато к берегу, распресненная вода выносилась течениями вдоль берега к югу. На глубине у берега вода была более пресной, что было связано с происходившим здесь при этом ветре опусканием вод. Действие северо-западного ветра приводило к переносу распресненных вод в юго-восточном направлении. На глубине в этом случае вдоль всего прибрежного края возникала полоса вод повышенной солености из-за происходившего в этом случае апвеллинга.

На рис. 1 представлены распределения планктона (а), биогенов (б) и детрита (в) на горизонте 0.5 м на пятые сутки в отсутствие ветра (сверху), в случаях северо-восточного (в

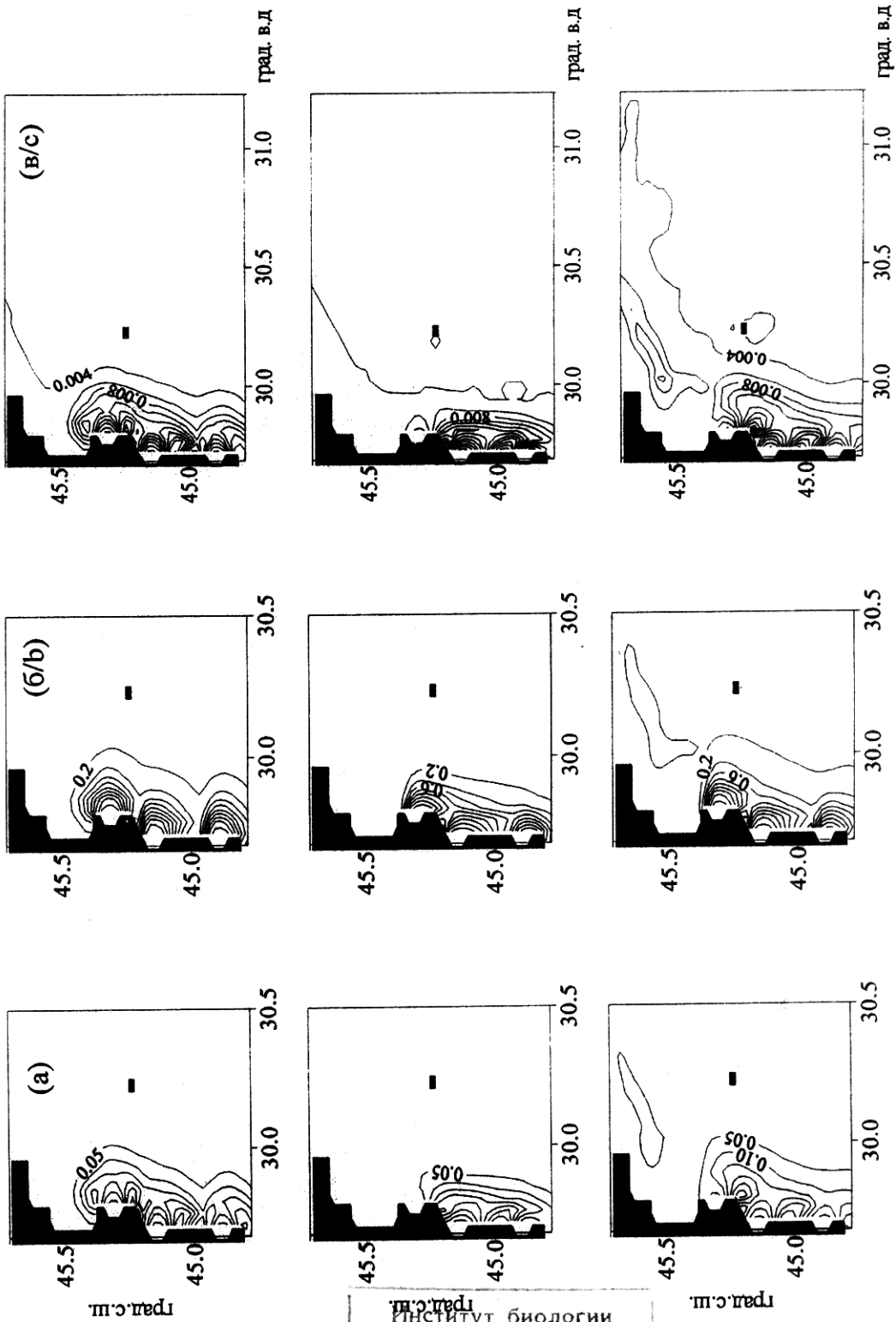


Рис. 1. Модельные распределения (мМN/м<sup>3</sup>) (а) планктона, (б) биогена, (в) детрита на горизонте 0.5 м на 5-ые расчетные сутки в зависимости от направления ветра

Fig. 1. Simulated distributions (mMN/m<sup>3</sup>) of (a) plankton, (b) nutrient and (c) detritus on the depth of 0.5 m on the 5 th day in response to wind regime

град.с.ш.  
 Институт биологии  
 южных морей АН УССР  
 БИБЛИОТЕКА  
 № 10

середине) и северо-западного (внизу) ветров. В этот период биогены распространялись в открытом море в поверхностном слое и потреблялись при фотосинтезе, вызывая увеличение концентрации планктона.

К десятым суткам планктона в верхнем слое становилось настолько много, что он успевал ассимилировать практически все биогены, поступающие со стоком и, разлагаясь, обеспечивал образование детрита. К 35-ым суткам хорошо видны отличия в пространственных распределениях, обусловленные различными гидродинамическими ситуациями. При отсутствии ветра пятно планктона и детрита распространялось в открытом море вплоть до о. Змеиный и к северу вследствие циркуляции, обусловленной стоком Дуная. Под действием северо-восточного ветра пятна планктона сносились к западному краю шельфа и вдоль берега к югу - в открытое море. Северо-западный ветер вызывал перенос планктона и детрита на восток. В глубинных слоях также продуцировался планктон. Его концентрация была относительно высокой в начальный период в силу выбранного начального распределения биогенов. В отличие от поверхностного слоя, продукция планктона здесь лимитировалась освещенностью. Потребление биогенов в процессе фотосинтеза приводило к снижению их концентрации в 40 - 50 раз относительно начальной. Затем концентрация медленно возрастала во времени, не превышая двадцатую долю от первоначальной.

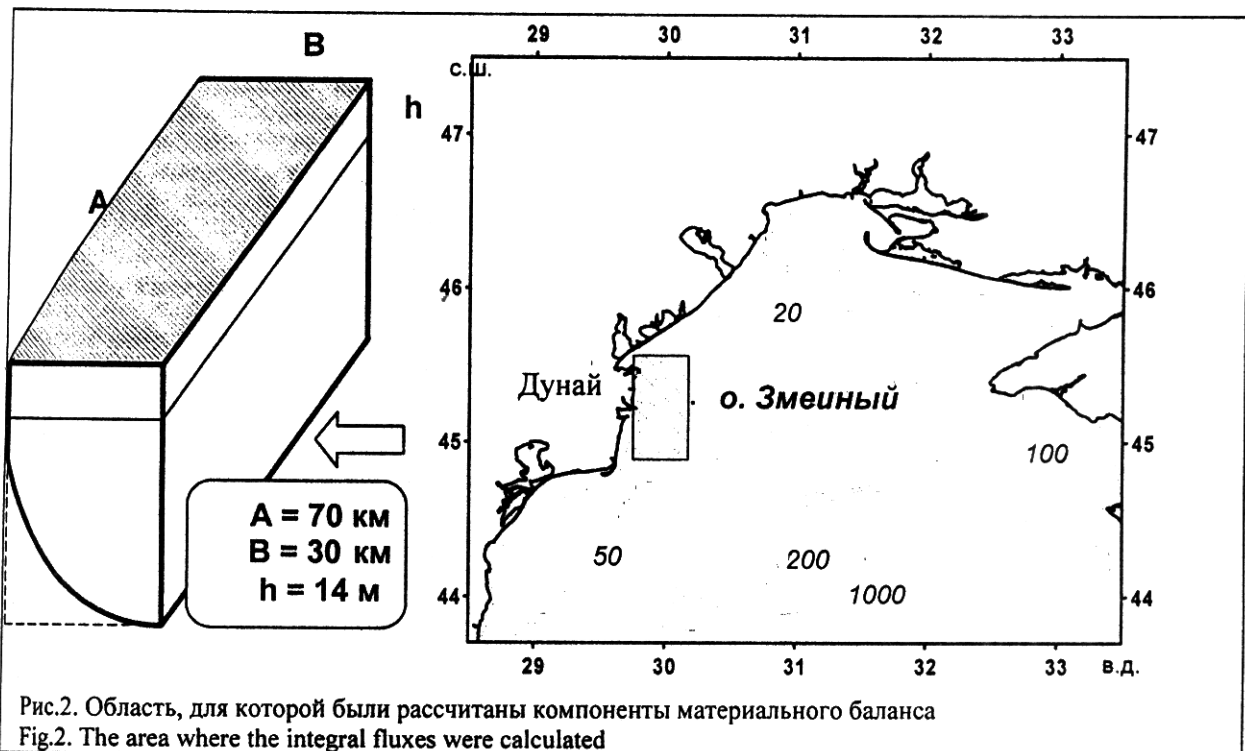
Цветение планктона на поступающих с дунайским стоком биогенах в начальный момент развивалось непосредственно у источника, постепенно захватывая глубоководные районы шельфа. В начальный период, когда фотосинтез в глубоководных районах слаб, в

чистом виде были видны различия, обусловленные особенностями вертикальных движений. Так, в случае северо-восточного ветра происходившее в изучаемом районе опускание вод приводило к уменьшению концентрации планктона, тогда как подъем вод при северо-западном ветре вел к увеличению интенсивности фотосинтеза и росту концентрации планктона. На 35-ые сутки наблюдалось формирование циркумконтинентального распределения компонент экосистемы во всей расчетной области. Концентрическая по отношению к источнику форма изолиний, характерная для безветрия, трансформировалась в зависимости от направления течений. Северо-восточный ветер вызывал формирование узкой прибрежной полосы цветения планктона с высоким горизонтальным градиентом концентрации по нормали к берегу. Режим северо-западного ветра характеризовался достаточно размытой областью цветения, которая простиралась к 35-ым суткам до  $30.5^{\circ}$  в. д. Интенсивное цветение планктона в это время происходило на глубине 21.5 м. Здесь различия, вызванные различными гидродинамическими режимами, были выражены слабее, чем на поверхности. В основном они проявлялись в образовании резких локальных максимумов - пятен в окрестностях острова Змеиный, сформировавшихся под действием северо-западного ветра. Графический материал, полученный в результате расчетов, наиболее полно представлен в работах [7, 9].

Остановимся на анализе потоков вещества между компонентами экосистемы. Расчет потоков является логическим продолжением численных экспериментов, поскольку позволяет оценить роль различных по своей природе механизмов в процессе переноса компонент экосистемы.

Данная процедура, судя по публикациям в этой области [6,10], становится стандартной при интерпретации результатов моделирования и валидации моделей. Для детального исследования особенностей трехмерной структуры биогеохимических полей в приустьевой зоне Дуная был рассчитан материаль-

ный баланс в области (рис. 2), восточная граница которой располагается в 30-ти км к востоку от устья Дуная (немного не доходя до о. Змеиный), охватывающей три гирла Дуная - 70 км в меридиональном направлении. Исследовались два слоя по вертикали: верхний - 14-метровый и нижний - от 14 м до дна.



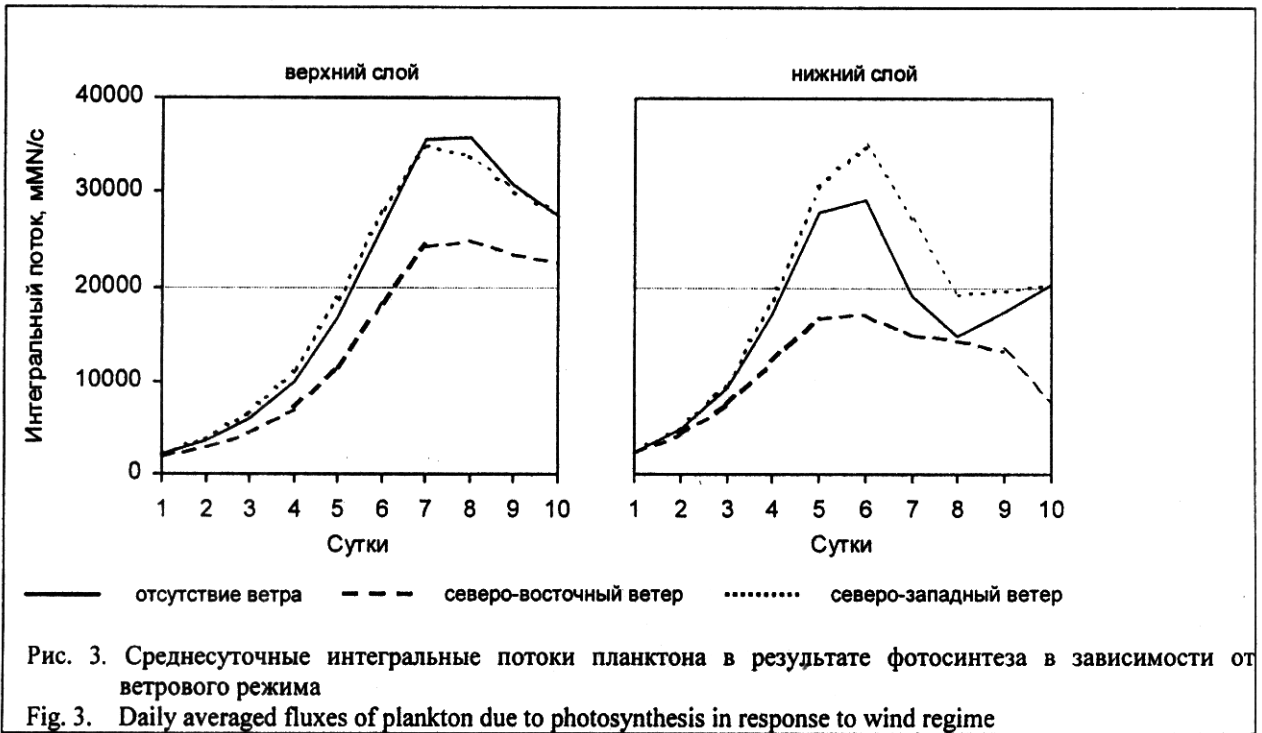
Составляющие материального баланса вычислялись как  $\iiint_V \frac{\partial C_i}{\partial t} dx dy dz$ , где  $V$  - замкнутый объем, соответствующий верхнему либо нижнему слою выделенной области. Компоненты материального баланса рассчитывались посуточно для 10-дневного периода. Значение составляющей материального баланса считалось положительным, если вещество накапливалось, отрицательным - если расходовалось. По своему физическому смыслу рассчитанные величины являются интегральными по соответствующему слою потоками

вещества (в данном случае - азота), обусловленные либо физическим транспортом: переносом через западную, северную, восточную, южную границы и вертикальным переносом; либо биогеохимическими источниками и стоками: фотосинтезом, естественной смертностью планктона и реминерализацией детрита. Поступление вещества через западную границу определялось дунайским стоком, считалось постоянным во времени и учитывалось в качестве граничных условий при постановке задачи. Этот поток был отличен от нуля только в верхнем слое и составлял 1665 мМN/с биогеонов и 83 мМN/с планктона.



Самым мощным потоком в экосистеме оказался поток, обусловленный фотосинтезом (рис.3). Он зависел от ветрового режима и был максимальным в условиях безветрия и северо-западного ветра. Поток быстро возрастал во времени, достигая максимума сначала в нижнем слое (на 6-ые сутки), а затем в верхнем (на 7-ые сутки). С 8-ых по 10-ые сутки в верхнем слое наблюдалось ослабление потока

в основном из-за недостатка биогенов. Ослабление вызванного фотосинтезом потока в нижнем слое с 6-ых по 8-ые сутки объясняется не столько дефицитом биогенов, сколько недостатком света. Видно, что северо-восточный ветер подавлял фотосинтез, как в верхнем, так и в нижнем слое, поскольку уносил биогены из выделенной области. Кроме того, с 8-ых по 10-ые сутки в нижнем слое сказывалось



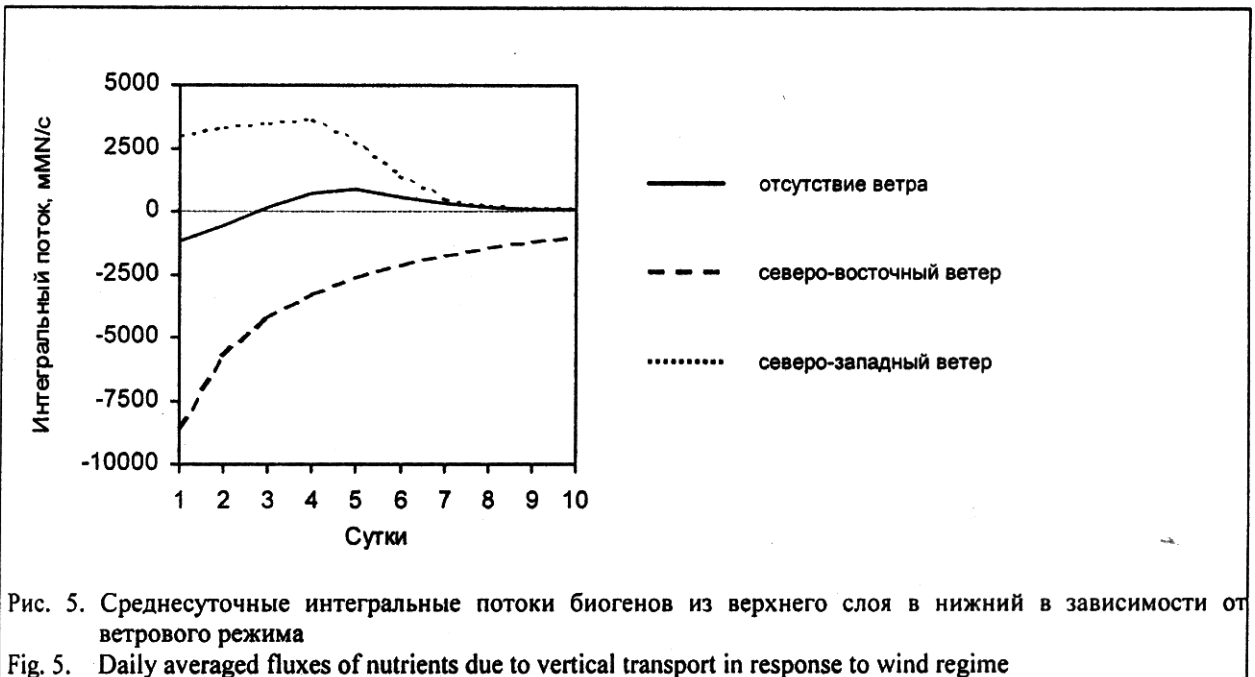
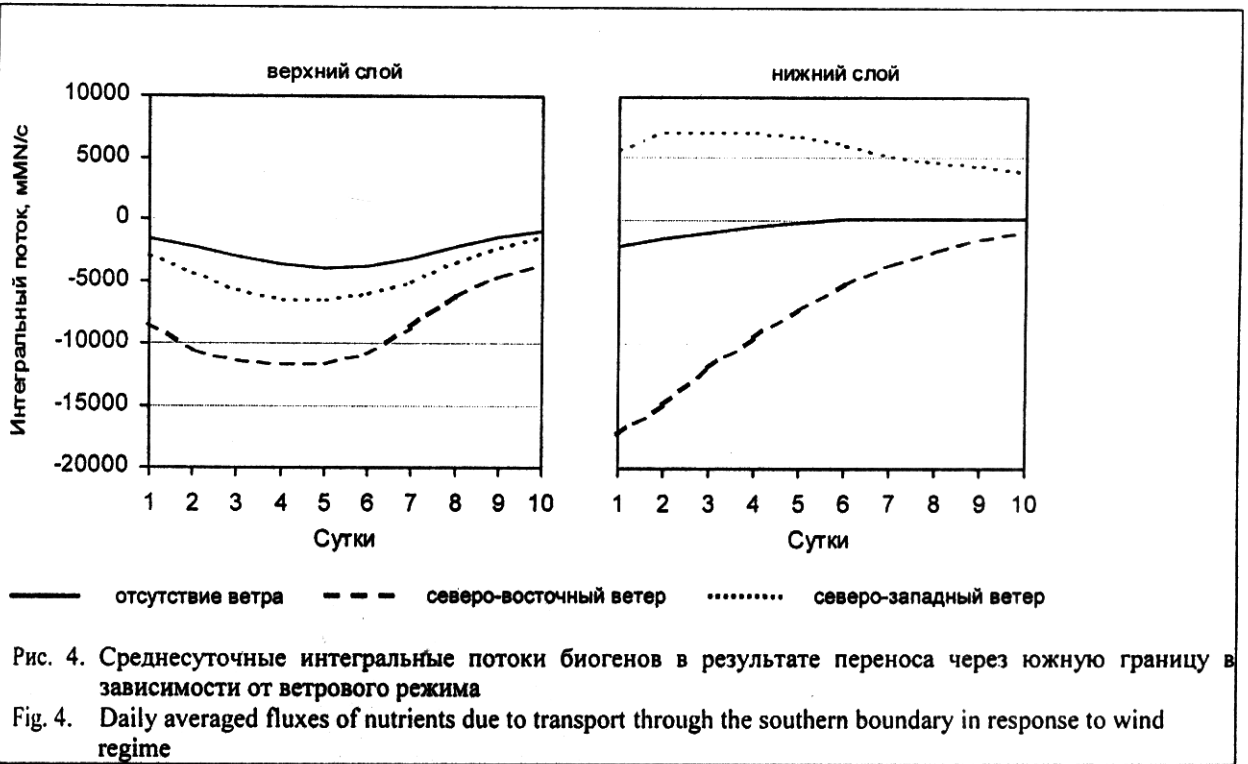
влияние даунвеллинга, который обеспечивал поступление вниз обедненных биогенами водных масс верхнего слоя, ослабляя фотосинтез.

Следующими по мощности являлись транспортный поток биогенов через южную границу (рис. 4), вертикальный поток (рис. 5) и поток вследствие убыли планктона из-за естественной смертности (рис. 6).

В условиях безветрия (см. рис. 4) потери биогенов в результате переноса через южную границу в верхнем слое были минимальными, что благоприятно сказывалось на

росте планктона. Северо-восточный ветер характеризовался наиболее ощутимыми потерями биогенов. В нижнем слое северо-западный ветер приводил к накоплению биогенов.

Влияние апвеллинга при северо-западном ветре и даунвеллинга при северо-восточном хорошо видно на распределениях интегрального вертикального потока из верхнего слоя в нижний (см. рис. 5). Безветрие характеризовалось относительно низкими значениями интегрального потока и сменой его знака примерно на третьи сутки.

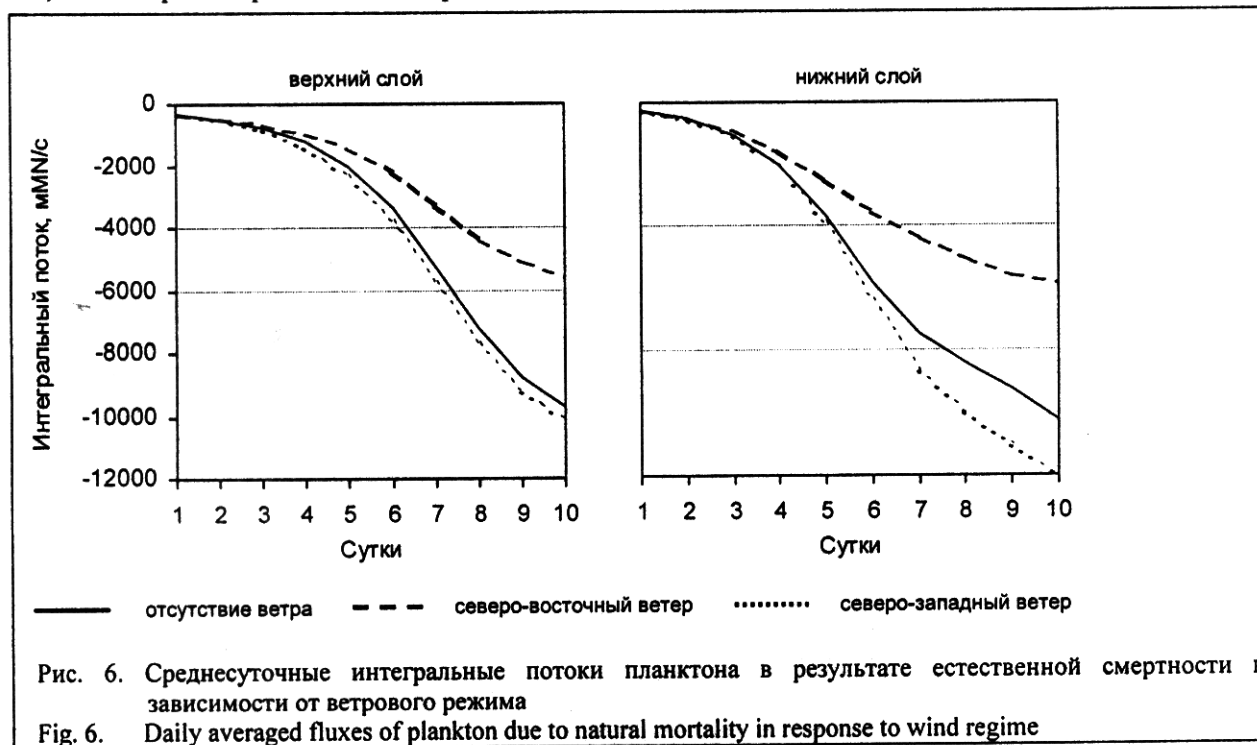


В силу выбранной параметризации мощности процесса естественной смертности планктона, поток, вызванный этим процессом, прямо пропорционален концентрации планктона. Видно (см. рис. 6), что северо-западный

ветер обеспечивал максимальную по сравнению с остальными ветровыми режимами концентрацию планктона и, как следствие, максимальную его естественную смертность. Интегральные потоки, обусловленные северным

и восточным переносом компонент экосистемы, а также реминерализацией детрита были

много меньше вышеперечисленных.



Таким образом, был сделан вывод о том что, экосистема шельфа дунайской приустьевой акватории представляет собой буферную зону между прессом дунайских биогенных загрязнений и прилегающими районами шельфа и открытого моря. Трансформация вещества в этой зоне определяется мощностью источника и ветровым режимом над морем. Существуют динамические режимы (безветрие, слабый северо-западный ветер), в которых система полностью ассимилирует биогены. Слабый северо-восточный ветер обеспечивает транзитный перенос сильно ослабленного потока вещества в открытую часть моря.

**Трехмерная экологическая модель пелагиали Черного моря.** Данная модель была получена на основе объединения достаточно полных гидродинамического и биогеохимического блоков. С ее помощью была ис-

следована сезонная изменчивость гидродинамических и биогеохимических полей в море, обусловленная сезонной изменчивостью солнечной радиации, атмосферной циркуляции, стока рек, водообмена через Босфор. В качестве гидродинамического блока была использована модель в изопикнических координатах с верхним квазиоднородным слоем ВКС [13, 14, 16, 17, 19], а биогеохимического блока - 7-компонентная модель Фэшема-Даклоу [21], обобщенная на пространственный случай.

В гидродинамической модели предполагалось, что море состоит из  $N$  слоев: верхнего ( $k = 1$ ) турбулизированного квазиоднородного слоя (ВКС) и внутренних слоев, обменивающихся массой только с ВКС при контакте с ним. В пределах каждого слоя температура, соленость, плавучесть и составляющие гори-

зонтальной скорости течения не менялись с глубиной. Плаваемость в ВКС могла меняться в произвольных пределах, а во внутренних слоях ее изменения ограничивались априори заданными – базовыми значениями. Уравнения модели получались интегрированием по вертикали в пределах каждого слоя примитивных, уравнений гидротермодинамики океана и уравнения баланса энергии турбулентности в ВКС с учетом соответствующих граничных условий.

На поверхности моря задавались составляющие напряжения ветра, атмосферное давление, поток массы, обусловленный осадками и испарением, диффузионный поток тепла, пропорциональный разности эффективной температуры воздуха и температуры воды в ВКС, диффузионный поток соли, пропорциональный солёности в ВКС. На дне ставились условия непротекания, отсутствия нормальных ко дну потоков тепла и соли, учитывалось придонное трение, пропорциональное скорости течения в нижнем слое. На поверхностях раздела принимались условия непрерывности давления, нормальных составляющих скорости течения и суммарных (адвективных плюс диффузионных) потоков тепла, соли, количества движения. Использование уравнения баланса энергии турбулентности в ВКС позволило одновременно рассчитать топографию нижней границы ВКС и скорость течения через нее. Для остальных, внутренних слоев рассчитывалась только одна величина. В данной версии модели предполагалось, что контактирующие внутренние слои между собой не обмениваются массой. Сам ВКС мог находиться (в определенных местах) в режимах вовлечения, когда вода вовлекается в ВКС из внутренних слоев, или субдукции, когда вода вытекает из ВКС во внутренний слой. На

боковых границах ставились следующие условия. На твердых границах – условия прилипания, равенства нулю лапласиана составляющих горизонтальной скорости течения и нормальных к берегу потоков тепла и соли. На жидких границах (в устьях рек и проливе Босфор; Керченский пролив не учитывался) задавались нормальные к границе потоки массы в слоях, толщины слоев, температура и солёность втекающих в море вод. Считалось, что речные воды втекают в ВКС, а в Босфоре имеет место двухслойная по скорости структура: в верхних слоях черноморские воды вытекают, а в нижних мраморноморские – втекают. Потоки вытекающих черноморских и втекающих мраморноморских вод считались связанными известной функциональной зависимостью с суммарным потоком вод через Босфор, который был задан. Конечно-разностный алгоритм решения системы уравнений модели при указанных граничных условиях был подробно описан в цитированных выше работах.

Был проведен численный эксперимент по воспроизведению сезонной изменчивости гидрофизических полей в Черном море, обусловленной действием сезонно меняющихся внешних факторов, (среднемесячных, линейно проинтерполированных по пространству и времени). Море с учетом рельефа дна и конфигурации берегов аппроксимировалось 7- слойной моделью, в которой пять верхних слоев вместе с ВКС располагались выше галоклина. Разрешение по горизонтали -  $\Delta x = 19.6$  км,  $\Delta y = 21.4$  км, шаг по времени -  $\Delta t = 30$  мин. В начальный момент времени движение отсутствовало, поверхности раздела задавались горизонтальными, в слоях задавались и были постоянными значения температуры и солёности. Сток рек и потоки через

Босфор задавались в виде “точечных источников”. Суммарный расход воды через Босфор полагался постоянным в течение года и равным  $180 \text{ км}^3/\text{год}$ , расход черноморских вод, вытекающих в верхних пяти слоях, и мраморноморских, втекающих в шестом и седьмом слоях, -  $360 \text{ км}^3/\text{год}$  и  $180 \text{ км}^3/\text{год}$  соответственно; соленость и температура мраморноморских вод считались постоянными и равными  $S_M = 36\text{‰}$ ,  $T_M = 14^\circ\text{C}$ . Среднемесячные поля скорости ветра, температуры воздуха, облачности, относительной влажности, осадков, расходы рек, солнечная радиация были выбраны согласно [13 - 15]. Был проведен расчет на 14 лет, причем последние три года совместно с биогеохимическим блоком.

В биогеохимический блоке был формализован круговорот азота ( $\text{ммольN}/\text{м}^3$ ) в экосистеме. В качестве компонент характеристического вектора экосистемы рассматривались: фитопланктон (P), зоопланктон (Z), бактериопланктон (B), растворенное органическое вещество ( $N_d$ ), аммоний ( $N_a$ ), нитраты ( $N_n$ ) и детрит (D). Параметризация функций мощности источников была заимствована из работы [21]. Использование модели Фэшема-Даклоу обладает рядом явных преимуществ: обеспечивается адекватное, в смысле сложности, описание физических и биогеохимических процессов, соблюдается закон сохранения вещества. Применение модели отличается относительной простотой физической интерпретации результатов моделирования и доступностью соответствующего программного продукта. В ВКС были учтены следующие процессы:

- фотосинтез как функция освещенности и концентрации нитратов и аммония;
- естественная смертность фитопланктона;

- убыль фитопланктона в ходе его потребления зоопланктоном;
- рост биомассы зоопланктона за счет потребления им фитопланктона, бактерий и детрита;
- рост биомассы бактерий за счет потребления ими аммония и растворенного органического вещества;
- образование растворенного органического вещества за счет распада детрита и эксудации фитопланктона;
- накопление аммония в результате естественной смертности зоопланктона и бактерий;
- образование детрита в процессе жизнедеятельности зоопланктона и естественной смертности фитопланктона;
- гравитационное оседание детрита.

Предполагалось, что в слоях, расположенных ниже ВКС, происходит лишь процесс регенерации вещества – переход органических форм азота в неорганические. Для расчетов было задано 25 полуэмпирических констант, отражающих специфику черноморской экосистемы [22]. Уравнения переноса компонент экосистемы были адаптированы к многослойной квазиизопикнической модели. В предположении, что в каждом слое концентрация компонент экосистемы не меняется с глубиной, транспортные уравнения, подобно гидродинамическим, интегрировались по вертикали в пределах каждого слоя с учетом условий на поверхности моря, дне и на поверхностях раздела слоев. На поверхности и дне моря потоки компонент экосистемы принимались равными нулю. На поверхностях раздела между слоями использовалось условие непрерывности суммарного (адвективного плюс диффузионного) потока для всех компонент экосистемы. Условия на боковых границах

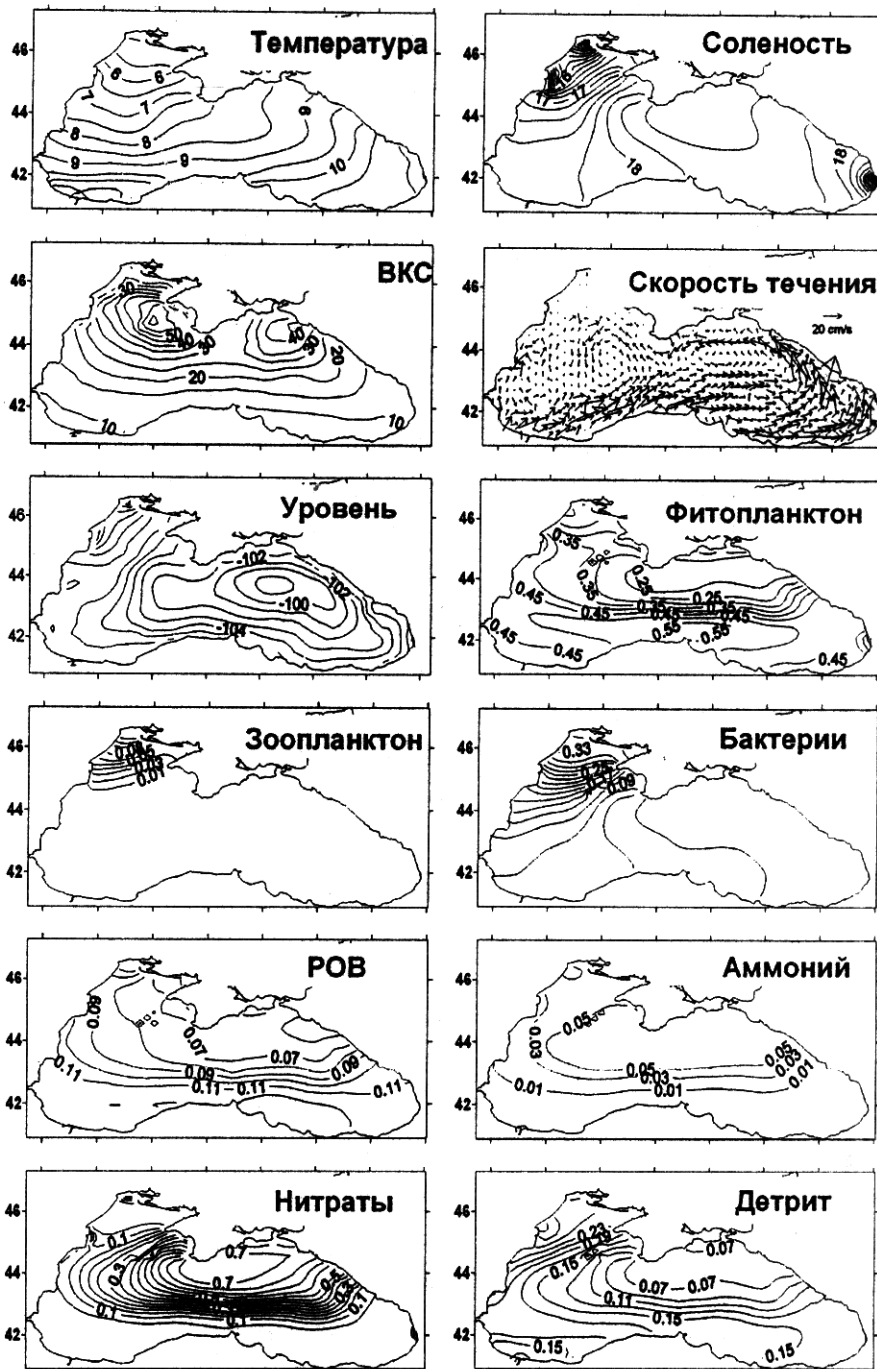


Рис. 7. Некоторые результаты моделирования экосистемы пелагиали Черного моря, соответствующие 15 апреля

Fig. 7. Some results of modeling the Black Sea pelagian ecosystem on the 15 th of April

ставились так же, как для температуры и солености. Потоки компонент экосистемы на твердой боковой границе полагались, равными нулю. Реки (Дунай, Днепр, Риони) рассматривались как постоянные во времени источники нитратов, концентрация которых в речной воде составляла  $3 \text{ ммольN/м}^3$ . Учитывалось также поступление нитратов с концентрацией  $0.5 \text{ ммольN/м}^3$  через Босфор. Расчет биогеохимический блока базировался на методе расщепления [8]. В качестве начальных условий выбирались однородные по горизонтали распределения:

в ВКС:  $P = 0.25 \text{ ммольN/м}^3$ ,  
 $Z=B=N_d=N_n=N_a=D=0.05 \text{ ммольN/м}^3$ ; во внутренних слоях задавались нулевые концентрации всех компонент экосистемы, кроме нитратов в пределах галоклина (слои 2 - 6), концентрация которых взята равной  $3.0 \text{ ммольN/м}^3$ . Уравнения модели интегрировались до достижения системой квазипериодического состояния.

Модель в достаточно хорошем соответствии с данными наблюдений [18] описывала сезонную изменчивость полей температуры и солености в глубоководной части моря и на северо-западном шельфе. На шельфе происходило наиболее сильное и быстрое охлаждение воды зимой и прогревание летом. В глубоководной части моря температура в ВКС во все сезоны росла в южном и восточном направлениях, она была минимальной в феврале и максимальной в августе. В ВКС в поле солености четко проявлялись зоны распреснения, связанные со стоком Дуная, Днепра и Риони. Распреснение усиливалось к концу весеннего сезона после паводка и приводило к расширению этих зон на большую часть западной половины Черного моря. В центральной части моря изменение солености в течение года бы-

ло не столь значительным и составило не более  $0.3\text{‰}$ . Анализ топографии ВКС выявил заглупление слоя, происходящее вследствие осенне-зимнего выхолаживания с октября до марта и формирование достаточно мелкого ВКС в летний сезон. На северо-западном шельфе зимой ВКС охватывал всю толщу воды до дна. В зимний период были зафиксированы районы с куполообразными подъемами и опусканиями нижней границы ВКС, что, по-видимому, связано с наличием циклонических и антициклонических круговоротов. Эти вихри были хорошо видны в поле течений. Сопоставление векторного поля скорости течения в ВКС с распределениями уровня, отражающими поведение геострофической скорости течения на поверхности моря, указывало на существенный вклад чисто дрейфовых течений в картину циркуляции в весенне-летний период, когда толщина ВКС достаточно мала. Оказалось, что за исключением весенних месяцев (с марта по июнь), ВКС находится в режиме вовлечения. Субдукция происходила весной и демонстрировала «пятнистость» распределения. Наиболее интенсивной она была в северо-западной части моря, а самой длительной - в южной части моря. Полученные особенности гидротермодинамических полей оказались в полной мере отраженными в пространственно-временных распределениях компонент экосистемы.

Некоторые модельные характеристики экосистемы, соответствующие 15 апреля, приведены на рис. 7. Более подробные распределения можно найти в работах [17, 10]. Период с декабря по февраль характеризовался низкой концентрацией фитопланктона ( $<0.08 \text{ ммольN/м}^3$ ) и его малой пространственной изменчивостью, что объясняется недостатком света в тот период. В марте начи-

налось цветение фитопланктона на северо-западном шельфе (концентрация достигала  $0.40 \text{ ммольN/м}^3$ ), которое обеспечивалось потреблением аммония. К апрелю на северо-западе цветение затухало, но продолжалось в остальных районах моря. Абсолютный максимум концентрации фитопланктона ( $0.56 \text{ ммольN/м}^3$ ) был достигнут у турецкого побережья в середине апреля, и обеспечивался потреблением нитратов. Распределение фитопланктона в апреле носило ярко выраженный зональный характер. В мае из-за дефицита биогенов концентрация фитопланктона в глубоководной части моря уменьшалась, демонстрируя "след" весеннего цветения (до  $0.30 \text{ ммольN/м}^3$  в максимуме) у крымского побережья и очаги непосредственно у внешних источников нитратов - устьев рек и Босфора. В июне концентрация фитопланктона продолжала уменьшаться. В июле и августе усиливалось вовлечение в узкой полосе вдоль Крымского побережья от м. Тарханкут до Керченского пролива. Этот физический процесс обеспечивал накопление нитратов и августовское цветение фитопланктона (до  $0.50 \text{ ммольN/м}^3$  в максимуме) в восточной части моря. В целом, летнее цветение было слабее весеннего и затухало к сентябрю. В октябре - ноябре концентрация фитопланктона продолжала снижаться.

Практически в течение всего года зоопланктон был сконцентрирован в западной части моря. В январе, феврале и марте он фиксировался в низких концентрациях только на северо-западном шельфе. В апреле его количество начинало постепенно увеличиваться. В мае концентрация зоопланктона достигала своего абсолютного максимума -  $0.36 \text{ ммольN/м}^3$ , "запаздывая" в своем развитии от фитопланктона примерно на месяц. В

июне и июле распределение "размывалось" - расширялся ареал; концентрация зоопланктона и ее горизонтальные градиенты уменьшались. В августе заметное увеличение концентрации зоопланктона, примерно  $0.02 + 0.08 \text{ ммольN/м}^3$ , фиксировалось в северо-восточной части моря. С сентября ареал был ограничен северо-западной частью моря, концентрация продолжала уменьшаться. Причем полученные нами концентрации зоопланктона были явно заниженными, что, в целом, характерно для модели Фэшема-Даклоу.

В достаточно высокой концентрации ( $>0.10 \text{ ммольN/м}^3$ ) бактерии присутствовали в ВКС всегда, причем их максимум был локализован на северо-западном шельфе моря. Весенний пик концентрации (до  $0.32 \text{ ммольN/м}^3$ ) имел место в апреле. В восточной части моря концентрация бактерий достигала максимума ( $0.10 \text{ ммольN/м}^3$ ) в июле. В ноябре на северо-западном шельфе фиксировался второй локальный максимум концентрации -  $0.24 \text{ ммольN/м}^3$ .

В январе и феврале концентрация растворенного органического вещества (РОВ) была минимальной ( $0.03 + 0.04 \text{ ммольN/м}^3$ ). В марте она возростала до  $0.70 \text{ ммольN/м}^3$  на северо-западном шельфе моря, по-видимому, в результате эксудации фитопланктона. Апрельское цветение фитопланктона в центральной и южной части моря вызывало рост концентрации РОВ - до  $0.14 \text{ ммоль N/м}^3$  у побережья Турции. В мае максимум РОВ располагался на северо-западном шельфе ( $0.30 \text{ ммольN/м}^3$ ). Вероятно, в этот момент здесь суммировались все источники РОВ - реминерализация детрита, а также пожизненные выделения зоо- и фитопланктона. Таким образом, была заложена пищевая база для развития



бактерий. Потребление ими РОВ вело к постепенному снижению его концентрации в западном секторе моря в июне - июле до  $0.06 + 0.22$  ммольN/. В августе в результате цветения фитопланктона в распределении РОВ наблюдались два локальных максимума - на северо-западном шельфе ( $0.17$  ммольN/м<sup>3</sup>) и в северо-восточной части моря ( $0.15$  ммольN/м<sup>3</sup>). В сентябре и октябре максимальные концентрации РОВ ( $0.11$  и  $0.13$  ммольN/м<sup>3</sup> соответственно) фиксировались у Керченского пролива. В ноябре и декабре концентрация РОВ монотонно убывала.

Максимальные по морю концентрации аммония были зафиксированы на северо-западном шельфе. В феврале на северо-западном шельфе -  $0.30$  ммольN/м<sup>3</sup>, в восточном секторе моря -  $0.10$ . В марте из-за потребления фитопланктоном, концентрация аммония на северо-западном шельфе уменьшилась до  $0.18$  ммольN/м<sup>3</sup>, при этом на востоке она практически не менялась. В апреле имело место распределение зонального типа с концентрацией  $0.02 + 0.06$  ммольN/м<sup>3</sup> и слабым локальным максимумом ( $0.08$  ммольN/м<sup>3</sup>) у побережья Крыма. В мае концентрация аммония увеличивалась на северо-западе до  $0.14$  ммольN/м<sup>3</sup>. Период с июня по ноябрь характеризовался низкими концентрациями аммония, около  $0.04$  ммольN/м<sup>3</sup>.

Поле концентрации нитратов формировалось в результате взаимодействия двух механизмов - физического транспорта (адвекции и диффузии) и потребления при фотосинтезе (т. н. "биологического пампинга" [24]). Кроме того, на стадии постановки задачи были заданы внешние источники поступления нитратов - поступление со стоком рек и связанное с водообменом через Босфор. С декаб-

ря по февраль биологический сток был незначительным. Нитраты в этот период можно было рассматривать как консервативную смесь. В результате зимнего конвективного перемешивания и связанного с ним вовлечения ВКС обогащался нитратами. В декабре на северо-западном шельфе их концентрация достигала  $0.15 + 0.30$  ммольN/м<sup>3</sup>, в восточной части моря  $0.35 + 0.55$  ммольN/м<sup>3</sup>. В январе -  $0.25 + 0.40$  ммольN/м<sup>3</sup> и  $0.45 + 0.75$  ммольN/м<sup>3</sup> соответственно. В феврале и марте концентрация нитратов в восточной части моря была максимальной ( $0.65 + 0.90$  ммольN/м<sup>3</sup>). Вовлечение можно считать достаточно «медленным механизмом» поставки нитратов по сравнению с быстрым потреблением нитратов фитопланктоном при фотосинтезе. Так, в ходе весеннего цветения фитопланктона "биологический пампинг" приводил к практически полной элиминации нитратов из ВКС к маю. В мае и июне фиксировались только локальные максимумы у внешних источников. В июне в районе Каламитского залива можно было заметить вызванный интенсивным локальным вовлечением слабый максимум нитратов. К августу процесс усиливался, обеспечивая рост концентрации нитратов вдоль крымского побережья до  $0,20$  ммольN/м<sup>3</sup>. С сентября по ноябрь поток нитратов со стоком рек снова превосходил потоки, обусловленные физическим транспортом и "биологическим пампингом".

В январе - феврале концентрация детрита была низкой ( $< 0.05$  ммольN/м<sup>3</sup>). В марте она возрастала до  $0.20$  ммольN/м<sup>3</sup> в северо-западной части моря. В апреле концентрация детрита продолжала расти до  $0.16$  ммольN/м<sup>3</sup> в центральных районах моря и до  $0.24$  ммольN/м<sup>3</sup> на северо-западном шельфе. В мае концентрация начинала падать. С июня по

сентябрь проявлялись подобные РОВ пространственные неоднородности в распределении детрита. Отличие состояло только в крайне низких абсолютных значениях концентрации детрита ( $< 0.09$  ммольN/м<sup>3</sup>). К зиме она продолжала уменьшаться.

При сопоставлении результатов модельных расчетов с экспериментальными данными мы столкнулись с типичными для этой процедурой трудностями. Данные оказались фрагментарными, недостаточными для статистического описания сезонной изменчивости и зачастую плохо согласовались между собой. Тем не менее, мы считаем необходимым привести результаты этого сравнения как некую начальную точку отсчета в столь далекой от простоты задаче. Были получены разумные по порядку величин модельные концентрации фито-, зоо-, бактериопланктона и РОВ в ВКС Черного моря. Они соответствовали приведенным в [25] классификационным значениям, за исключением зоопланктона, модельные концентрации которого оказались заниженными примерно в 5 раз. По сравнению с океаническими, концентрации РОВ и бактерий получились более высокими, что не противоречит выводам, сделанным в [11]. Сопоставление модельного сезонного хода фитопланктона с экспериментальными данными для глубоководных районов моря [26] показало, что при общей заниженности модельных концентраций (примерно в 1.5 - 3 раза) относительный временной ход был реконструирован верно. Такой же вывод можно сделать и по при-

веденным в [20] данным по прибофорскому району. Расчетные концентрации зоопланктона оказались заниженными на порядок по сравнению с приведенными в [27] значениями для мезозoopланктона. Концентрация бактерий на северо-западном шельфе в летний период [4] хорошо согласовалась с модельной. Немногочисленные оценки концентраций РОВ в Черном море [18] показали хорошее совпадение экспериментальных пространственных распределений с модельными при заниженности последних. Анализ экспериментальных данных по аммонии [4] указывает на наличие максимальных значений зимой на северо-западном шельфе и минимальных летом в глубоководной части моря. Результаты моделирования, хотя и дают несколько заниженные концентрации, подтверждают этот вывод. Модельные распределения нитратов отличаются от экспериментальных [1] наличием значительных горизонтальных градиентов в период, предшествующий весеннему цветению фитопланктона.

Подводя итог, заметим, что практика и научные основы моделирования экологических систем очень сложны. Тем не менее, полученные модельные результаты достаточно правдоподобно описывают изменчивость экосистемы Черного моря. По мере накопления наших знаний об экосистемах должны совершенствоваться их математические модели, прежде чем они смогут быть использованы для прогноза эволюции природных объектов.

1. Абакумова Т. Н. Особенности распределения нитратного и нитритного азота в Черном море / Процессы формирования и внутригодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимиче-

ских полей Черного моря. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1988. - С. 158 - 161.

2. Альтман Э. Н., Гертман И. Ф., Голубева З. А. Климатические поля солености и температуры

- воды Черного моря. - Севастополь, 1987. - 109 с
3. *Беляев В. И.* Моделирование морских экосистем. - Киев: Наук. думка, 1987. - 240 с.
  4. *Виноградов М. Е., Сапожников В. В., Шушкина Э. А.* Экосистема Черного моря. - М.: Наука, 1992. - 112 с.
  5. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: в 4 т. / СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. - Т.4: Черное море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. - 468 с.
  6. *Иванов В. А., Кубряков А. И., Любарцева С. П., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Моделирование некоторых особенностей гидрологических и экологических ситуаций в районе о. Змеиный / Природные условия взморья реки Дунай: современное состояние экосистемы. - Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. - С. - 184 - 208.
  7. *Иванов В. А., Любарцева С. П., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Моделирование экосистемы черноморского шельфа приустьевой зоны Дуная // Морск. гидрофизич. журн. - 1999. - № 6. - С. 15 - 29.
  8. *Иванов В. А., Любарцева С. П., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Сезонная изменчивость экологической системы северо-западного шельфа по результатам трехмерного численного моделирования экосистемы Черного моря / Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. - С. 251 - 260.
  9. *Иванов В. А., Любарцева С. П., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Влияние ветрового режима на эволюцию экосистемы приустьевой зоны Дуная в летний период / Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. - С. 261 - 268.
  10. *Любарцева С. П., Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Экологическая трехмерная численная модель Черного моря: сезонная эволюция экосистемы эвфотической зоны // Морск. гидрофизич. журн. - 2000. - № 5. - С. 55 - 80.
  11. Математические модели в биологической океанографии / Т. Плат, К.Х. Манн, Р.Е. Уланович и др. - Париж: ЮНЕСКО, 1984. - 195 с.
  12. *Михайлова Э.Н., Иванов В.А., Кубряков А.И., Шапиро Н.Б.* Особенности циркуляции вод в окрестностях острова Змеиный при воздействии ветров разных направлений // Морск. гидрофизич. журн. - 1998. - № 4. - С. 17 - 23.
  13. *Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Квазиизопикническая слоистая модель крупномасштабной океанической циркуляции // Морск. гидрофизич. журн. - 1992. - № 4. - С. 3 - 12.
  14. *Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Гидротермодинамическая многослойная модель океана. - Севастополь: МГИ НАН Украины, 1992. - 40 с. (Препринт).
  15. Моделирование морских систем. / Ж. Ниуль и др. - Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 280 с.
  16. *Рябцев Ю. Н., Шапиро Н. Б.* Моделирование формирования и эволюции холодного промежуточного слоя в Черном море // Морск. гидрофизич. журн. - 1995. - № 1. - С. 51 - 68.
  17. *Рябцев Ю. Н., Шапиро Н. Б.* Моделирование сезонной изменчивости Черного моря // Морск. гидрофизич. журн. - 1997. - № 1. - С. 17 - 23.
  18. *Торгунова Н. И.* Новые представления о распределении растворенного органического вещества в Черном море // Океанология. - 1994. - 34, № 6. - С. 57 - 61.
  19. *Шапиро Н. Б.* Формирование циркуляции в квазиизопикнической модели Черного моря с учетом стохастичности напряжения ветра // Морск. гидрофизич. журн. - 1998. - № 6. - С. 26 - 40.
  20. *Cokacar T., Ozsoy E.* Comparative analyses and modelling for regional ecosystem of the Black Sea / Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea. - L.I. Ivanov and T. Oguz (editors). - NATO ASI Series 2. Environment. Kluwer Academic Publishers. - 1998. - 2. - P. 323 - 357.
  21. *Fasham M., Ducklow H., McKelvie S.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the ocean mixed layer // J. Mar. Res. - 1990. - № 48. - P. 591 - 639.
  22. *Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Ducklow* Towards coupling three dimensional eddy resolving general circulation and biochemical models in the Black Sea. / Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea. - Kluwer Acad. Publ. - 1996. - P. 465 - 485.
  23. *Panin N.* Danube delta genesis, evolution, geological setting and sedimentology / Danube Delta-Black Sea System under Global Change Impact. - Constanta: IOR Publisher, - 1996. - P. 7 - 23.
  24. *Sarmiento J., Slater R., Fasham M., Ducklow H., Toggweiler J., Evans G.* A seasonal three-dimensional ecosystem model of nitrogen cycling

- in the north Atlantic euphotic zone // Global biogeochemical cycles. - 1993. - № 7. - P. 417 - 450.
25. *Valiela I.* Marine Ecological processes. - N.-Y. Berlin. Heidelberg. Tokyo: Springer-Verlag, - 1984. - 547 p.
26. *Vedernikov V. I., Demidov A. B.* Primary production and chlorophyll in the deep regions of the Black Sea // Oceanology. - 1993. - 33, № 5. - P. 639 - 647.
27. *Vinogradov M. E.* Long-term variability of the pelagic community structure in the open part of the Black Sea // Problems of the Black Sea. - Sevastopol: MHI-UAS Publisher, - 1992. - P. 19 - 33.