

В.Л. Дорофеев, М.В. Мартынов, В.В. Суслин,  
Л.И. Сухих, Т.Я. Чурилова

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭКОСИСТЕМЫ ЧЕРНОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИООПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

В работе изучается влияние распределения в верхнем слое моря коротковолновой радиации на рост биологической продукции. Исследование проводится на основе трехмерной численной модели экосистемы Черного моря. Были проведены расчеты эволюции экосистемы Черного моря с использованием как традиционной параметризации затухания света в толще воды, так и с использованием специально разработанной для условий региона биооптической модели. Проведенные расчеты показали, что параметризация распределения светового излучения в толще моря заметно влияет на получаемые в результате моделирования поля фитопланктона. Особенно это существенно для района северо-западного шельфа, где оптические свойства воды сильно отличаются от условий в открытой части моря. Результаты, полученные с использованием различных параметризаций затухания света с глубиной, заметно разнятся. Помимо количественной разницы наблюдаются также изменения в сезонном ходе параметров экосистемы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *экосистема моря, моделирование, фитопланктон, биооптическая модель, фотическая зона, микрозоопланктон, мезозоопланктон.*

**Введение.** При осуществлении непрерывного мониторинга морской динамики значительная роль отводится междисциплинарным моделям. Численные модели экосистемы моря, объединенные с моделью морской динамики, должны позволить оценить состояние экосистемы, а также интерполировать и экстраполировать в пространстве и во времени регулярные спутниковые наблюдения цвета моря и отрывочные биогеохимические контактные наблюдения, а также непрерывно восстанавливать ряд непосредственно не измеряемых переменных. При моделировании динамики экосистемы моря важную роль играет знание распределения в толще воды фотосинтетически активной радиации (ФАР в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм), которая необходима для процесса фотосинтеза, в результате которого происходит рост (первичная продукция) массы фитопланктона, являющегося нижним уровнем пищевой цепи экосистемы. В основном, эти процессы сосредоточены в верхнем слое моря. Нижняя граница этого слоя определяется горизонтом, на котором свет ослабевает до 1 % от поверхностного значения (фотическая зона). В модели экосистемы Черного моря ранее [1] была использована параметризация, в которой ФАР экспоненциально затухает с глубиной. Показатель экспоненты в этой параметризации пропорционален глубине и суммарной концентрации фитопланктона и взвешенной органики. Такая параметризация является довольно примитивной. Использование специально разработанной биооптической модели для описания распределения ФАР должно сделать результаты

© В.Л. Дорофеев, М.В. Мартынов, В.В. Суслин, Л.И. Сухих,  
Т.Я. Чурилова, 2011

моделирования более реалистичными. Целью настоящей работы является выяснение чувствительности модели экосистемы Черного моря к различным параметризациям светового поля в верхнем слое моря.

**Биооптическая модель.** Учет влияния коротковолновой радиации в верхнем слое моря в моделях циркуляции важен для правильного описания термодинамических процессов. Для этого была разработана биооптическая модель, описывающая распределение светового поля в верхнем слое Черного моря. Эта модель применялась в модели циркуляции [2]. В упрощенном виде она сводится к функциональной зависимости вида

$$F(z) = R \cdot \exp\left(\frac{z}{A_1}\right) + (1 - R) \cdot \exp\left(\frac{z}{A_2}\right), \quad (1)$$

где  $R$ ,  $A_1$  и  $A_2$  – константы, зависящие от времени и координат,  $F(z)$  – отношение между облученностью света на глубине  $z$  к ее величине сразу под поверхностью воды.

Наличие двух экспонент в выражении (1) необходимо для более точного описания поглощения солнечного света в длинноволновом (длины волн от 550 до 700 нм) и коротковолновом (длины волн от 400 до 550 нм) участках спектра. Расчет проникновения солнечной радиации в верхний слой воды был выполнен по Бедфордской модели [3], адаптированной к оптическим условиям Черного моря [4]

$$E(z, \lambda) = E_d(z, \lambda) + E_s(z, \lambda), \quad (2)$$

где  $E_i(z, \lambda) = E_i(z - \Delta z, \lambda) \cdot \exp(-K_i(z, \lambda) \cdot \Delta z)$  – спектральные компоненты прямого ( $i = d$ ) и рассеянного ( $i = s$ ) солнечного излучения как функции глубины  $z$  и длины волны  $\lambda$ ,  $K_i(z, \lambda)$  – спектральные коэффициенты ослабления прямой и рассеянной компонент солнечной радиации,  $\Delta z$  – шаг по глубине  $z$ . Расчет  $K_i(z, \lambda)$  для  $i = d$  и  $s$  выполнялся согласно методике, описанной в работе [5], в которой в качестве входного параметра используется спутниковый продукт третьего уровня – диффузный коэффициент ослабления света на длине волны 490 нм ( $K_d(490)$ ). Суть этого упрощенного метода состоит в том, что, в первом приближении, основным фактором, определяющим проникновение света в верхний слой Черного моря являются концентрация окрашенной компоненты растворенного органического вещества, ее пространственная изменчивость и поглощение чистой морской водой.

Расчеты по модели (2) выполнялись в предположении безоблачной атмосферы. Последнее означает, что на долю рассеянного небом света приходится 30 % от суммарной облученности водной поверхности. Интегральная по спектру от 0,2 до 4,0 мкм облученность на поверхности воды задавалась как падающая коротковолновая радиация  $SWD$  (расчет по модели  $ERA-40$ ), которая связана с проникающей в толщу моря фотосинтетически активной компонентой следующим соотношением

$$SWD = 2,19 \cdot \Phi AP,$$

где  $\Phi AP = \int_{400 \text{ нм}}^{700 \text{ нм}} E(0, \lambda) d\lambda$ . Таким образом, если мы знаем  $K_i(z, \lambda)$  и  $E_i(0, \lambda)$

для  $i = d$  и  $s$ , то мы можем выполнить расчеты по формуле (2), а затем найти коэффициенты  $R$ ,  $A_1$  и  $A_2$  в данной точке моря путем минимизации функционала

$$\min_{R, A_1, A_2} \int_{0 \text{ м}}^{50 \text{ м}} \left[ F(z) - \frac{\int_{400 \text{ нм}}^{700 \text{ нм}} E(z, \lambda) d\lambda}{0,94 \cdot \Phi AP} \right]^2 dz,$$

где 0,94 – коэффициент пропускания падающего света ( $\Phi AP$ ) из воздуха в воду.

В данной работе для расчета  $R$ ,  $A_1$  и  $A_2$  использовались среднемесячные климатические данные  $K_d(490)$ , полученные по данным измерений цветового сканера *MODIS*, установленного на спутнике *Aqua*, из архива *NASA* [6]. Представление о временной и пространственной изменчивости этих величин дают рис. 1 и рис. 2, на которых представлен сезонный ход осредненных по площади бассейна функций  $R$ ,  $A_1$  и  $A_2$ , а также осредненные за все месяцы поля коэффициентов ослабления света с глубиной  $A_1$  и  $A_2$ . Коэффициент  $R$  практически пространственно однороден в глубоководной части Черного моря и существенно меняется только возле берега.

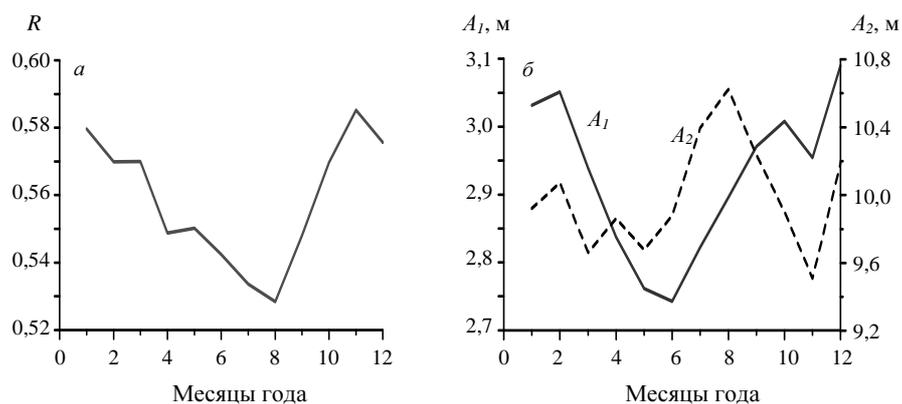


Рис. 1. Сезонная изменчивость средних по площади бассейна: а – значений функции  $R$ ; б – коэффициентов затухания света  $A_1$  и  $A_2$ . На рис. 1, б сплошная линия соответствует  $A_1$ , пунктирная линия соответствует  $A_2$ .

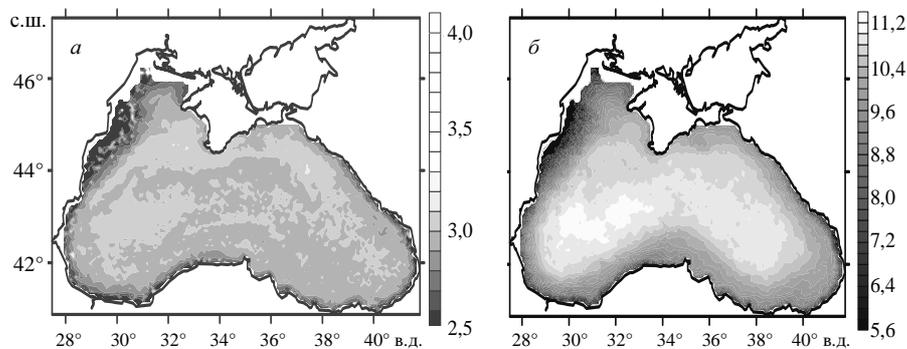


Рис. 2. Пространственное распределение осредненных за год коэффициентов затухания света (в метрах):  $a - A_1$ ;  $b - A_2$ .

**Модель экосистемы Черного моря.** Трехмерная экологическая модель Черного моря [1] представляет собой междисциплинарную модель, объединяющую модель циркуляции Черного моря и биохимическую часть, описывающую взаимодействие между компонентами экосистемы. Циркуляция и термодинамика Черного моря рассчитывается на основе численной модели общей циркуляции, в данной работе использовалась модель *POM*, адаптированная к условиям Черного моря [7]. Биогеохимическая модель связана с физической в *off-line* режиме. То есть, вначале рассчитываются физические поля, которые затем используются в качестве входных параметров биогеохимической модели. В данной работе использовались физические поля, полученные для периода с 1994 по 2001 гг. Во время расчета по модели циркуляции использовалась процедура ассимиляции данных спутниковой альтиметрии [8], адаптированная к модели в  $\sigma$ -координатах.

Биогеохимическая часть модели экосистемы занимает верхний двухсотметровый слой моря и включает 15 переменных состояния. Нижний уровень пищевой цепи состоит из двух групп фитопланктона (в основном диатомовые и флагелляты). Второй пищевой уровень представляют две размерные группы зоопланктона: микрозоопланктон (размеры менее 0,2 мм) и мезозоопланктон (размеры от 0,2 до 3 мм). На верхнем уровне пищевой цепи расположены медузообразные *Aurelia aurita* и *Mnemiopsis leidy*. Отдельную группу представляет всеядная динофлагеллята *Noctiluca scintillans*, которая потребляет фитопланктон, бактериопланктон, микрозоопланктон и взвешенную органику. Пищевая цепь включает также бактериопланктон, растворенную и взвешенную органику. В представленной модели азот рассматривается как единственный биоген. Азотный цикл включает три неорганических соединения: аммоний, нитраты и нитриты. В биогеохимическую модель также входят в качестве переменных состояния растворенные кислород и сероводород. Изменение во времени составляющих экосистемы описывается уравнениями переноса-диффузии, включающими в правую часть слабые типа источников-стоков. Параметризация потоков азота при взаимодействии различных компонентов содержит некие размерные или безразмер-

ные коэффициенты. Величины этих коэффициентов выбирались согласно работам [9, 10]. Отдельные коэффициенты являются функциями температуры и солености морской воды, концентрации кислорода и т.д.

На поверхности моря задаются нулевые потоки всех переменных состояния, кроме кислорода. На нижней границе, соответствующей жидкой границе (глубина 200 м) ставятся нулевые условия для всех компонентов системы, кроме аммония и сероводорода, а в мелководной части моря на дне – условия отсутствия потоков. Такие же условия ставятся на боковых границах, за исключением устьев крупных рек, где задаются потоки биогенов пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока.

Биогеохимическая модель имеет такое же пространственное разрешение, как и модель циркуляции (примерно 7 км). Двадцать шесть расчетных вертикальных  $z$ -уровней модели расположены неравномерно – более часто у поверхности. Гидрофизические поля, получаемые по модели циркуляции, интерполируются на сетку биогеохимической модели и используются в качестве входных параметров.

**Результаты численных экспериментов.** Для оценки эффективности влияния проникающей солнечной радиации в рамках описанной выше оптической модели на моделирование состояния экосистемы Черного моря были проведены тестовые расчеты. Рассчитывалась эволюция экосистемы при традиционной аппроксимации распределения ФАР в верхнем слое моря и с использованием климатических коэффициентов затухания света с глубиной, полученных по оптической модели.

Как упоминалось выше, традиционная аппроксимация распределения, используемая в экологических моделях, основана на экспоненциальном ослаблении интенсивности света с глубиной. Показатель экспоненты состоит из двух частей: затухания в чистой воде с постоянным коэффициентом и второй части, коэффициент затухания которой зависит от суммарной концентрации фитопланктона в слое воды над рассматриваемым горизонтом

$$\Phi AP(z, x, y, t) = I_s \exp(-(k_w z + k_c \int (P_f + P_d) dz) \quad (3)$$

где  $k_w$  – коэффициент затухания морской воды,  $k_c$  – коэффициент самозатемнения фитопланктона,  $P_f$  и  $P_d$  – концентрации двух видов фитопланктона, использующихся в биогеохимической модели.

По полученным в результате моделирования полям можно получить распределение ФАР в толще воды и сравнить его с тем распределением, которое получено по оптической модели. На рис. 3 представлены временные эволюции осредненных по площади значений ФАР для двух горизонтов (12 и 22 м) для глубоководной части моря и северо-западного шельфа. В целом величина ФАР, полученная с использованием формулы (3), превышает значения, полученные по оптической модели. Особенно это заметно для мелководного района северо-западного шельфа. Однако существуют временные интервалы, когда интенсивность света, рассчитанная по оптической модели, превышает интенсивность света, рассчитанную по формуле (3). Для глубоководной части моря это начало весны, время интенсивного цветения фитопланктона.

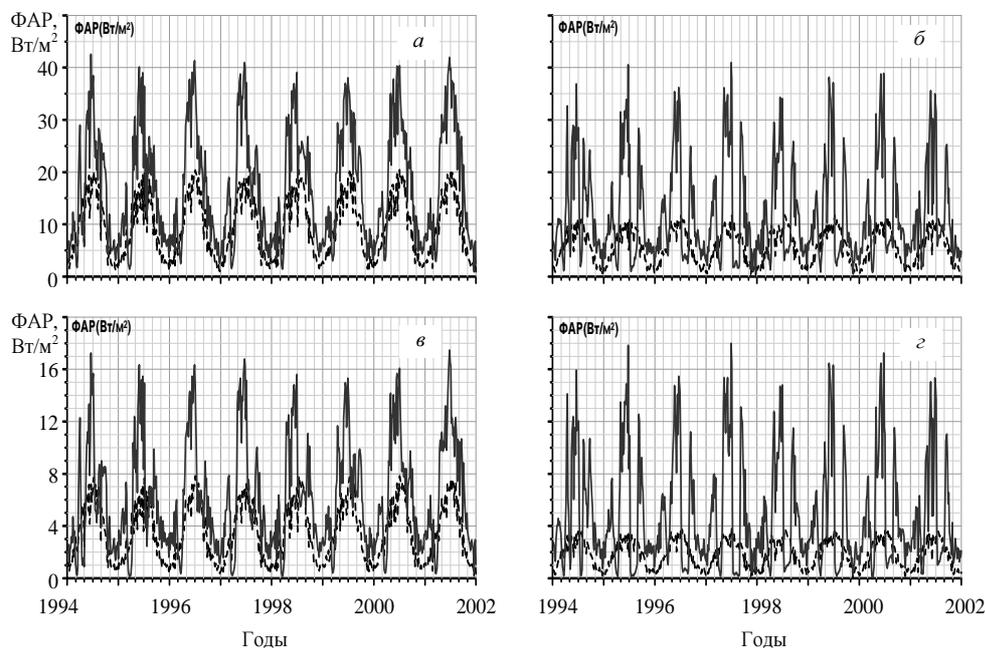


Рис. 3. Сравнение временной эволюции средних по площади бассейна значений ФАР ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), полученных по формуле (3) (сплошная линия) и по оптической модели (пунктирная линия), для глубоководной части моря (а, в) и северо-западного шельфа (б, г). Графики (а, б) соответствуют горизонту 12 м, графики (в, г) – 22 м.

На шельфе второй такой период наблюдается во второй половине лета (в глубоководной части моря этот эффект проявляется не очень ярко на горизонте 22 м). Это, по-видимому, связано с тем, что в мелководной части моря летний подповерхностный максимум фитопланктона расположен близко к поверхности моря.

Рис. 4 и рис. 5 демонстрируют пространственное распределение ФАР для двух горизонтов и для двух месяцев: марта и июля.

В марте (см. рис. 4), когда обычно наблюдается интенсивное весеннее цветение фитопланктона, величины интенсивности света на горизонте 5 м для обоих расчетов примерно равны в глубоководной части моря. В районах, прилегающих к северо-западному шельфу значения ФАР, полученные по оптической модели, даже выше. На горизонте 18 м это выполняется для всей области глубоководной части Черного моря, что связано с большими концентрациями фитопланктона, вызванными весенним цветением. В то же время, существует небольшая область возле устья Дуная, где интенсивность света, рассчитанная по биооптической модели, затухает быстрее, чем рассчитанная по формуле (3), что связано с речным выносом большого количества растворенной органики.

Летом (см. рис. 5) наблюдается несколько иная картина. В глубоководной части моря интенсивность света, рассчитанная по модели, ниже для обоих горизонтов, а на северо-западном шельфе наоборот – формула (3) дает большее уменьшение интенсивности света.

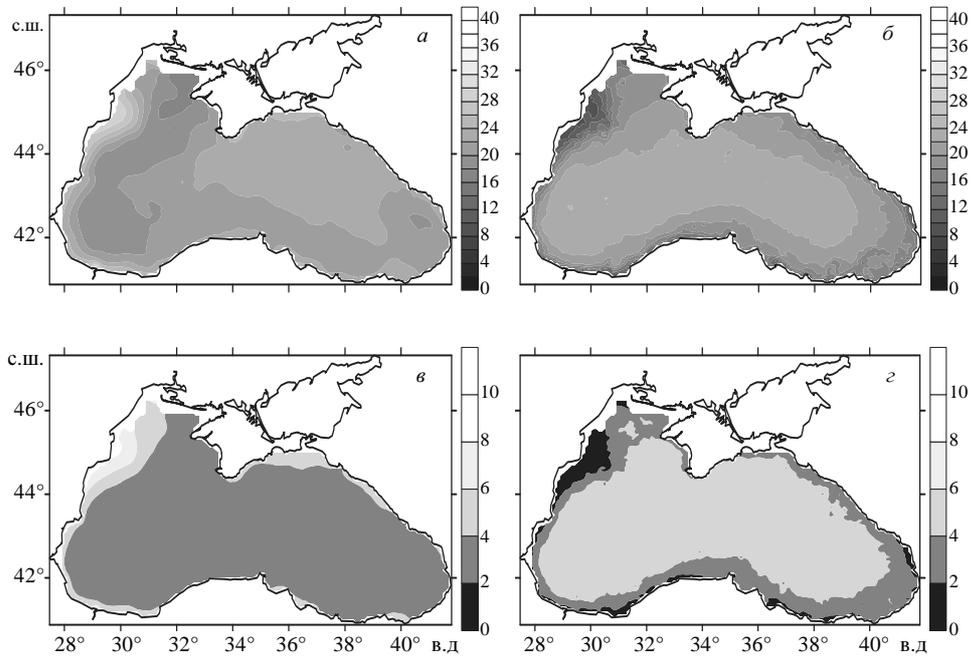


Рис. 4. Пространственное распределение ФАР ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) в марте для двух горизонтов: 5 м (*a*, *б*) и 18 м (*в*, *г*), рассчитанное по оптической модели (*a*, *в*) и по формуле (3) (*б*, *г*).

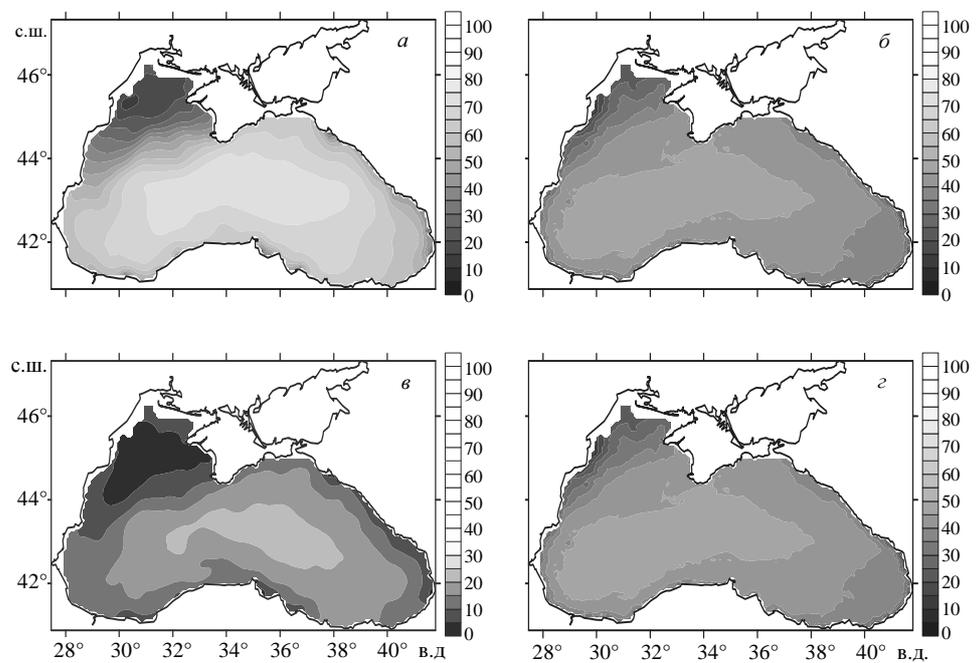


Рис. 5. Пространственное распределение ФАР ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) в июле для двух горизонтов: 5 м (*a*, *б*) и 18 м (*в*, *г*), рассчитанное по формуле (3) (*a*, *в*) и по оптической модели (*б*, *г*).

Рассмотрим теперь влияние используемой оптической модели распределения в толще воды фотосинтетически активной радиации на параметры модели экосистемы Черного моря, полученные по численной модели. Как было сказано выше, солнечная радиация влияет непосредственно на процессы фотосинтеза и, следовательно, на рост биомассы фитопланктона.

На рис. 6 представлены временные диаграммы поведения средней по площади концентрации фитопланктона, полученные при использовании различных моделей распределения ФАР: оптической модели и формулы (3).

В первом случае в сезонном ходе концентрации фитопланктона присутствуют два четко выраженных максимума примерно одинаковой интенсивности: весенний и летний, которые проникают довольно глубоко (см. рис. 6, *a*). Остальные черты сезонной изменчивости выражены менее ярко. В полях, полученных с использованием традиционной аппроксимации затухания света (см. рис. 6, *б*), наблюдается иная картина сезонного хода. Основным событием является весеннее цветение в конце зимы – начале весны, которое дает хорошо видимый максимум. Однако его интенсивность и глубина проникновения меньше, чем в первом случае. В конце весны наблюдается еще один максимум, иногда по интенсивности сравнимый с первым (в случае оптической модели он тоже виден, но его интенсивность существенно меньше первого).

Второй по интенсивности максимум наблюдается в конце осени – начале зимы. В расчете с использованием оптической модели интенсивность этого максимума существенно ниже двух других. И, наконец, в сезонной изменчивости хорошо виден летний подповерхностный максимум на глубине около тридцати метров. В расчете с оптической моделью летний максимум находится у поверхности.

На рис. 7 приведена временная изменчивость биомассы фитопланктона в верхнем пятидесятиметровом слое моря отдельно для глубоководной части моря и северо-западного шельфа. Основное отличие состоит в том, что интенсивность весеннего и летнего пиков выше в расчете с оптической моделью. Особенно это заметно в мелководной зоне. При этом летний пик часто

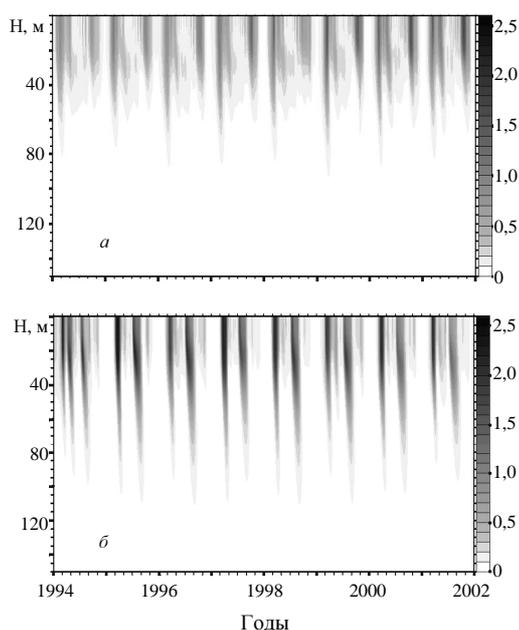


Рис. 6. Временная эволюция средней по площади Черного моря концентрации фитопланктона (в ммольN/м<sup>3</sup>) на разных глубинах, полученная: *a* – с использованием оптической модели; *б* – с использованием формулы (3).

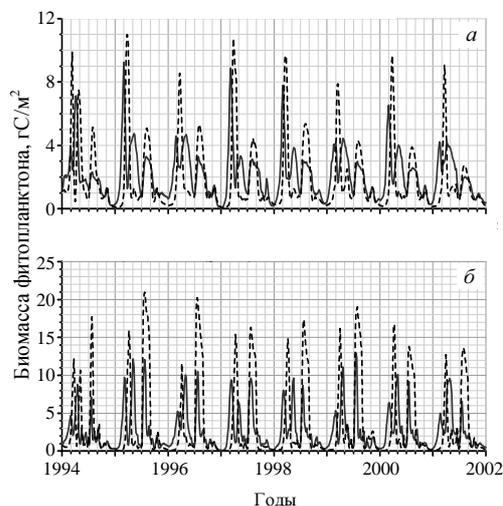


Рис. 7. Изменчивость биомассы фитопланктона в верхнем 50-метровом слое, полученная с использованием оптической модели (пунктир) и формулы (3) (сплошная линия): *a* – глубоководная часть Черного моря, *б* – северо-западный шельф Черного моря.

традиционной параметризацией ослабления света с глубиной (3) дает результат ближе к измеренному со спутника.

В весеннее время – наоборот, результаты моделирования превышают фактические данные (результаты измерений). Примерно то же самое наблюдается в летнее время, за исключением области в центре восточного циклонического круговорота. Осенью модель также занижает концентрацию поверхностного хлорофилла-«а» в восточной части моря, при этом картина распределения его возле западного берега получается более реалистичной при использовании оптической модели.

**Заключение.** В задачах мониторинга морской среды с использованием моделирования большое значение имеет точность воспроизведения моделью реального состояния морской среды. Применительно к задачам контроля состояния экосистемы большое значение имеет правильное описание распределения коротковолновой радиации в верхнем слое моря, непосредственно влияющее на биологическую продуктивность. Проведенные расчеты с моделью экосистемы Черного моря показали, что вид параметризации распределения светового излучения в толще моря заметно влияет на получаемые в результате моделирования поля. Особенно это существенно для района северо-западного шельфа, где оптические свойства воды сильно отличаются от открытой части моря. Результаты, полученные с использованием двух различных параметризаций затухания света с глубиной, заметно разнятся. Помимо количественной разницы наблюдаются также изменения в сезонном ходе параметров экосистемы.

выше весеннего. Другое заметное отличие состоит в том, что в расчете с традиционной параметризацией затухания света (3) весной наблюдаются два пика, а в другом расчете – лишь один, расположенный между первыми двумя. Таким образом, сезонный ход концентрации фитопланктона существенно различается для приведенных двух расчетов.

На рис. 8 приведены изображения осредненных за сезон полей концентрации поверхностного хлорофилла-«а» для 1999 г., полученные по результатам двух расчетов и на основе спутниковых данных [11].

Их анализ показывает, что в зимнее время оба варианта расчета по модели дают заниженные значения поверхностного хлорофилла-«а», но вариант с

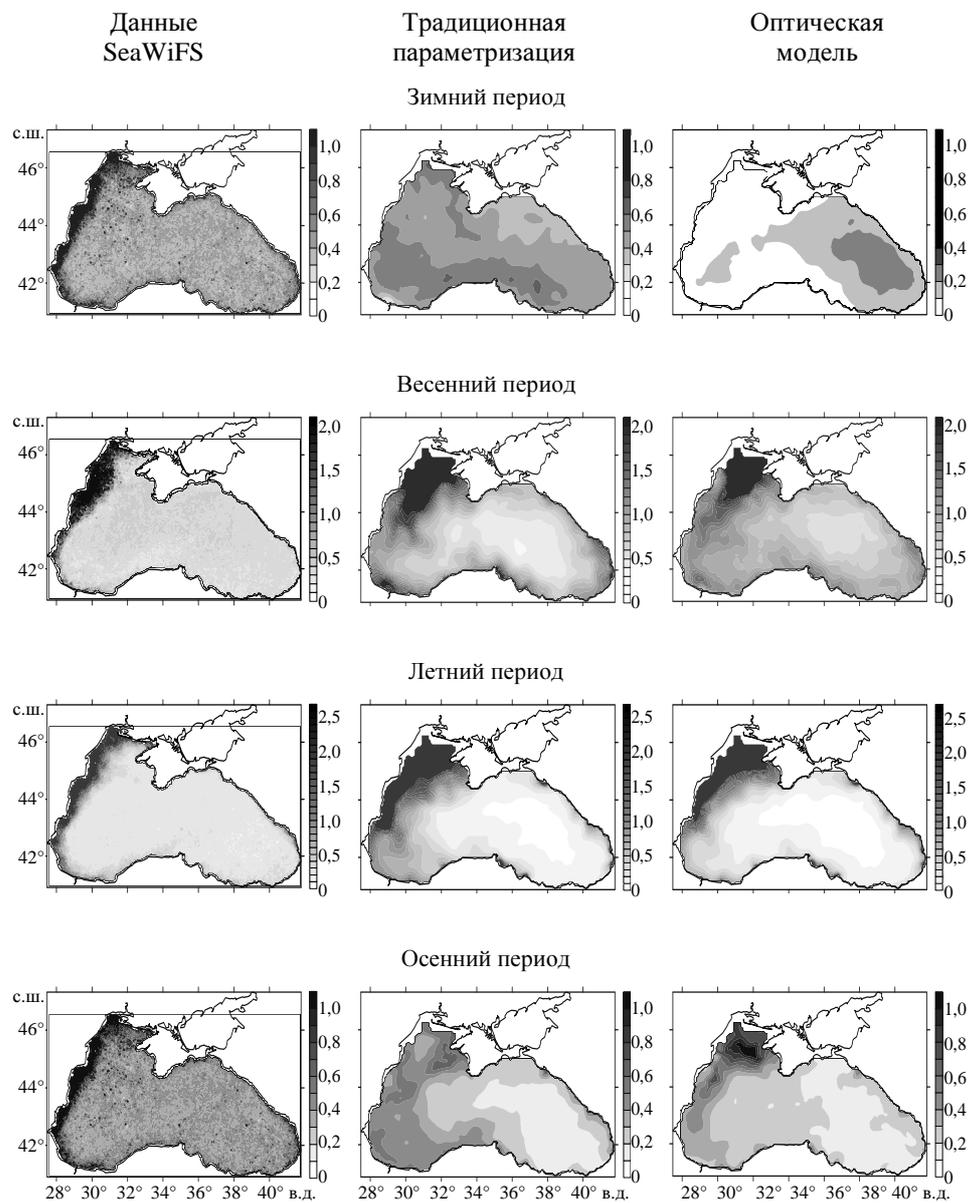
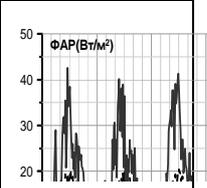


Рис. 8. Среднее за сезон распределение поверхностного хлорофилла-«а» ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) по данным спутниковых измерений *SeaWiFS* (левый ряд изображений) и по результатам расчетов с использованием традиционной параметризации (средний ряд изображения) и оптической модели (правый ряд изображений). Горизонтальные ряды изображений соответствуют (сверху вниз) зимнему, весеннему, летнему и осеннему сезонам.



Нами в представленной работе в качестве первого шага использовался упрощенный вариант биооптической модели с климатическими среднемесячными определяющими параметрами. В дальнейшем для более точного описания биологических полей необходимо применять оптическую модель с параметрами, соответствующими текущему состоянию морской среды.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта «MyOcean».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Сухих Л.И.* Трехмерная динамика экосистемы Черного моря (численное моделирование) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2009. – вып. 19. – С. 203-215.
2. *Kubryakov A., Suslin V., Churilova T., Korotaev G.* Effects of Penetrative Radiation on the Upper Layer Black Sea Thermodynamics / Thesis of the MyOcean Science days 2010, Toulouse. Сайт «MyOcean» (Ocean Monitoring and Forecasting) [Электронный ресурс]. [http://mercator-myoceanv2.netaktiv.com/MSD\\_2010/Abstract/Abstract\\_KUBRYAKOVA\\_MSD\\_2010.doc](http://mercator-myoceanv2.netaktiv.com/MSD_2010/Abstract/Abstract_KUBRYAKOVA_MSD_2010.doc) (Проверено 01.07.2011).
3. *Platt, T., C. Caverhill, S. Sathyendranath.* Basin scale estimates of ocean primary production by remote sensing: The North Atlantic // J. Geophys. Res. – 1991. – v. 96, № С8. – P. 15147-15159.
4. *Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Сосик Х.М.* Спектральная модель подводной облученности в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 6. – С. 33-46.
5. *Суслин В.В., Чурилова Т.Я.* Упрощенный метод расчета спектрального диффузного коэффициента ослабления света в верхнем слое Черного моря на основе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2010. – вып. 22. – С. 47-60.
6. *Версия данных R2009.1.* Сайт «Ocean Color Data. [Электронный ресурс] [http://ocean.data.sci.gsfc.nasa.gov/MODISA/Mapped/Monthly\\_Climatology/4km/Kd](http://ocean.data.sci.gsfc.nasa.gov/MODISA/Mapped/Monthly_Climatology/4km/Kd) (Проверено 25.12.2009).
7. *Кныш В.В., Кубряков А. И., Инюшина Н. В. и др.* Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в  $\sigma$ -координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солености // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – вып. 16. – С. 243-265.
8. *Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К.* Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря. // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 1. – С. 52-68.
9. *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. – v. 1, № 46. – P. 597-636.
10. *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. – v. 14, № 4. – P. 1331-1352.
11. *Сайт «Black Sea Color».* [Электронный ресурс]. <http://blackseacolor.com/> (Проверено 07.07.2011).

Материал поступил в редакцию 22.10.2010 г.

После переработки 08.06.2011 г.