

ИЗУЧЕНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ЭКОСИСТЕМЫ ЧЕРНОГО МОРЯ
НА ОСНОВЕ АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ В ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ¹

© 2019 г. В. Л. Дорофеев¹, Л. И. Сухих^{1,*}

¹Морской гидрофизический институт РАН
Севастополь 299011 Россия, ул. Капитанская, 2

*E-mail: l.sukhikh@gmail.com

Поступила в редакцию 20.01.2016 г.

После доработки 11.08.2017 г.

Принята к публикации 29.09.2017 г.

Представлены результаты моделирования динамики экосистемы Черного моря с помощью трехмерной междисциплинарной модели. Важная особенность моделирования – ассимиляция данных измерений спутниковых цветковых сканеров. Расчет проводился на пятнадцать лет, начиная с 1998 г. В результате получен набор трехмерных биогеохимических полей Черного моря на регулярной сетке и дискретностью по времени 1 сут. Проведен анализ основных биогеохимических параметров морской экосистемы. Качество полученных полей оценивается путем сравнения с имеющимися данными *in situ* измерений.

Ключевые слова: морская экосистема, моделирование, ассимиляция данных.

DOI: 10.31857/S0321-059646158-69

ВВЕДЕНИЕ

Черное море – практически замкнутый водоем; оно соединяется со Средиземным морем системой узких проливов. Уникальная в силу своей замкнутости экосистема Черного моря за последние десятилетия подверглась значительной трансформации. В работах [9, 19–21] на основе качественного анализа биогеохимических измерений описаны эти изменения, связанные как с климатическими условиями региона, так и с антропогенной нагрузкой, вызванной стоками рек. С 1960-х гг. экосистема Черного моря претерпела существенную перестройку по биомассе, таксономическому составу и структуре групп планктона. В верхнем слое моря произошли также изменения сезонных циклов основных компонентов экосистемы. В частности, естественный годовой цикл фитопланктона с ве-

сенним и осенним цветением сменился более сложным, характеризующимся несколькими максимумами. Эти трансформации структуры пищевой цепи сопровождались изменениями вертикальной гидрохимической структуры вод моря.

Наряду с анализом доступных данных биологических измерений достаточно давно начались работы по математическому моделированию динамики экосистемы Черного моря. Изменчивость морской экосистемы и ее реорганизация в течение разных периодов изучалась с помощью одномерных междисциплинарных моделей [11, 13, 15, 16, 18]. Одномерные модели позволили достичь общего качественного соответствия между модельными вертикальными распределениями биогеохимических параметров и вертикальными распределениями, полученными по данным наблюдений. Кроме того, они дали возможность достоверно описывать сезонную изменчивость параметров экосистемы. Однако особенности динамики Черного моря и главным образом интенсивная синоптическая изменчивость существенно влияют на биогеохимические процессы, один

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 “Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений” (“Оперативная океанология”).

из них — перенос течениями богатых биогенными элементами вод северо-западного шельфа (СЗШ) моря. На изображениях Черного моря, полученных с помощью спутниковых цветковых сканеров, видно, что перенос продуктивных вод вдоль западного берега моря поддерживает повышенные концентрации хлорофилла вблизи Анатолийского побережья. Неоднородности распределения цвета моря, связанные с изменениями продуктивности вод бассейна, обусловлены синоптическими вихрями, меандрами основного Черноморского течения и филаментами, формирующимися в процессе трансфронтального переноса. Учесть все эти явления и их влияние на морскую экосистему можно только с помощью трехмерных моделей. Такие модели созданы и использовались для изучения поведения экосистемы Черного моря, в том числе ее длительной эволюции [2, 5, 10, 12, 14].

Появление регулярных измерений спутниковыми цветковыми сканерами внесло новый значительный вклад в изучение морских экосистем, позволив получать поверхностные распределения концентрации пигмента хлорофилла-*a*, что особенно важно для задач мониторинга окружающей среды. Вместе с тем существенный недостаток этих данных — большое количество их пропусков из-за наличия облачности, особенно в зимнее время. Один из перспективных способов решить эту проблему — ассимиляция данных измерений в математические модели морской среды. При этом использование трехмерных моделей позволяет, помимо заполнения пробелов в данных, обусловленных облачностью, экстраполировать эти данные с поверхности в глубину моря. Данная работа посвящена изучению изменчивости экосистемы Черного моря на основе ассимиляции спутниковых измерений в трехмерной математической модели.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Трехмерная модель экосистемы Черного моря представляет собой междисциплинарную модель, в которую входят блок, описывающий циркуляцию вод Черного моря, и биогеохимический блок, описывающий взаимодействие между различными компонентами экосистемы на нижнем уровне пищевой цепи. В качестве модели циркуляции в Черном море использовалась модель, разработанная в Морском гидрофизическом институте [1], — z -уровневая модель, основанная на аппроксимации системы примитивных уравнений динамики океана

и включающая в себя уравнения для горизонтальных компонент скорости течения, переноса—диффузии тепла и соли, неразрывности и гидростатики. Позже модель была переведена на сетку с шагом 4.8 км, что позволило помимо крупномасштабной циркуляции достаточно аккуратно описывать синоптические процессы (радиус деформации Кибеля—Россби для первой бароклинной моды в глубоководной части Черного моря равен ~25 км) [3, 14]. Используемый в работе вариант модели содержит 35 расчетных уровней, сгущающихся к морской поверхности, где дискретность равна 5 м. Вертикальная турбулентная диффузия и вязкость параметризуются с помощью коэффициентов, зависящих от глубины и времени.

Биогеохимический блок модели экосистемы Черного моря включает в себя 15 переменных состояния и описывает процессы в верхнем 200-метровом слое моря. Шаг по пространству и расчетные горизонты соответствуют модели циркуляции. В горизонтальной плоскости расчетная сетка имеет шаг 4.8 км, по вертикали модель экосистемы имеет 18 расчетных уровней в z -координатах, сгущающихся к поверхности моря. Биологическую часть представляют две группы фитопланктона (диатомовые и флагелляты), две размерные группы зоопланктона: микрозоопланктон (<0.2 мм) и мезозоопланктон (0.2—3.0 мм), медуза *Aurelia aurita* и гребневик *Mnemiopsis leidyi*. В пищевую цепь входят, кроме того, нефотосинтезирующий бактериопланктон, растворенная и взвешенная органика, а также всеядная динофлагеллята *Noctiluca scintillans*. Единственным биогенным элементом, лимитирующим рост фитопланктона, в данной модели рассматривается азот. Азотный цикл включает в себя три неорганических соединения: аммоний, нитраты и нитриты. Все перечисленные компоненты экосистемы в модели измеряются в мМ N/м^3 . В качестве отдельных переменных состояния в модель также входят растворенные кислород и сероводород. Временная эволюция компонентов экосистемы описывается уравнениями переноса—диффузии (1), включающими в правую часть слагаемые типа источник—сток:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(vF)}{\partial y} + \frac{\partial((w+w_s)F)}{\partial z} = \\ = K_h \nabla^2 F + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial F}{\partial z} \right) + R(F) \end{aligned} \quad (1)$$

$R(F)$ описывает биогеохимические взаимодействия между переменными состояния F ; w_s — скорость седиментации диатомовых водорослей и взвешенной органики (для остальных компо-

нентов она равна нулю); u , v , w – компоненты скорости течений; K_h , K_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно.

Члены правой части уравнения (1) типа источник–сток $R(F)$ для биологической части модели аналогичны тем, которые использовались в одномерной модели [17].

$$R(P_d) = (1-\chi)\sigma_d\Phi f_p(T)P_d - G_S(P_d)H_S - G_I(P_d)H_I - G_n(P_d)Z_n - \lambda_d P_d; \quad (2)$$

$$R(P_f) = (1-\chi)\sigma_d\Phi f_p(T)P_f - G_S(P_f)H_S - G_I(P_f)H_I - G_n(P_f)Z_n - \lambda_f P_f; \quad (3)$$

$$R(H_S) = \gamma_S[G_S(P_f)+G_S(P_d)+G_S(P_n)+G_S(B)]H_S - G_I(H_S)H_I - G_a(H_S)Z_a - G_m(H_S)Z_m - G_n(H_S)Z_n - \mu_S H_S - \lambda_S H_S^2; \quad (4)$$

$$R(H_I) = \gamma_I[G_I(P_f)+G_I(P_d)+G_I(P_n)+G_I(H_S)+G_I(Z_n)]H_I - G_a(H_I)Z_a - G_m(H_I)Z_m - \mu_I H_I - \lambda_I H_I^2; \quad (5)$$

$$R(Z_n) = \gamma_n[G_n(P_f)+G_n(P_d)+G_n(H_S)+G_n(P_n)]Z_n - G_I(Z_n)H_I - \mu_n Z_n - \lambda_n Z_n; \quad (6)$$

$$R(Z_a) = \gamma_a[G_a(H_S)+G_a(H_I)]Z_a - \mu_a Z_a - \lambda_a Z_a; \quad (7)$$

$$R(Z_m) = \gamma_m[G_m(H_S)+G_m(H_I)]Z_m - \mu_m Z_m - \lambda_m Z_m; \quad (8)$$

$$R(B) = [G_b(D_n)+G_b(P_n)]B - G_S(B)H_S - \mu_b B, \quad (9)$$

где P_d и P_f – концентрации диатомовых и флагеллят групп фитопланктона; H_S , H_I – концентрации микро- и мезозоопланктона соответственно; Z_n – *Noctiluca scintillans*; Z_a – *Aurelia aurita*; Z_m – *Mnemiopsis leidyi*; B – концентрация бактериопланктона; G_i (G_j) – члены уравнений, описывающие питание i -м потребителем j -й компоненты F_j ; $f_p(T)$ – температурная лимитирующая функция; Φ – минимум от световой и азотной лимитирующих функций; χ – коэффициент эксудации; γ_i – эффективность ассимиляции; λ_i – коэффициент смертности; μ_i – коэффициент экскреции.

Соответствующие члены уравнения, выражающие концентрации взвешенного P_n и растворенного D_n органического вещества, нитрата $[\text{NO}_3]$, нитрита $[\text{NO}_2]$, аммония $[\text{NH}_4]$, растворенного кислорода $[\text{O}_2]$ и сероводорода $[\text{H}_2\text{S} \cdot \text{H}_2\text{S}]$ выбраны в соответствии с работой [18]:

$$R(P_n) = (1-\gamma_S[G_S(P_d)+G_S(P_f)+G_S(B)]H_S + (1-\gamma_I[G_I(P_f)+G_S(P_d)+G_I(H_S)+G_I(Z_n)]H_I + (1-\gamma_n[G_n(P_f)+G_n(P_d)+G_n(H_S)]Z_n + (1-\gamma_a[G_a(H_S)+G_a(H_I)]Z_a + (1-\gamma_m[G_m(H_S)+G_m(H_I)]Z_m + [\lambda_d+\lambda_f+\lambda_S H_S^2+\lambda_n Z_n+\lambda_a Z_a+\lambda_m Z_m] - [\gamma_S G_S(P_n)H_S+\gamma_I G_I(P_n)H_I+\gamma_n G_n(P_n)Z_n + G_b(P_n)B] - \varepsilon[f_n(\text{O}_2)+f_n(\text{O}_2)]P_n; \quad (10)$$

$$R(D_n) = \chi\Phi f_p(T)(\sigma_f P_f + \sigma_d P_d) + (1-\kappa)\varepsilon[f_n(\text{O}_2)+f_n(\text{O}_2)]P_n; \quad (11)$$

$$R(\text{NO}_3) = \kappa_2 f_n(\text{O}_2)[\text{NO}_2] - \kappa_3 f_d(\text{O}_3)[\text{NO}_3] - \beta_n/\beta_I \Phi f_p(T)(\sigma_f P_f + \sigma_d P_d) - \alpha_9 P_9[\text{H}_2\text{S}][\text{NO}_3]; \quad (12)$$

$$R(\text{NO}_2) = \kappa_1 f_n(\text{O}_2)[\text{NH}_4] - \kappa_2 f_n(\text{O}_3)[\text{NO}_2] + \kappa_3 f_d(\text{O}_2)[\text{NO}_3] - \kappa_4 f_d(\text{O}_2)[\text{NO}_2]; \quad (13)$$

$$R(\text{NH}_4) = \kappa\varepsilon[f_n(\text{O}_2)+f_n(\text{O}_2)]P_n - \beta_n/\beta_I \Phi f_p(T)(\sigma_f P_f + \sigma_d P_d) + \mu_S H_S + \mu_I H_I + \mu_n Z_n + \mu_a Z_a + \mu_m Z_m + \mu_b B + \kappa_I f_n(\text{O}_2)[\text{NH}_4]; \quad (14)$$

$$R(\text{O}_2) = \alpha_0 \Phi f_p(T)(\sigma_f P_f + \sigma_d P_d) - \alpha_b \varepsilon f_n(\text{O}_2)P_n - \alpha_I \kappa_I f_n(\text{O}_2)[\text{NH}_4] - \alpha_2 \kappa_2 f_n(\text{O}_2)[\text{NO}_2] - \alpha_5 \kappa_5 [\text{O}_2][\text{H}_2\text{S}]; \quad (15)$$

$$R(\text{H}_2\text{S}) = \kappa_5 [\text{O}_2][\text{H}_2\text{S}] - \kappa_5 [\text{H}_2\text{S}][\text{NO}_3], \quad (16)$$

где α_i – стехиометрический коэффициент, k_i – скорости реакций, κ – коэффициент деминерализации детрита в аммоний, ε – скорость разложения детрита, β_α и β_n – лимитирующие функции для аммония и нитратов, $\beta_\tau = \beta_\alpha + \beta_n$, $f_n \text{O}_2$ и $f_d \text{O}_2$ – лимитирующие функции, контролирующие аэробное и анаэробное разложение детрита.

Поля скоростей течений, температура, соленость и коэффициенты турбулентного перемешивания, входящие в качестве коэффициентов в уравнение (1), обеспечиваются моделью циркуляции. В данном исследовании связь модели циркуляции с биогеохимической моделью осуществлялась в режиме off line, т.е. сначала рассчитывались необходимые гидрофизические поля, затем они использовались для моделирования эволюции параметров морской экосистемы. При расчете циркуляции Черного моря ассимилировались спутниковые данные по температуре воды на поверхности моря и аномалиям уровня моря, что повысило точность полученных гидрофизических полей [6].

Граничные условия на поверхности моря задавались в виде нулевых потоков всех перемен-

ных состояния, кроме кислорода. В глубоководной части Черного моря на нижней границе (горизонт 200 м) ставились условия Дирихле (нулевые значения концентраций для всех компонентов экосистемы, кроме аммония и сероводорода). Для дна мелководной части моря приняты условия отсутствия потоков для всех компонентов экосистемы, кроме взвешенной органики и диатомовых водорослей, оседающих на дно. Такие же условия отсутствия потоков ставились на боковых границах, за исключением устьев крупных рек, где задавались потоки питательных веществ, пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока.

Важная особенность настоящей работы – ассимиляция в модели экосистемы Черного моря данных измерений, полученных со спутниковых цветковых сканеров. На основе продуктов SeaWiFS, MODIS и MERIS по разработанному специально для Черного моря алгоритму подготовлены двухнедельные поля поверхностных концентраций хлорофилла-*a* [7, 8]. Далее значения концентраций хлорофилла-*a* были пересчитаны в концентрации фитопланктона, выраженные в мМ N/м³, по известным соотношениям между концентрацией хлорофилла-*a* и содержанием органического азота в морском фитопланктоне. Процедура ассимиляции основана на принципе релаксации полей, полученных по модели, к данным, подготовленным по изображениям сканеров. В правую часть уравнения (1) для двух компонент фитопланктона добавляется слагаемое типа источник–сток, зависящее от разности измеренной концентрации и полученной по модели:

$$1/\tau (P_s - \vartheta_i P_i(0)), \quad (17)$$

где P_s – данные спутниковых измерений, $P_i(0)$ – концентрация одной из двух компонент фитопланктона на поверхности моря, ϑ_i – вес соответствующей компоненты в суммарной концентрации, τ – коэффициент релаксации. Про-

цедура обновления слагаемого (17) проводится раз в сутки; соответственно, значение коэффициента релаксации равно суткам. Для того чтобы устранить появление или убыль в системе дополнительного азота, вызванного источником (17), аналогичный источник противоположного знака вводится в уравнение для нитратов. В отличие от (17), он работает на всех горизонтах, его амплитуда пропорциональна величине концентрации на данной глубине, а интегральное действие равно по величине суммарному действию источников в уравнениях для фитопланктона. Подробно алгоритм ассимиляции описан в работе [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет по модели экосистемы Черного моря проводился на срок 15 лет – с 1998 по 2012 г. Такой выбор объясняется тем, что данные, полученные со световых сканеров, стали доступны лишь с сентября 1997 г. Изменчивость средней за год биомассы фито- и зоопланктона в верхнем 50-метровом слое моря приведена на рис. 1. В целом биомасса фитопланктона на рассматриваемом промежутке времени уменьшается, соответственно падает биомасса зоопланктона, который питается фитопланктоном. В Черном море основное питательное вещество, обеспечивающее рост биомассы фитопланктона, – нитраты. Они поступают в поверхностный слой моря со стоком рек в основном на северо-западном шельфе и в глубоководной части моря из нижележащих слоев, имеющих максимальную концентрацию нитратов. Второй механизм насыщения фотической зоны моря нитратами действует в основном в зимнее время в период интенсивного ветрового и конвективного перемешивания. На рис. 2 показана зависимость от времени средней по площади бассейна концентрации нитратов на поверхности моря и в верхнем 50-метровом слое, который примерно со-

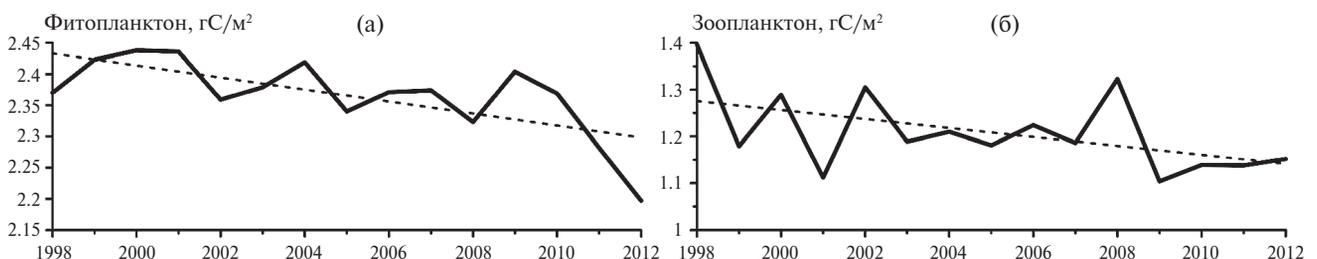


Рис. 1. Изменчивость среднегодовых значений биомассы фитопланктона (а) и зоопланктона (б) в верхнем 50-метровом слое воды в Черном море, вычисленная по результатам моделирования за период 1998–2012 гг.

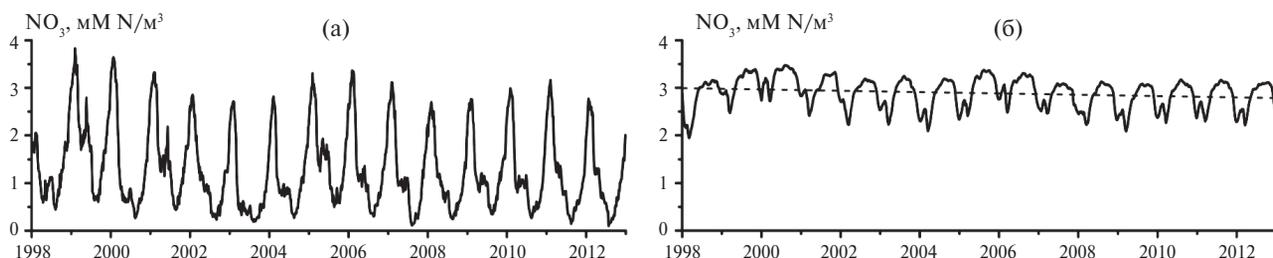


Рис. 2. Графики изменения средней поверхностной концентрации нитратов (а) и средней концентрации в верхнем 50-метровом слое воды в Черном море, полученные по результатам моделирования (б).

ответствует толщине фотической зоны Черного моря.

Графики изменения поверхностной концентрации нитратов имеют ярко выраженные пики в зимнее время, обусловленные поступлением нитратов из слоя максимума к поверхности в глубоководной части моря. Значительные величины поверхностной концентрации в летнее время обеспечиваются выносом рек. Ход средней концентрации в 50-метровом слое отличается от описанного выше. Средняя концентрация нитратов имеет минимум в начале года, что вызвано зимне-весенним цветением фитопланктона, во время которого потребляется максимальное количество нитратов. В целом за рассматриваемый 15-летний период средняя концентрация нитратов имеет отрицательный линейный тренд и, как следствие, уменьшаются биомассы фитопланктона и зоопланктона (рис. 1).

Внутригодовую изменчивость параметров экосистемы в верхнем слое Черного моря можно рассмотреть на основе климатических дан-

ных, полученных путем осреднения по 15 годам рассчитанных полей. Более подробно остановимся на распределении нитратов и суммарного фитопланктона. Эти два параметра экосистемы Черного моря выбраны из-за того, что первый — основное питательное вещество в системе, а фитопланктон — продуцент. На рис. 3 представлен годовой ход средней по площади бассейна концентрации нитратов и суммарного фитопланктона в верхнем слое Черного моря, полученный по результатам моделирования.

Максимум концентрации нитратов наблюдается на глубине ~80 м. Выше и ниже расположены слои верхнего и нижнего нитроклина. В зимнее время благодаря интенсивному перемешиванию максимум концентрации заметно падает за счет переноса большого количества нитратов к поверхности моря; соответственно, растет поверхностная концентрация. В остальные сезоны поверхностная концентрация нитратов в глубоководной части моря мала. В это время значения средней концентрации нитратов на поверхности (см. рис. 3) заметные за счет

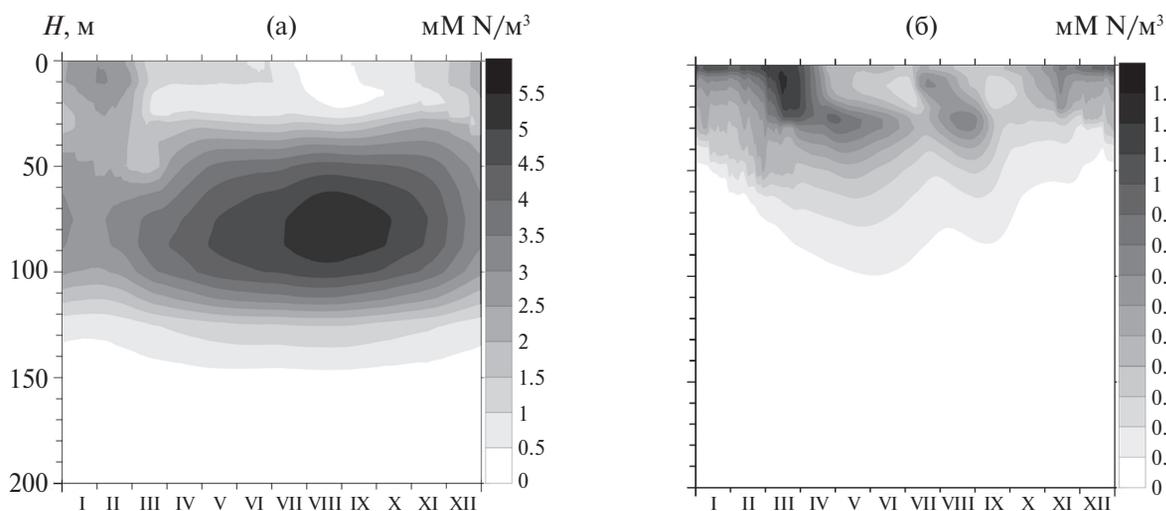


Рис. 3. Сезонный ход концентрации нитратов (а) и фитопланктона в верхнем слое моря (б), полученный по результатам моделирования. I–XII — месяцы года.

влияния северо-западного шельфа моря, где количество нитратов велико в течение всего года из-за их поступлений с реками. На рис. 4 представлены средние профили нитратов для всех сезонов (черная сплошная линия соответствует зиме, черная пунктирная – весне, серая сплошная – лету, серая пунктирная – осени) для глубоководной части Черного моря и СЗШ. В глубоководной части моря максимум сохраняется примерно на одной и той же глубине для всех сезонов, а концентрация нитратов на поверхности близка к нулю, за исключением зимы. На шельфе поверхностная концентрация сохраняет большие значения в течение всего года, причем в зимнее время профиль распределения нитратов имеет максимум на поверхности.

Из-за высокой концентрации питательных веществ, в зимнее время происходит интенсивное цветение фитопланктона на поверхности моря, которое в весеннее время с увеличением интенсивности солнечного света опускается в более глубокие слои. Затем интенсивность поступления нитратов в поверхностный слой моря из нижележащих слоев ослабевает и максимум концентрации фитопланктона опускается на глубину ~30 м (летний подповерхностный максимум). В конце осени – начале зимы максимальные концентрации фитопланктона вновь наблюдаются на поверхности моря. Причем, согласно рис. 4, если в глубоководной части профили распределения концентраций фитопланктона соответствуют описанной выше схеме, то на шельфе максимум концентрации наблюда-

ется в приповерхностном слое для всех сезонов. Это объясняется достаточно высоким содержанием нитратов на шельфе и более высокой освещенностью поверхностного слоя по сравнению с нижележащими слоями.

Распределение нитратов и фитопланктона на поверхности Черного моря для четырех сезонов, полученное путем осреднения за 15 лет, показано на рис. 5 и 6.

Максимальные концентрации нитратов наблюдаются в зимний сезон, когда они значительны и в глубоководной части бассейна. В летнее время большие концентрации заметны только на СЗШ возле устьев рек, впадающих в Черное море. В глубоководной части моря поверхностная концентрация нитратов близка к нулю. В осенний сезон повышенное содержание нитратов наблюдается вдоль всего западного берега. Это происходит за счет переноса богатых биогенами вод северо-западного шельфа Основным черноморским течением.

Зимне-весеннее цветение фитопланктона определяет его максимальную поверхностную концентрацию в зимний период. В этот сезон высокие значения отслеживаются по всей акватории Черного моря. Поверхностная концентрация фитопланктона в глубоководной части бассейна ненамного ниже, чем на шельфе. Похожая картина наблюдается и во время осеннего цветения. Весной и особенно летом поверхностная концентрация фитопланктона в глубоководной части Черного моря резко отличается от его концентрации на СЗШ, где она существенно боль-

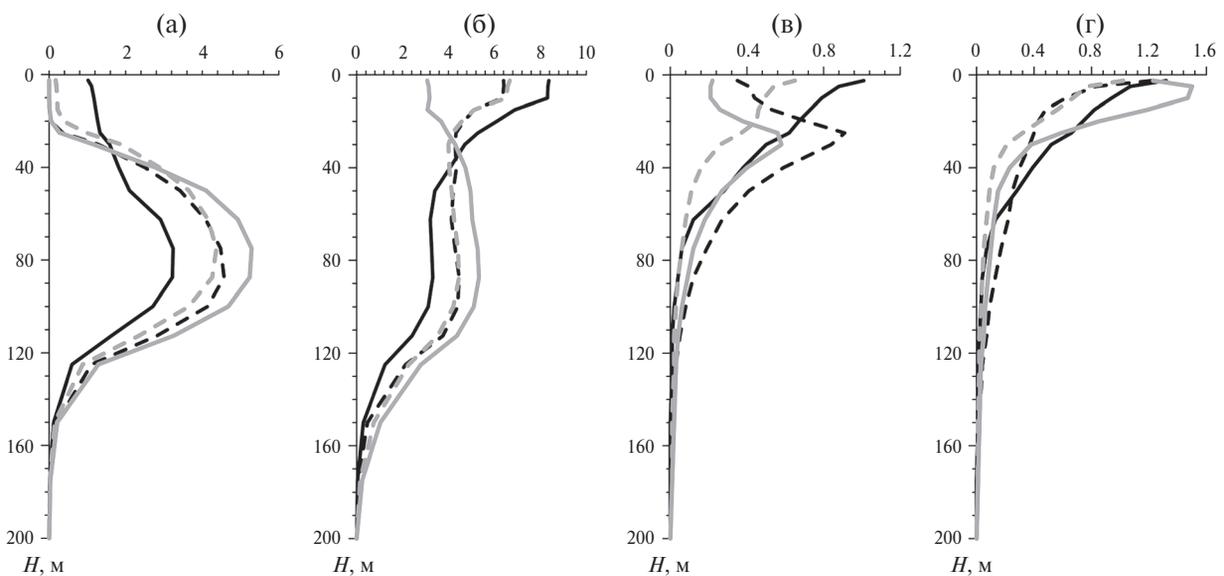


Рис. 4. Климатические профили распределения средних по площади концентраций нитратов (а, б) и фитопланктона (в, г). Профили (а) и (в) соответствуют глубоководной части Черного моря, (б) и (г) – северо-западному шельфу.

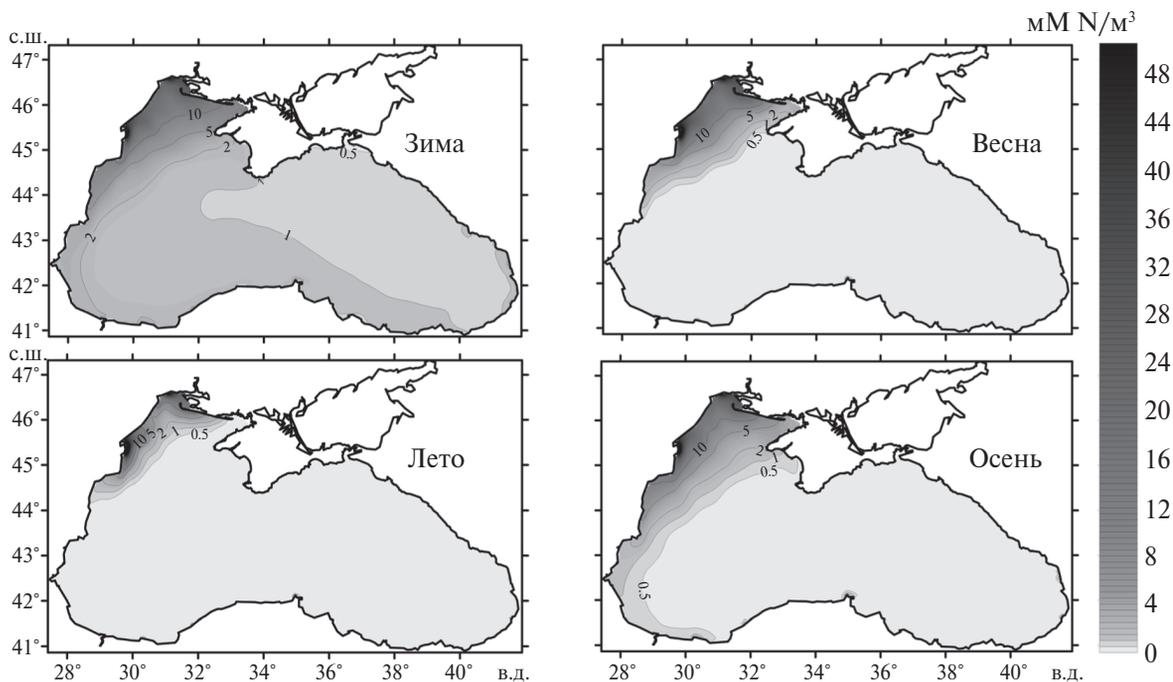


Рис. 5. Климатические распределения поверхностной концентрации нитратов для четырех сезонов.

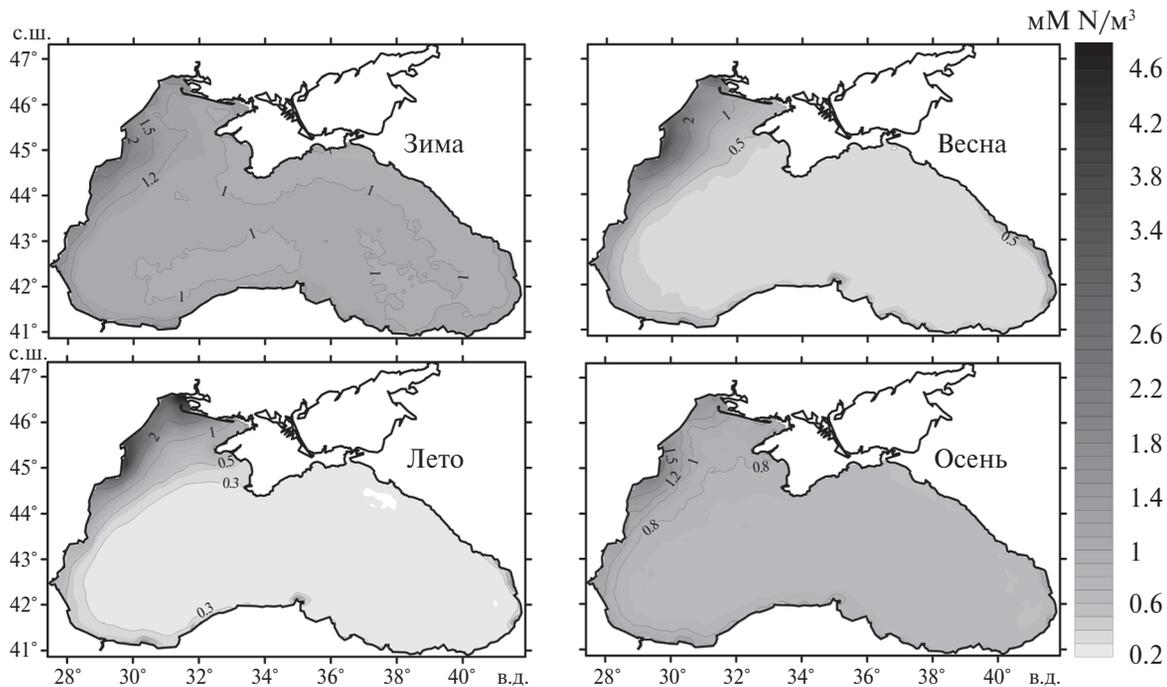


Рис. 6. Климатические распределения поверхностной концентрации фитопланктона для четырех сезонов.

ше. Повышенные концентрации в эти сезоны прослеживаются также вдоль западного берега, куда биопродукция выносится циклоническим течением с северо-западного шельфа.

На рис. 7 и 8 представлены зональные распределения концентраций нитратов и фито-

планктона на основе полученных по результатам моделирования климатических полей.

Основной элемент вертикальной структуры распределения нитратов (рис. 7) — максимум концентрации на глубине ~80 м, который прослеживается во все сезоны и вдоль всего разре-

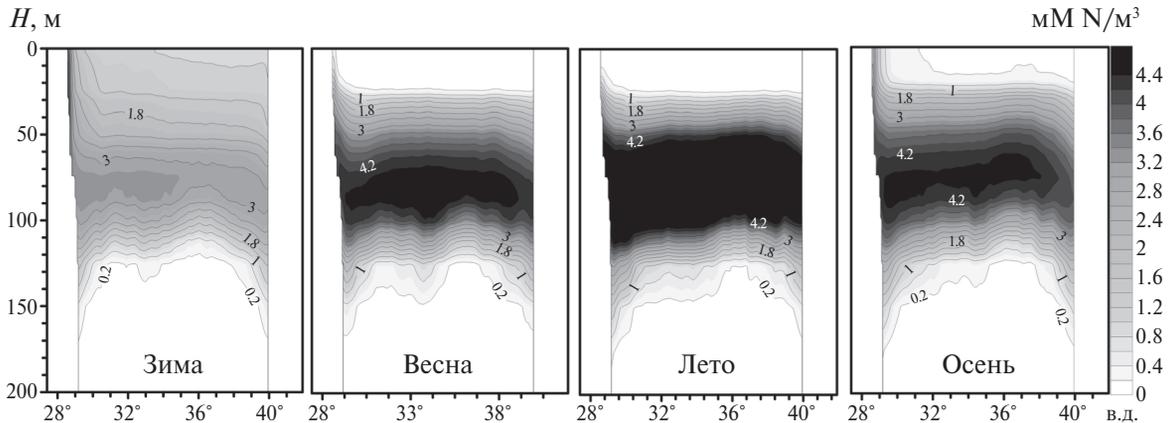


Рис. 7. Зональные распределения концентрации нитратов для четырех сезонов.

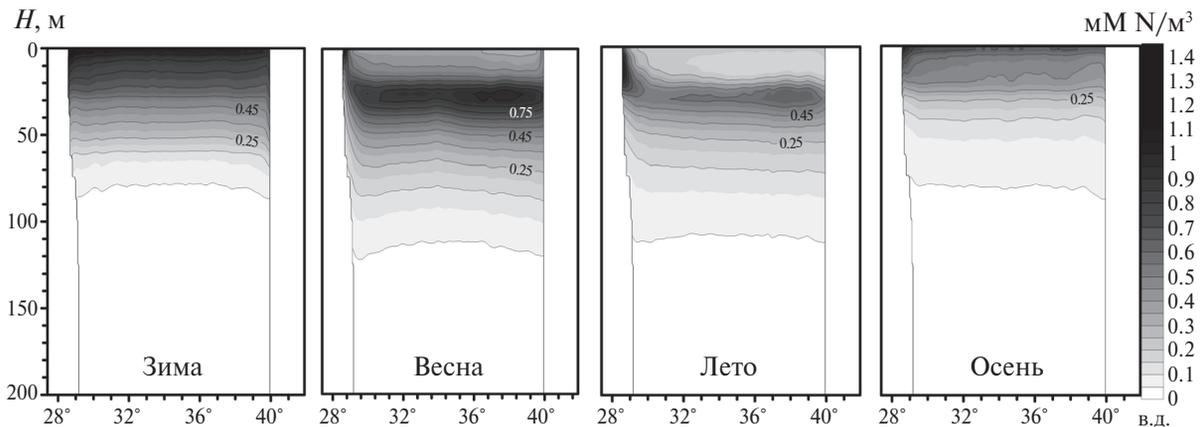


Рис. 8. Зональные распределения концентрации фитопланктона для четырех сезонов.

за. Летом этот максимум достигает наибольшей величины. В зимний сезон из-за интенсивного перемешивания содержание нитратов в приповерхностном слое выравнивается с содержанием нитратов в более глубоких слоях. Следует отметить также повышение концентрации в верхнем слое моря возле западного берега, вызванное стоком рек на СЗШ, главным образом Дуная. Другая особенность распределения нитратов – опускание изолиний нижнего нитроклина возле берегов, что вызвано поднятием вод в центре бассейна, что в свою очередь вызвано крупномасштабной циклонической циркуляцией в Черном море.

Распределение фитопланктона на разрезе в зимний и осенний сезоны имеет монотонный характер: концентрация повышается к поверхности моря до максимальных значений. Весной и летом максимум концентрации фитопланктона опускается на глубину ~30 м, что связано с увеличением световой радиации на глубине и уменьшением концентрации нитратов в приповерхностном слое глубоководной части моря. В эти сезоны также наблюдается увеличение

концентрации фитопланктона в поверхностном слое моря возле западного берега (рис. 8).

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ

Для оценки качества полученных по результатам моделирования биогеохимических полей необходимо сравнить их с соответствующими данными измерений. Биологических данных *in situ* в Черном море за рассматриваемый период было приведено немного. Авторы статьи использовали для этих целей междисциплинарную океанографическую базу данных для Черного моря, составленную в рамках проекта NATO “Science for Stability TU-Black Sea project”. Для сравнения с результатами моделирования использовались наиболее представленные данные *in situ* измерений кислорода, нитратов и хлорофилла-*a*. На рис. 9 приведена карта с обозначенными положениями станций, на которых проводились измерения этих параметров и которые далее были использованы для сравнения (часть данных от-

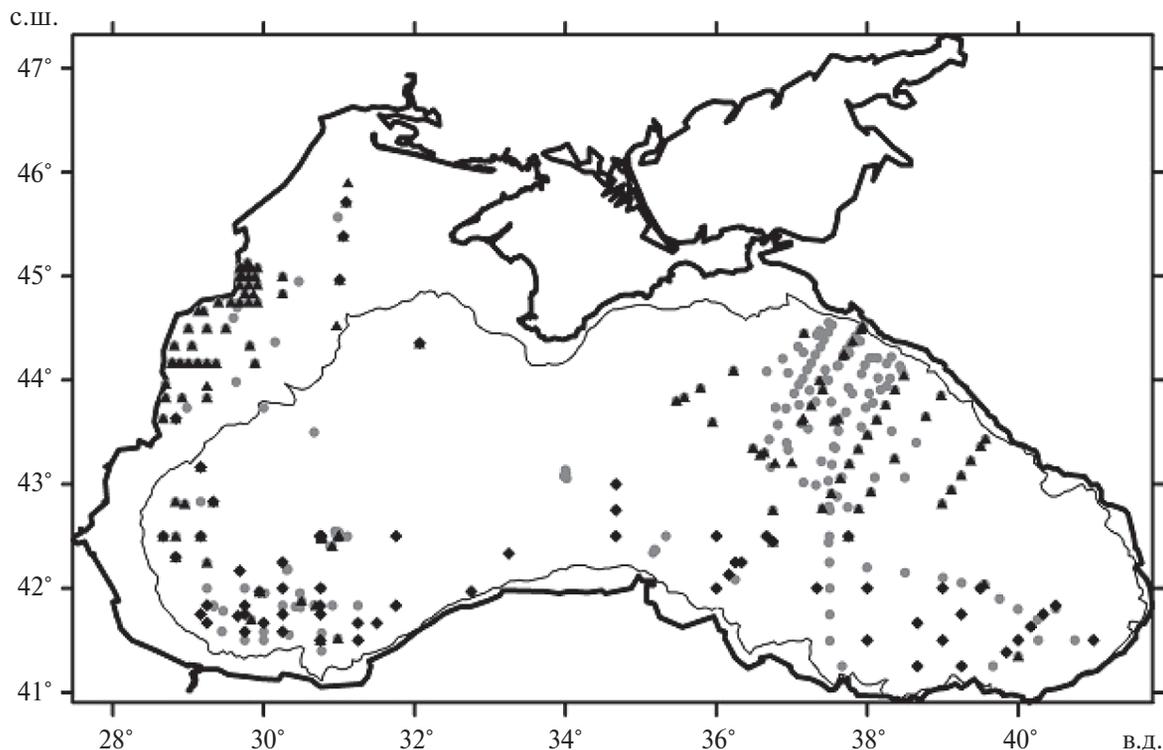


Рис. 9. Места выполнения измерений концентрации кислорода (серые кружки), нитратов (треугольники) и хлорофилла-*a* (квадратики). Линия внутри бассейна Черного моря – изобата 200 м.

бракована). Результаты моделирования интерполировались по пространству и по времени в те точки пространства и времени, где имелись данные измерений. Больше всего имеется данных измерений по кислороду, меньше всего – по хлорофиллу-*a*.

На рис. 10 представлены профили концентрации кислорода, полученные по данным измерений, и соответствующие им профили, полученные по результатам моделирования для глубоководной части моря и СЗШ. Также представлены профили среднего и среднеквадратич-

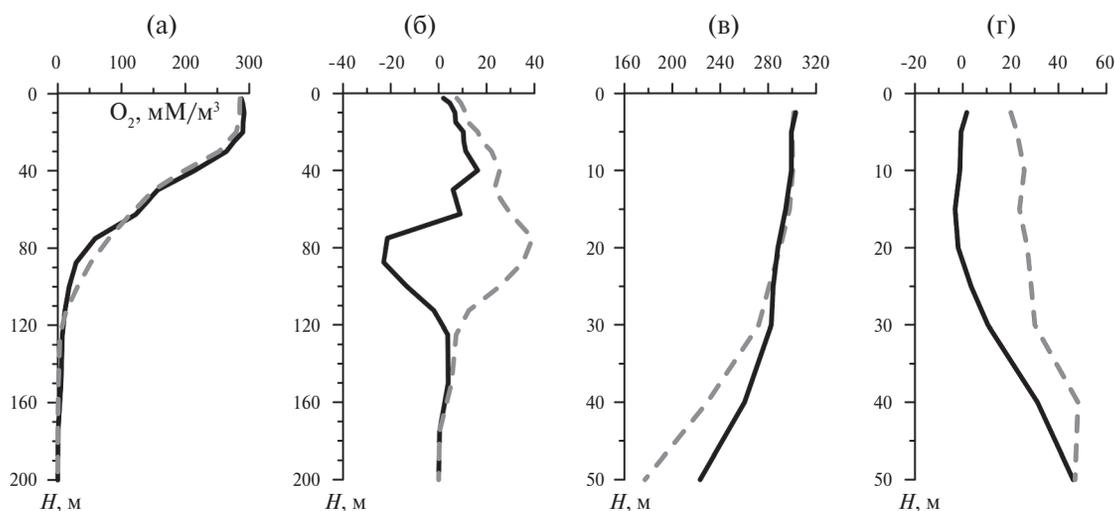


Рис. 10. Профили концентрации кислорода, полученные по данным измерений (сплошная линия), и соответствующие им профили, полученные по результатам моделирования (пунктир), для глубоководной части моря (а) и СЗШ (в); б и г – соответствующие профили среднего отклонения (сплошная линия) и среднеквадратичного отклонения (пунктир).

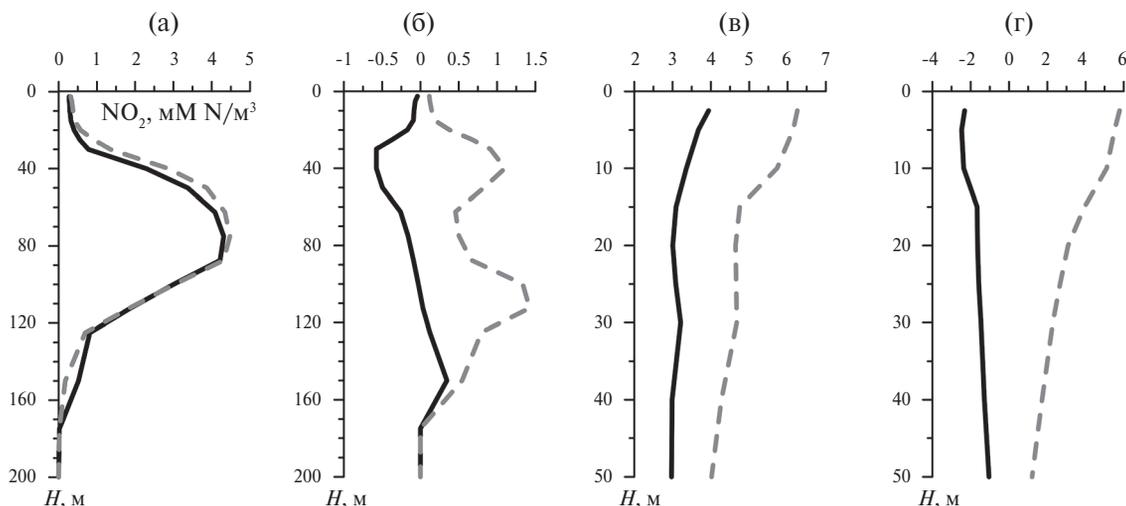


Рис. 11. Профили концентрации нитратов, полученные по данным измерений (сплошная линия), и соответствующие им профили, полученные по результатам моделирования (пунктир), для глубоководной части моря (а) и СЗШ (в); б и г – соответствующие профили среднего отклонения (сплошная линия) и среднеквадратичного отклонения (пунктир).

ного отклонения модельных значений от измеренных.

Для глубоководной части моря профили концентрации кислорода, полученные по результатам измерений и моделирования, достаточно близки между собой до глубины ~70 м, затем среднее отклонение модельного профиля от измеренного резко возрастает. Это происходит из-за того, что оксиклин, по результатам моделирования, шире в этом месте, чем по данным измерений. На шельфе средние профили практически совпадают до глубины ~30 м, затем расходятся.

На рис. 11 представлены профили распределения нитратов и отклонений данных измерений от результатов моделирования для глубоководной и шельфовой частей Черного моря. Для глубоководной части средний профиль концентрации нитратов, полученный по результатам моделирования, достаточно близок к профилю, полученному по данным измерений. Основное отличие в том, что верхний нитроклин по модельным данным расположен несколько выше, чем по данным измерений. Это приводит к систематической ошибке, как видно на рис. 11б. Среднеквадратичное отклонение имеет два максимума на горизонтах 40 и 110 м. Эти горизонты соответствуют средним положениям верхнего и нижнего нитроклинов. Хотя в средних профилях они достаточно близки, а нижние нитроклины по результатам моделирования и по данным измерений практически совпадают, большие градиенты концентрации нитратов даже при незначительных ошибках в положении нитро-

клина приводят к значительным величинам среднеквадратичного отклонения. На СЗШ концентрации нитратов систематически превышают величины, полученные по данным контактных измерений. Это, по-видимому, объясняется неточным заданием количества поступающих со стоком рек нитратов, которое известно только оценочно.

Следующий параметр, по которому проводилось сравнение результатов моделирования с данными измерений, – хлорофилл-*a*. Модельные концентрации хлорофилла пересчитывались из суммарной концентрации фитопланктона. На рис. 12 приведены средние профили и отклонения модельных значений хлорофилла-*a* от данных измерений для глубоководной части Черного моря. Данные для шельфа практически отсутствуют, поэтому они не анализируются. Профиль концентрации хлорофилла-*a*, полученный по результатам моделирования, довольно близок к профилю, полученному по данным измерений. Наибольшие среднеквадратичные отклонения наблюдаются у поверхности и на горизонте 20 м. На поверхности эта ошибка вызвана, по-видимому, тем, что ассимилируемые спутниковые данные – это композиция за две недели, поэтому они сглажены. Данные контактных измерений, с которыми сравниваются результаты моделирования, могут содержать элементы мелкомасштабной изменчивости, которые пропадают в используемых спутниковых данных. Максимум на глубине 20 м связан с тем, что в весенний и летний сезоны (когда было выполнено основное количество измерений) на

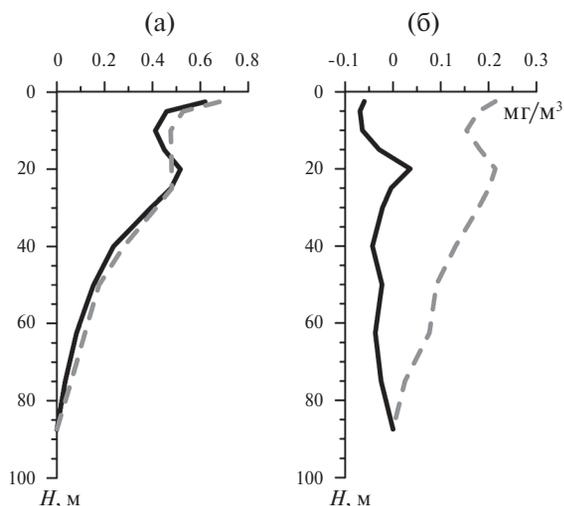


Рис. 12. Профили концентрации хлорофилла, $\text{мг}/\text{м}^3$, полученные по данным измерений (сплошная линия), и соответствующие им профили, полученные по результатам моделирования (пунктир), для глубоководной части моря (а); соответствующие профили среднего отклонения (сплошная линия) и среднеквадратичного отклонения (пунктир) (б).

этой глубине наблюдаются максимальные градиенты концентрации фитопланктона (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты изучения динамики экосистемы Черного моря за 15-летний период — с 1998 по 2012 г. Исследуемые биогеохимические поля на регулярной сетке получены с использованием трехмерной модели нижнего пищевого уровня морской экосистемы с ассимиляцией данных спутниковых цветковых сканеров.

Результаты анализа выявили межгодовые изменения параметров экосистемы в верхнем слое Черного моря. Биомассы фитопланктона и зоопланктона имеют отрицательный линейный тренд, который сопровождается уменьшением содержания нитратов в поверхностном слое. Анализ сезонной изменчивости параметров экосистемы проведен на основе климатических полей концентраций нитратов и фитопланктона, полученных осреднением по всему периоду моделирования. Он показал, что результаты численного моделирования качественно правильно описывают сезонный ход и пространственное распределение основных параметров экосистемы Черного моря.

Проведено сравнение полученных полей с доступными данными измерений концентраций кислорода, нитратов и хлорофилла-*a*. Это

сравнение показало, что полученные в результате моделирования параметры экосистемы Черного моря не только качественно, но и количественно согласуются с имеющимися данными измерений. Наибольшее несоответствие между результатами моделирования и данными измерений наблюдается на шельфе. Это связано в первую очередь с недостаточной точностью величин задаваемых потоков нитратов в местах впадения рек в Черное море. Другой причиной может быть неточность воспроизведения гидродинамических полей на шельфе моделью циркуляции. В глубоководной части моря наибольшие ошибки возникают для горизонтов, на которых наблюдаются максимумы градиентов соответствующих параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьшев 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.
2. Дорофеев В.Л. Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 6. С. 71–81.
3. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К. Валидация результатов моделирования циркуляции Черного моря на основе данных всплывающих буев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 11. С. 63–74.
4. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Суетин В.С., Сухих Л.И. Ассимиляция спутниковых изображений цвета моря в междисциплинарной модели экосистемы Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 16. С. 323–332.
5. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Сухих Л.И. Исследование долговременной изменчивости полей Черного моря с использованием междисциплинарной физико-биогеохимической модели // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 1–11.
6. Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Изучение долговременной изменчивости динамики Черного моря на основе ассимиляции дистанционных измерений в модели циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 254–264.
7. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Джулай А. и др. Региональный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла-*a* и коэффициента поглощения света неживым органическим веществом на длине волны 490 нм в Черном море для спектральных каналов

- цветовых сканеров MODIS и MERIS // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 303–319.
8. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла-*a* в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS // Морской экол. журн. 2008. № 2. С. 24–42.
 9. Daskalov G.M. Long-term changes in fish abundance and environmental indices in the Black Sea // Marine Ecol. Progress Ser. 2003. 255. P. 259–270.
 10. Grergoire M., Friedrich J. Nitrogen budget of the north-western Black Sea shelf as inferred from modeling studies and in-situ benthic measurements // Marine Ecol. Progress Ser. 2004. 270. P. 15–39.
 11. Grergoire M., Lacroix G. Exchange processes and nitrogen cycling on the shelf and continental slope of the Black Sea basin // Global Biogeochem. Cycles. 2003. 17. P. 4201–4217.
 12. Grergoire M., Nezhlin N., Kostianoy A., Soetaert K. Modeling the nitrogen cycling and plankton productivity in an enclosed environment (the Black Sea) using a three-dimensional coupled hydrodynamical–ecosystem model // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. C05007. DOI: 10.1029/2001JC001014.
 13. Grergoire M., Raick C., Soetaert K. Numerical modeling of the central Black Sea ecosystem functioning during the eutrophication phase // Progress in Oceanography. 2008. 76. P. 286–333.
 14. Korotaev G. K., Oguz T., Dorofeyev V.L. et al. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Sci. 2011. 7. P. 1–21.
 15. Lancelot C., Staneva J., Van Eeckhout D. et al. Modelling the danube-influenced north-western continental shelf of the Black Sea. II: ecosystem response to changes in nutrient delivery by danube river after its damming in 1972 // Estuarine, Coastal and Shelf Sci. 2002. 54. P. 473–499.
 16. 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. V. 46. P. 597–636.
 17. 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 Biogeochem. Cycles. 2000. V. 14. № 4. P. 1331–1352.
 18. 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. V. 106. № C3. P. 4543–4564.
 19. Oguz T., Gilbert D. Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960e2000: evidence for regime shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations // Deep-Sea Res. 2007. Pt 1. V. 54. P. 220–242.
 20. Oguz T., Velikova V. Abrupt transition of the northwestern Black Sea shelf ecosystem from a eutrophic to an alternative pristine state // Marine Ecol. Progress Ser. 2010. 405. P. 231–242.
 21. Zaitsev Y.P., Mamaev V. Marine Biological Diversity in the Black Sea: A Study of Change and Decline // GEF Black Sea Environmental Programme. N. Y.: United Nations Publ., 1997. 208 p.

A STUDY OF LONG-TERM CHANGES IN BLACK SEA ECOSYSTEMS BASED ON DATA ASSIMILATION OF REMOTE MEASUREMENTS IN A NUMERICAL MODEL

V. L. Dorofeev¹, L. I. Sukhikh^{1,*}

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, 299011 Russia

*E-mail: l.sukhikh@gmail.com

Received: 20.01.2016

Received version received: 11.08.2017

Accepted: 29.09.2017

Herein, we present a simulation of the dynamics of Black Sea ecosystems using a three-dimensional interdisciplinary model that assimilates satellite color scanner measurements. Calculations were performed for the fifteen years from 1998 and a set of 3-d biogeochemical fields of the Black Sea were generated on a regular grid with a discreteness time of 1 day. Analyses of core biogeochemical parameters of the marine ecosystem were then performed. The qualities of received fields were evaluated using comparisons with existing data from *in situ* measurements.

Key words: marine ecosystem, simulation, data assimilation.

DOI: 10.31857/S0321-059646158-69