

Научная статья

УДК 551.043
EDN: FEZUCA

DOI: 10.29039/0233-7584-2023-2-266-284

Влияние параметризации вертикальной турбулентной диффузии на результаты моделирования динамики биомассы фитопланктона в глубоководной части Черного моря

В. Л. Дорофеев, Л. И. Сухих ✉

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ l.sukhikh@gmail.com

Поступила в редакцию 31.05.2022; одобрена после рецензирования 15.08.2022;
принята к публикации 16.01.2023.

Аннотация

Цель. Изучено влияние вертикальных процессов перемешивания в Черном море на распределение и динамику основных компонентов морской экосистемы на основе численного моделирования.

Методы и результаты. Использовались два варианта модели нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря, отличающиеся способом параметризации процессов вертикальной турбулентной диффузии. В первом варианте коэффициенты диффузии представляются в виде функций, зависящих от глубины и времени. При этом зависимость от времени является сезонной. Во втором варианте для описания процессов вертикального обмена к модели циркуляции добавлена турбулентная модель. Биогеохимические части моделей, состоящие из 15 компонентов, в обоих вариантах используют одинаковые уравнения, коэффициенты и функции, описывающие взаимодействия между различными компонентами экосистемы в верхнем 200-метровом слое моря. По обоим вариантам модели экосистемы были проведены расчеты на срок 12 лет с 1998 по 2009 г., результаты которых сравнивались. Для сравнения результатов моделирования распределения нитратов с данными измерений использовались *in situ* измерения в глубоководной части Черного моря из междисциплинарной океанографической базы данных. Кроме того, произведено сравнение результатов моделирования с поверхностной концентрацией хлорофилла, полученной по спутниковым измерениям.

Выводы. Сезонная изменчивость основных параметров экосистемы для этих расчетов различается незначительно, при этом параметризация вертикальной турбулентной диффузии оказывает определенное влияние на вертикальное распределение параметров экосистемы. Межгодовая изменчивость характеризуется уменьшением биомассы в фотической зоне глубоководной части моря для обоих расчетов, вызванным отрицательным трендом количества биогенов, поступающих с реками. Среднегодовые концентрации в верхнем слое моря, соответствующие первому расчету, выше, чем в расчете с использованием турбулентной модели. Это связано с тем, что вертикальная ячейка циркуляции, формирующаяся за счет циклонической завихренности поля ветра над Черным морем, для первого расчета получается более интенсивной. Поступление нитратов в фотическую зону из нижележащего слоя обеспечивается главным образом адвекцией, а не турбулентной диффузией.

Ключевые слова: морская экосистема, циркуляция, Черное море, турбулентная диффузия, модель экосистемы, биогенные элементы, концентрация хлорофилла

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 0827-2021-0002.

© Дорофеев В. Л., Сухих Л. И., 2023

Для цитирования: Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Влияние параметризации вертикальной турбулентной диффузии на результаты моделирования динамики биомассы фитопланктона в глубоководной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 2. С. 266–284. EDN FEZUCA. doi:10.29039/0233-7584-2023-2-266-284

Original article

Impact of Parameterization of Vertical Turbulent Diffusion on the Results of Simulating the Phytoplankton Biomass Dynamics in the Deep Part of the Black Sea

V. L. Dorofeev, L. I. Sukhikh ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ l.sukhikh@gmail.com

Abstract

Purpose. The paper is purposed at studying the impact of vertical mixing processes in the Black Sea on distribution and dynamics of the basic components of marine ecosystem based on numerical simulation.

Methods and Results. Two variants of the model of the food chain lower level in the Black Sea ecosystem differing in the way of parameterizing the processes of vertical turbulent diffusion were used. In the first variant, the diffusion coefficients are represented as the functions depending on depth and time. At that, the time dependence is of seasonal character. In the second variant, in order to describe the vertical exchange processes, the turbulent model was added to the circulation one. In both versions, the biogeochemical parts of the models consisting of 15 components include the same equations, coefficients, and functions describing the interactions between different ecosystem components in the upper 200-meter layer of the sea. The calculations for 12 years (1998–2009) were done for both versions of the ecosystem model, and the results were compared. The results of modeling the nitrates distribution were compared with the *in situ* measurements in the deep part of the Black Sea taken from the interdisciplinary oceanographic database. Besides, the results of simulating the chlorophyll surface concentration were also compared with the analogous satellite-derived measurement results.

Conclusions. As for the above-noted calculations, seasonal variability of the basic ecosystem parameters is insignificantly different, at that the parameterization of vertical turbulent diffusion produces a certain effect upon the vertical distribution of ecosystem parameters. Interannual variability in both calculations is characterized by a biomass decrease in the photic zone of the sea deep part resulted from a negative trend in the amount of nutrients inflowing with the river waters. The annual average concentrations in the sea upper layer corresponding to the first calculation are higher than those obtained in the calculation by the turbulent model. This is related to the fact that the vertical circulation cell formed due to the wind field cyclonic vorticity over the Black Sea results to be more intense for the first calculation. The nitrates entering into the photic zone from the underlying layer is provided mainly by advection rather than turbulent diffusion.

Keywords: marine ecosystem, circulation, Black Sea, turbulent diffusion, ecosystem model, nutrients, chlorophyll concentration

Acknowledgments: The study was carried out with support of project No. 0827-2021-0002.

For citation: Dorofeev, V.L. and Sukhikh, L.I., 2023. Impact of Parameterization of Vertical Turbulent Diffusion on the Results of Simulating the Phytoplankton Biomass Dynamics in the Deep Part of the Black Sea. *Physical Oceanography*, 30(2), pp. 245–262. doi:10.29039/1573-160X-2023-2-245-262

Введение

При моделировании динамики и состояния морской экосистемы большое значение имеет качество используемых гидродинамических полей, которые являются входными параметрами уравнений биогеохимической части модели

экосистемы. Важнейшими гидродинамическими процессами, влияющими на обмен компонентами экосистемы между различными слоями и регионами моря, являются процессы адвекции и диффузии, с помощью которых питательные вещества переносятся от их источников в остальную акваторию.

Одним из основных таких источников являются стоки рек. Около двух третей поступающей с реками в бассейн Черного моря воды приходится на северо-западный шельф (СЗШ). При этом площадь его, по сравнению с площадью всего Черного моря, незначительна (примерно 16 %) [1]. Из-за этого в водах СЗШ наблюдается повышенное содержание биогенных веществ и, как следствие, биопродукции. С помощью водообмена, вызванного адвекцией и горизонтальной диффузией в поверхностном слое моря, происходит проникновение этих вод с шельфа в центральные районы Черного моря.

Поступление питательных веществ в поверхностный слой глубоководной части Черного моря происходит не только за счет поступления шельфовых вод, но в значительной степени вследствие процессов вертикального обмена, которые особенно существенны в зимний сезон, когда к поверхности поднимается большое количество нитратов из слоя нитроклина. Такой транспорт нитратов обеспечивается в основном двумя физическими процессами: вертикальной адвекцией и турбулентной диффузией, величина которой в моделях зависит от способа параметризации коэффициентов диффузии. Важность процессов вертикальной диффузии для правильного воссоздания вертикальной структуры параметров экосистемы отмечалась в ряде работ по моделированию морских экосистем [2–5].

Целью работы является изучение влияния вертикальных процессов перемешивания в Черном море на распределение и динамику основных компонентов морской экосистемы на основе выполненных расчетов. Для выполнения этой задачи были проведены два расчета длительной эволюции (с 1998 по 2009 г.) экосистемы с использованием двух способов параметризации вертикальной турбулентной диффузии. Результаты проведенных расчетов затем сравнивались между собой. Работа является продолжением цикла исследований [6, 7].

Материалы и метод исследования

Проведенные численные эксперименты были выполнены с использованием двух вариантов трехмерной модели нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря. Оба варианта моделей экосистемы можно разделить на две основные части: 1) гидродинамическая модель (модель циркуляции), которая описывает динамику и термодинамику вод бассейна; 2) модель биогеохимических процессов, которая описывает взаимодействие между различными компонентами модели экосистемы. Гидродинамические модели, использованные в работе, представляют собой конечно-разностный аналог системы примитивных уравнений динамики океана. В качестве основы для обоих вариантов гидродинамической модели взята модель циркуляции, разработанная для Черного моря [8]. Это z -уровневая модель, с шагом 4,8 км по горизонтали, что позволяет достаточно аккуратно описывать, помимо крупномасштабной циркуляции, и синоптические процессы (радиус деформации Кибеля – Россби для первой бароклинной моды в глубоководной части Черного моря равен ~ 25 км) [1].

Первый вариант модели содержит 35 расчетных уровней по вертикали, сгущающихся к морской поверхности, где дискретность равна 5 м. Вертикальная турбулентная диффузия и вязкость параметризуются с помощью квазистационарных коэффициентов, зависящих от глубины. Зависимость от времени является сезонной. Для адекватного описания гидродинамических процессов в море большое значение имеют граничные условия на свободной поверхности моря. В данной работе в качестве таких условий применялись двумерные атмосферные поля возле подстилающей поверхности, полученные по результатам реанализа *ERA-Interim* [9]. Для повышения точности выходных продуктов модели циркуляции (поля скоростей течений, температура и соленость) во время расчетов ассимилировались спутниковые альтиметрические данные и измерения температуры поверхности моря [10].

Второй вариант модели циркуляции Черного моря отличался от первого параметризацией вертикального турбулентного обмена. Для более аккуратного описания процессов вертикального обмена к модели циркуляции была добавлена турбулентная модель квазиравновесной турбулентной энергии *QETE* [11], входящая в семейство моделей Меллора – Ямады [12]. Эта модель состоит из двух уравнений эволюции турбулентной энергии $q^2/2$ и масштаба турбулентности l . Кроме того, в этом варианте модели использовалось 40 расчетных горизонтов [13]. Горизонтальная сетка, атмосферное воздействие и ассимиляция спутниковых данных были такими же, как в первом варианте.

Биогеохимические части обоих вариантов модели представляют собой систему из пятнадцати (по числу переменных состояния) уравнений переноса – диффузии:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial(uC_i)}{\partial x} + \frac{\partial(vC_i)}{\partial y} + \frac{\partial((w + w_s)C_i)}{\partial z} = K_h \nabla^2 C_i + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + R, \quad (1)$$

где u, v, w – компоненты скоростей течений; w_s – скорость седиментации диатомовых водорослей и взвешенной органики (для остальных компонентов она равна нулю); K_h, K_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно; R описывает биогеохимические взаимодействия между переменными состояния C_i , ммольN/м³.

К числу переменных состояния относятся 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*, нефотосинтезирующий бактериопланктон, растворенная и взвешенная органика, всеядная динофлагеллята *Noctiluca scintillans*. В данной модели азот считается единственным биогенным элементом, лимитирующим рост фитопланктона. Азотный цикл включает также три неорганических соединения: нитраты, нитриты и аммоний. В модель также входят в качестве отдельных переменных состояния растворенные сероводород и кислород.

Расчетная область по горизонтали совпадает с соответствующей областью для моделей циркуляции (соответственно совпадают шаги сетки), а по вертикали занимает верхние 200 метров Черного моря. При этом расчетные гори-

зонты соответствуют моделям циркуляции. В первом варианте биогеохимическая часть модели экосистемы имеет 18 расчетных уровней, а во втором – 26 уровней.

Связь модели циркуляции с биогеохимической частью является в данной работе односторонней. То есть поля скоростей течений, температура, соленость и коэффициенты турбулентной диффузии, полученные по гидродинамической модели, используются для вычисления параметров биогеохимической модели в качестве коэффициентов системы уравнений (1). Обратное влияние параметров биогеохимической модели на гидродинамические поля отсутствует. Кроме того, расчет по модели экосистемы проводится в режиме *offline*: сначала рассчитываются и записываются необходимые гидрофизические поля по тому или иному варианту модели циркуляции (скорости течений, температура, соленость и коэффициенты турбулентной диффузии), затем они в качестве коэффициентов системы уравнения (1) используются в биогеохимической части модели (см. более подробно [6, 7]).

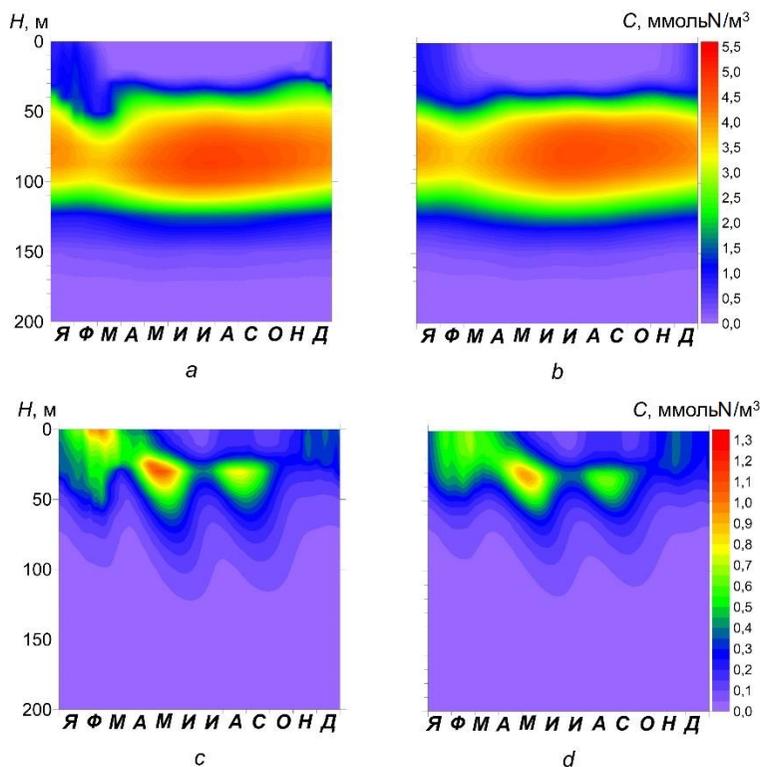
На границах расчетной области ставились следующие граничные условия: на верхней границе (поверхность моря) – нулевые потоки всех переменных состояния, кроме кислорода; на нижней границе в глубоководной части моря – условия Дирихле (нулевые значения концентраций для всех компонентов экосистемы, кроме аммония и сероводорода); на нижней границе в мелководной части моря, где границей расчетной области является дно, – условия отсутствия диффузных потоков для всех компонентов экосистемы. На боковых границах, за исключением устьев крупных рек, также ставились условия отсутствия диффузных потоков для всех компонентов экосистемы. В местах впадения крупных рек (Дунай, Днепр, Днестр, Южный Буг, Сакарья, Кызыл-Ирмак, Чорох, Риони) задавались потоки нитратов и аммония, пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока согласно работе [14].

Для оценки качества полученных результатов они сравнивались с данными дистанционных и контактных измерений. Использовалась поверхностная концентрация хлорофилла, рассчитанная В. В. Суслиным по спутниковым наблюдениям на основе алгоритма, разработанного для Черного моря с использованием коэффициента яркости в трех спектральных каналах [15]. Для сравнения распределения концентрации нитратов в глубоководной части Черного моря использовались образцы измерений в Черном море, собранные за 1998–2003 гг., размещенные в междисциплинарной океанографической базе данных в рамках проекта *NATO Science for Stability Program (TU-Black Sea)*.

Результаты

Анализировались результаты моделирования динамики экосистемы Черного моря за срок 12 лет с 1998 по 2009 г. В рассматриваемой модели экосистемы Черного моря нитраты являются основным питательным веществом, а фитопланктон – продуцентом первичной продукции, первым звеном пищевой цепи. Поэтому более подробно остановимся на анализе их распределения. Для сравнения внутригодовой изменчивости этих параметров экосистемы рассмотрим поля, полученные путем осреднения результатов двух расчетов по 12 годам. Диаграммы Ховмеллера, иллюстрирующие годовой ход средних по площади глубоководной части бассейна концентраций нитратов

и суммарного фитопланктона в верхнем 200-метровом слое Черного моря, полученных по результатам двух расчетов, представлены на рис. 1.



Р и с. 1. Внутригодовая изменчивость концентрации нитратов (*a, b*) и фитопланктона (*c, d*) в верхнем слое глубоководной части моря по результатам первого расчета (*a, c*), второго (*b, d*)

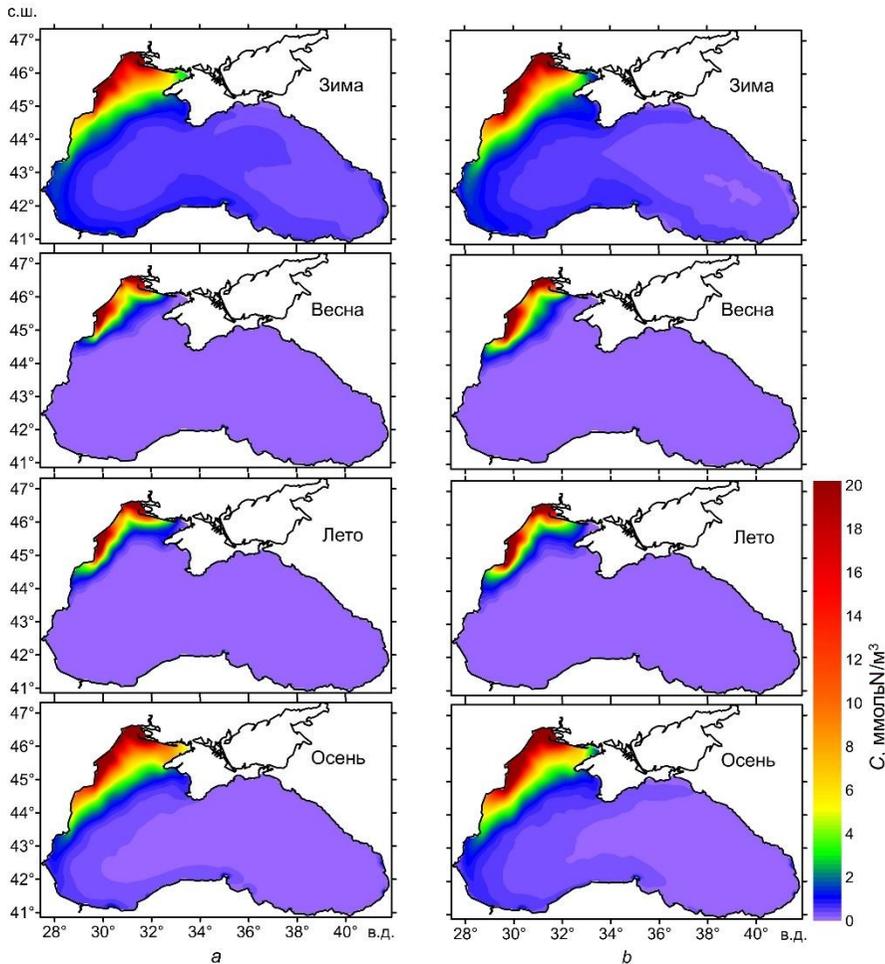
F i g. 1. Intra-annual variability of the nitrates (*a, b*) and phytoplankton (*c, d*) concentrations in the upper layer of the sea deep part based on the results of the first (*a, c*) and second (*b, d*) calculations

Для обоих расчетов в течение всего года максимум концентрации нитратов расположен на глубине примерно 80 м. Выше (в слое 40–60 м) и ниже (в слое 100–120 м) наблюдаются сильные градиенты концентрации нитратов (верхний и нижний нитроклины). В зимнее время значение максимума концентрации заметно уменьшается по сравнению с летним и осенним сезонами. В это время растет концентрация в поверхностном слое, которая в остальные сезоны в глубоководной части моря мала. Это происходит вследствие интенсивного зимнего перемешивания. Особенно отчетливо уменьшение максимума концентрации заметно в феврале.

Высокая концентрация питательных веществ в поверхностном слое Черного моря в зимнее время приводит к увеличению на поверхности моря биомассы фитопланктона, которая достигает максимума в феврале. Затем концентрация нитратов в поверхностном слое моря падает. В то же время интенсивность солнечного света на поверхности моря увеличивается и толщина слоя фотосинтеза растет. Максимум концентрации фитопланктона опускается на глубину примерно 25–30 м (летний подповерхностный максимум). В конце

года максимальные значения биомассы фитопланктона вновь смещаются к поверхности моря. Такая картина характерна для обоих расчетов. Различие заключается в том, что для расчета с турбулентной моделью значения максимумов концентрации фитопланктона ниже, чем для первого расчета ($0,65 \text{ ммольN/м}^3$ против $0,76 \text{ ммольN/м}^3$), а глубина залегания больше (32 м против 30 м).

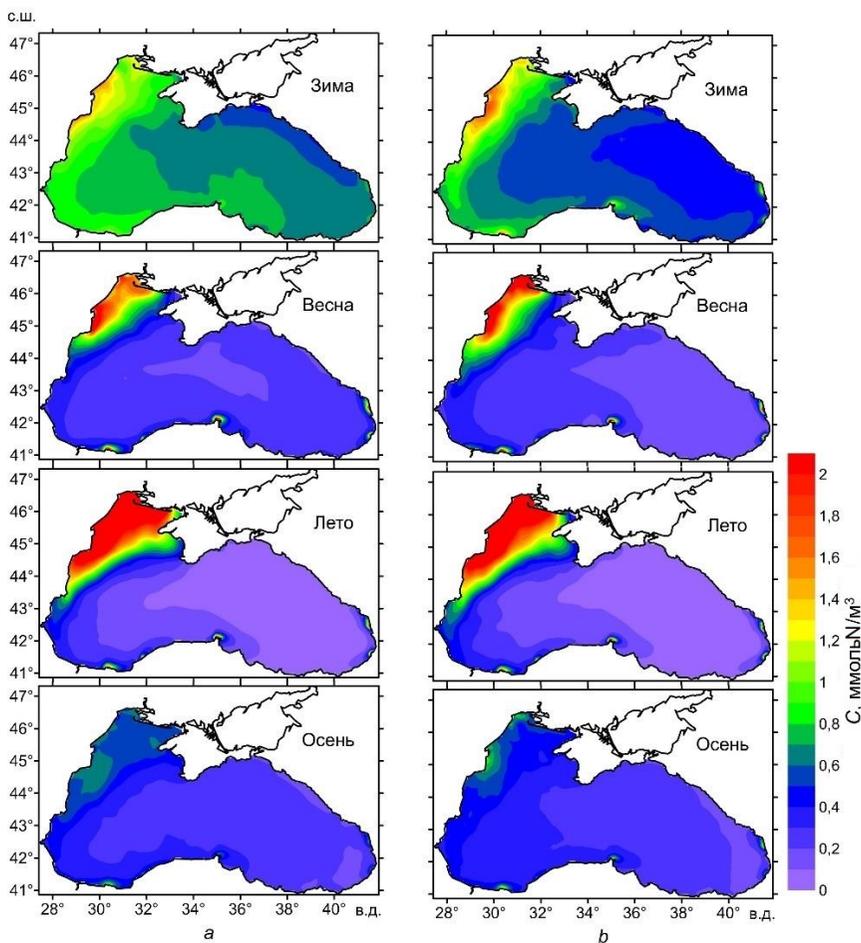
В обоих вариантах минимальные значения концентрации нитратов в слое максимума наблюдаются в феврале, когда процессы перемешивания в Черном море, вызванные штормами и термической конвекцией, наиболее интенсивны. При этом концентрация нитратов на поверхности остается невысокой из-за ассимиляции их фитопланктоном, который в это время имеет максимальную поверхностную концентрацию. В первом расчете минимум концентрации нитратов наблюдается более явно. Это происходит из-за того, что в этом расчете выше февральская концентрация фитопланктона.



Р и с. 2. Осредненные за 12 лет распределения поверхностных концентраций нитратов (ммольN/м^3) для четырех сезонов по результатам первого расчета (a) и второго (b)

F i g. 2. Distributions of the nitrates surface concentrations (mmolN/m^3) averaged over 12 years, for four seasons based on the results of the first (a) and second (b) calculations

Сезонные климатические распределения концентрации нитратов на поверхности Черного моря по результатам двух расчетов показаны на рис. 2. Зимой на всей поверхности моря, в том числе его глубоководной части, значения концентрации достаточно большие. В остальные сезоны – они ниже, особенно весной и летом, когда высокая концентрация наблюдается только на северо-западном шельфе, а в глубоководной части моря они близки к нулю. Осенью повышенное содержание нитратов отмечается не только на СЗШ, но и в западной глубоководной части Черного моря вдоль побережья. Это повышение содержания нитратов в глубоководной части моря происходит благодаря переносу ОЧТ богатых биогенными веществами вод с СЗШ.



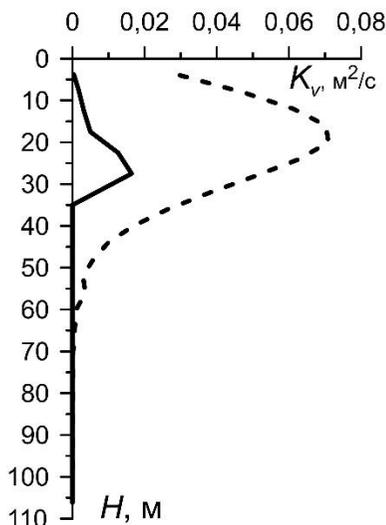
Р и с. 3. Осредненные за 12 лет распределения поверхностной концентрации фитопланктона ($\text{ммольN}/\text{м}^3$) для четырех сезонов по результатам первого расчета (*a*) и второго (*b*)
F i g. 3. Distributions of phytoplankton surface concentrations (mmolN/m^3) averaged over 12 years, for four seasons based on the results of the first (*a*) and second (*b*) calculations

На рис. 3 представлены карты распределения поверхностных концентраций фитопланктона, полученных по результатам двух расчетов для четырех сезонов. Внутри годового цикла, рассчитанного за двенадцатилетний период,
 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 2 2023 273

поверхностная концентрация фитопланктона достигает максимума в зимний сезон. Достаточно высокие значения в этот период наблюдаются по всей акватории Черного моря. В глубоководной части бассейна (особенно ее западной части) поверхностная концентрация ненамного ниже, чем на СЗШ.

В отличие от зимнего сезона, концентрация фитопланктона в поверхностном слое в глубоководной части Черного моря весной и особенно летом резко отличается от концентрации на северо-западном шельфе, где она на порядок выше. Летом можно также проследить повышенные значения биомассы фитопланктона вдоль западного и анатолийского побережий Черного моря, куда фитопланктон выносится циклоническим течением с СЗШ.

В зимнее время концентрация фитопланктона в поверхностном слое глубоководной части моря, полученная по расчету с использованием турбулентной модели, имеет меньшие значения, чем в первом расчете. Это можно объяснить тем, что турбулентное перемешивание в приповерхностном слое более интенсивно из-за больших значений коэффициента турбулентной диффузии (рис. 4) и, следовательно, концентрация фитопланктона распределена более однородно с глубиной, но ее величина на поверхности меньше.

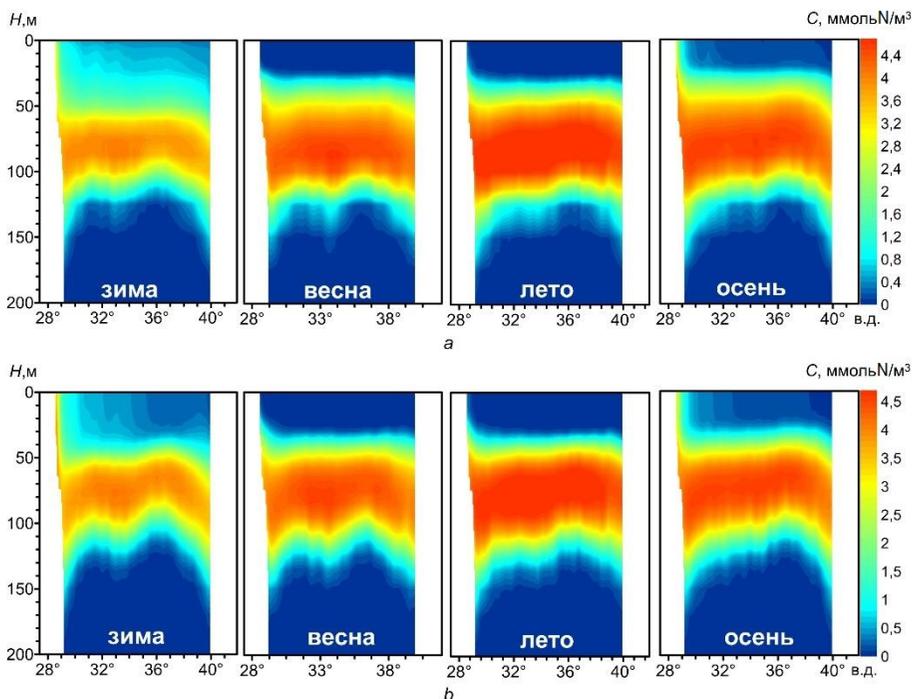


Р и с. 4. Средние профили коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии: штриховая линия – для модели расчета с турбулентной моделью, сплошная – для первого варианта расчета

Fig. 4. Average profiles of the vertical turbulent diffusion coefficients: dashed line is for the calculation using the turbulent model and solid line is for the first calculation variant

против 87 м в первом расчете. Толщина перемешанного слоя в этом расчете достигает 40 м.

Вертикальная структура распределения нитратов в виде зональных сечений для четырех сезонов, полученная осреднением результатов двух вариантов расчетов за 12-летний период, представлена на рис. 5. Основной чертой вертикального распределения нитратов является максимум концентрации на глубине около 80 м. Этот максимум присутствует в зональных сечениях для всех сезонов, достигая наибольшей величины летом, а наименьшей – зимой, когда большое количество нитратов поднимается из-за сильного перемешивания к поверхности. Другими заметными чертами вертикального распределения являются повышенная концентрация нитратов выше верхнего нитроклина возле западного берега, вызванная выносом нитратов Дунаем на северо-западном шельфе, и опускание изолиний концентрации нитратов в районе нижнего нитроклина, обусловленное интенсивностью вертикальной ячейки циркуляции в Черном море. Основное различие двух вариантов расчетов наблюдается зимой. В расчете с использованием турбулентной модели значение максимума ниже – 3,8 против 3,9 ммольN/м³, и расположен он на меньшей глубине – 80 м



Р и с. 5. Зональные сечения вдоль широты $43,5^{\circ}$ ш. распределения концентрации нитратов для четырех сезонов: *a* – по результатам первого расчета; *b* – по результатам расчета с турбулентной моделью

F i g. 5. Zonal sections (along latitude 43.5° N) of the nitrate concentration distributions for four seasons: *a* – based on the first calculation results; *b* – based on the results of calculation using the turbulent model

Аналогичные зональные сечения для фитопланктона показаны на рис. 6. Зимой и осенью концентрация фитопланктона на зональных сечениях ведет себя монотонно с глубиной: она понижается от поверхности моря. В весенний и летний сезоны максимум концентрации фитопланктона наблюдается на глубине примерно 25–30 м и присутствует на всем протяжении разреза от западного до восточного берега. Как отмечалось выше, этот подповерхностный максимум объясняется повышением интенсивности солнечного света в этот период года и очень низким содержанием нитратов в поверхностном слое Черного моря. Так же, как и для вертикального распределения нитратов, возле западного берега наблюдаются повышенные концентрации фитопланктона для всех сезонов из-за больших концентраций нитратов. Наибольшие различия в распределении концентрации фитопланктона отмечены зимой и осенью. В расчете с использованием турбулентной модели концентрация фитопланктона зимой практически однородна до глубины 40 м благодаря более интенсивному турбулентному перемешиванию, в то время как в первом расчете в этом слое наблюдается заметный вертикальный градиент концентрации. Согласно расчету с турбулентной моделью, осенью значения концентрации фитопланктона $0,2$ ммольN/м³ проникают до 40 м, в то время как в первом расчете – до 30 м.

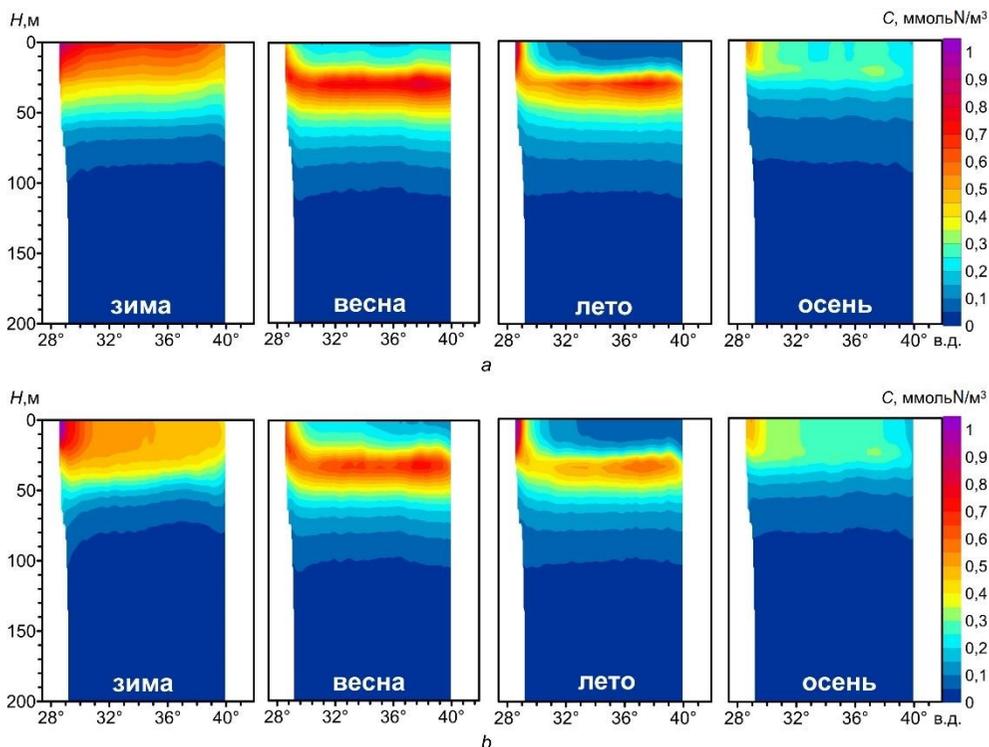


Рис. 6. Зональные сечения вдоль широты 43.5° с. ш. распределения концентрации фитопланктона для четырех сезонов: *a* – по результатам первого расчета; *b* – по результатам расчета с турбулентной моделью

Fig. 6. Zonal sections (along latitude 43.5° N) of the phytoplankton concentration distributions for four seasons: *a* – based on the first calculation results; *b* – based on the results of calculation using the turbulent model

Рассмотрим межгодовую изменчивость основных параметров экосистемы на основе среднегодовых концентраций в фотической зоне Черного моря. На рис. 7 показана эволюция среднегодовых концентраций фитопланктона, всей биоты (то есть сумма биомассы всех биологических компонентов модели) и нитратов в верхнем 50-метровом слое. Среднегодовые концентрации нитратов в верхнем слое моря выше для первого расчета. Как следствие, для этого расчета выше концентрации фитопланктона и суммарной биоты. Особенностью приведенных графиков является отрицательный тренд всех приведенных параметров. Это связано с отрицательным трендом количества поступающих со стоками рек биогенных веществ, которые задавались в соответствии с работой [14]. График поступления нитратов с речным стоком по годам изображен на том же рисунке. Аналогичные отрицательные тренды в биомассе фитопланктона отмечены в работе [16].

Более высокая концентрация биохимических параметров в фотической зоне для первого расчета кажется, на первый взгляд, нелогичной потому, что вертикальный обмен во втором расчете с использованием турбулентной модели интенсивней, чем в первом расчете. Следовательно, более высоким

должен быть поток нитратов из слоя верхнего нитроклина. Для прояснения причины, по которой концентрации параметров экосистемы в верхнем слое различаются, рассмотрим более подробно потоки нитратов в фотическую зону.

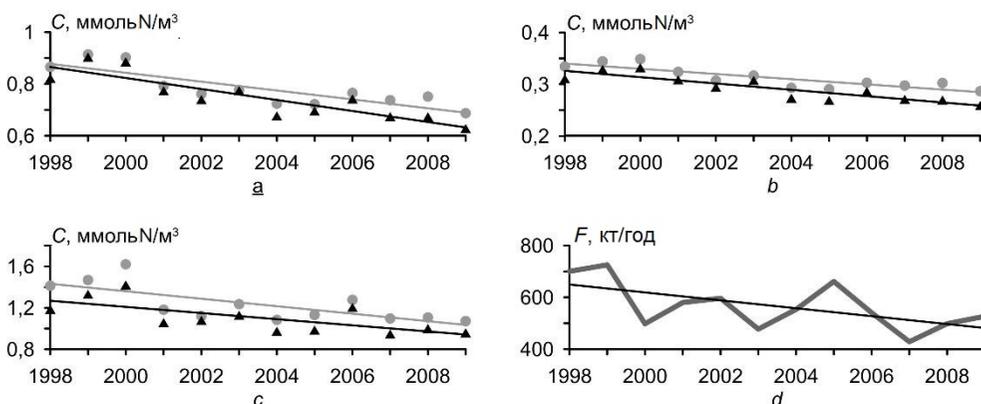
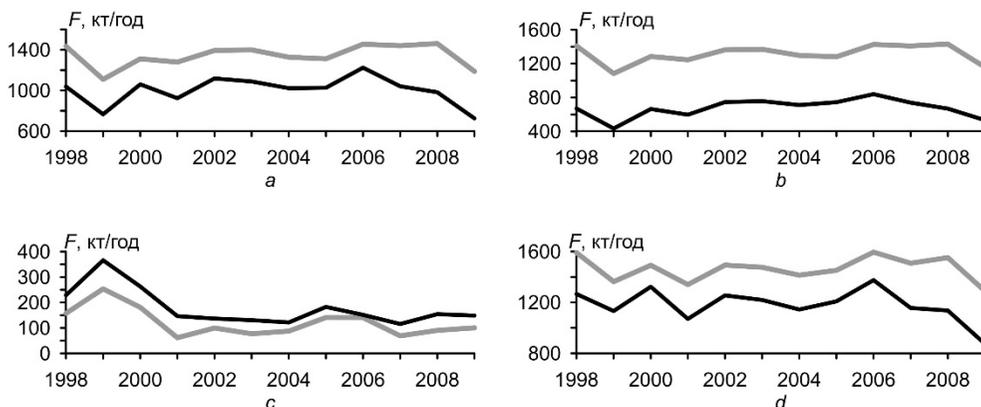


Рис. 7. Среднегодовые значения концентраций C биоты (*a*), фитопланктона (*b*) и нитратов (*c*) в фотической зоне глубоководной части Черного моря по результатам первого расчета (кружки) и второго (треугольники); среднегодовое поступление биогенов с речным стоком (*d*)
Fig. 7. Annual average concentrations C of biota (*a*), phytoplankton (*b*) and nitrates (*c*) in the photic zone of the deep part of the Black Sea based on the results of the first (circles) and second (triangles) calculations; annual average nutrients inflow with river runoffs (*d*)

На рис. 8 показаны среднегодовые потоки нитратов в фотическую зону глубоководной части Черного моря. Эта зона ограничена снизу горизонтом 50 м и сбоку – цилиндрической поверхностью с направляющей вдоль изобаты 200 м. Как следует из графиков на рис. 8, суммарный поток нитратов всегда больше для первого расчета. Это объясняет более высокие концентрации биохимических параметров в этом слое (см. рис. 7). На всем временном интервале среднегодовые потоки нитратов в фотическую зону положительны – как вертикальные, так и горизонтальные. Это объясняется градиентами нитратов в верхнем нитроклине и поступлением нитратов с СЗШ. Причем, в отличие от суммарного, горизонтальные потоки меньше для первого расчета.

Величины горизонтальных потоков существенно меньше вертикальных, за исключением 1999 г. Следовательно, основной вклад в поступление нитратов в приповерхностный слой глубоководной части Черного моря вносят вертикальные потоки. Причем основную часть в вертикальных потоках обеспечивает адвекция. Это видно на рис. 8, где в верхнем ряду изображены полные вертикальные потоки нитратов и вертикальные адвективные. Для первого расчета эти величины практически совпадают. То есть диффузионный поток практически равен нулю, что согласуется с рис. 4, где изображены зимние средние профили коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии. В первом расчете на глубине 50 м коэффициент диффузии очень мал. Во втором расчете диффузионный поток составляет примерно 20 % от общего вертикального. Это говорит о большой роли вертикальных движений в обеспечении верхнего слоя моря питательными веществами.



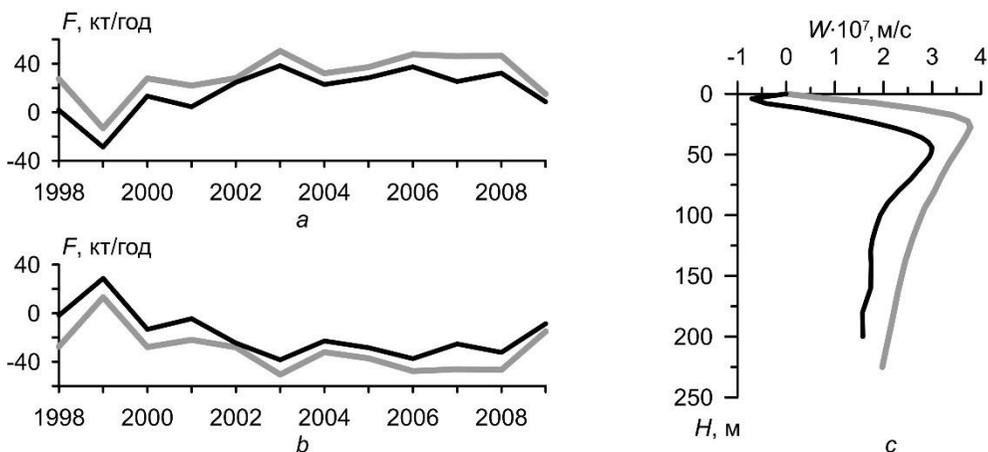
Р и с. 8. Среднегодовые потоки нитратов F в верхний 50-метровый слой глубоководной части Черного моря: поток через нижнюю границу (а); адвективный поток через нижнюю границу (b); поток через боковую поверхность (с); суммарный поток (d) по результатам первого расчета (серая линия) и второго (черная линия)

Fig. 8. Annual average nitrates flows F to the upper 50-m layer of the Black Sea deep part: flow through the lower boundary (a); advection flow through the lower boundary (b); flow through the lateral surface (c); total flow (d) based on the results of the first (grey line) and second (black line) calculations

Поля вертикальной скорости представляют собой довольно пеструю картину, где области с поднимающейся водой перемежаются с областями, где вода опускается. Такое поведение вертикальной скорости может быть результатом влияния нестационарности и неоднородности полей атмосферного воздействия, неоднородности рельефа дна, а также такими процессами, как волны Россби и синоптические вихри. Если же усреднить поле вертикальной скорости за достаточно большой срок, то вертикальная циркуляция в верхнем слое будет определяться общей циклонической завихренностью течений в Черном море. При этом в центре вода будет подниматься к поверхности и двигаться к периферии, а возле берега опускаться, образуя вертикальную ячейку циркуляции (см. работу ¹ и [17, 18]). На рис. 9 представлены графики среднегодовых потоков массы воды в фотическую зону глубоководной части Черного моря для двух расчетов. Поток воды через нижнюю границу всегда направлен вверх, за исключением 1999 г. Соответственно поток воды через боковую поверхность отрицателен (кроме 1999 г.), т. е. направлен из области. Это соответствует режиму вертикальной ячейки циркуляции для верхнего слоя Черного моря, обусловленному циклонической (в среднем) завихренностью поля напряжения трения ветра. Причем потоки воды для первого расчета по абсолютной величине превышают аналогичные потоки для расчета с турбулентной моделью. То есть интенсивность циркуляции вертикальной ячейки для первого расчета выше. Это также можно видеть на профилях осредненных за весь пе-

¹ Булгаков С. Н., Кортаев Г. К. Возможный механизм стационарной циркуляции вод Черного моря // Комплексные исследования Черного моря. Севастополь : МГИ АН УССР, 1984, С. 32–40.

риод расчета и по глубоководной части бассейна вертикальных скоростей. Таким образом, благодаря большей интенсивности вертикальной ячейки циркуляции в первом расчете в верхний слой Черного моря попадает больше питательных веществ из более глубоких слоев, что обеспечивает для этого расчета более высокую массу биоты в фотической зоне, которая наблюдается на рис. 7.



Р и с. 9. Среднегодовые значения потоков массы в верхний 50-метровый слой глубоководной части Черного моря: через нижнюю границу (а), через боковую поверхность (b); профили усредненных за весь период расчета и по площади глубоководной части бассейна вертикальных скоростей (с) по результатам первого расчета (серая линия) и второго (черная линия)

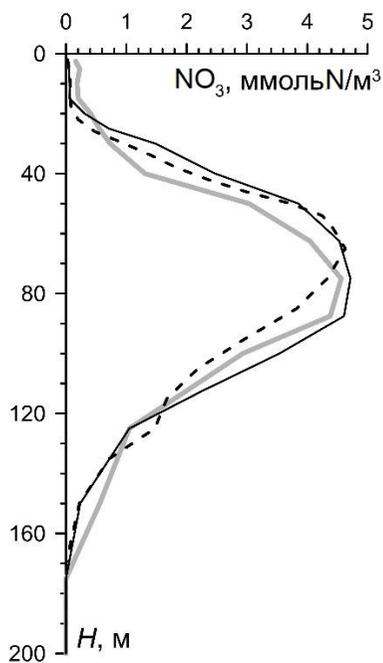
Fig. 9. Annual average values of the mass flows to the upper 50-m layer of the Black Sea deep part: through the lower boundary (a), through the lateral surface (b); the vertical velocity profiles averaged over the whole calculation period and over the deep part area of the basin (c) based on the results of the first (grey line) and second (black line) calculations

Сравнение с данными наблюдений

Для сравнения результатов моделирования распределения нитратов с данными измерений использовалась междисциплинарная океанографическая база данных. Результаты моделирования интерполировались по пространству и времени в те точки пространства и времени, где имелись данные измерений. На рис. 10 приведены средние для глубоководной части профили по всем измерениям и соответствующим результатам моделирования.

По результатам первого расчета глубина максимума нитратов совпадает с соответствующей глубиной из данных измерений, а для второго расчета она выше на 10 м. Величины максимумов для обоих расчетов и данных измерений отличаются в пределах $0,1$ ммольN/м³. Для первого расчета слой максимума нитратов шире, чем по данным измерений, а для второго расчета он расположен выше. Само значение максимума нитратов (около 5 ммольN/м³) соответствует тому, что приведено в работе [19] для глубоководной части Черного моря для 2000-х гг.

По результатам первого расчета глубина максимума нитратов совпадает с соответствующей глубиной из данных измерений, а для второго расчета она выше на 10 м. Величины максимумов для обоих расчетов и данных измерений различаются в пределах $0,1$ ммольN/м³.



Р и с. 10. Средние профили коэффициентов концентрации нитратов для глубоководной части Черного моря по данным измерений (серая линия), по результатам первого расчета (сплошная черная) и второго (штриховая)

Fig. 10. Average profiles of the nitrate concentration coefficients for the Black Sea deep part based on the measurement data (grey line), and on the results of the first (solid black line) and second (dashed line) calculations

Для первого расчета слой максимума нитратов шире, чем по данным измерений, а для второго расчета он расположен выше. Само значение максимума нитратов (около 5 ммольN/м^3) соответствует тому, что приведено в работе [19] для глубоководной части Черного моря для 2000-х годов.

Кроме того, было произведено сравнение результатов моделирования с данными поверхностной концентрации хлорофилла, полученными по спутниковым измерениям. Сравнивались средние по площади глубоководной ($> 200 \text{ м}$) части Черного моря спутниковые значения хлорофилла с соответствующими значениями, полученными в двух вариантах расчетов.

Для получения концентрации хлорофилла поверхностную биомассу фитопланктона переводили из единиц измерения ммольN/м^3 в мгC/м^3 , используя массовое отношение C:N, равное 8. Затем вычислялась концентрация хлорофилла с использованием отношения Хл:С, взятого из работы [16]. Это отношение меняется значительно в течение года. В наших расчетах оно аппроксимировалось следующим образом. Первые 120 суток (360-суточного года) оно падает линейно с 0,03 до 0,01. Затем в течение 120 суток оно принимается постоянным 0,01. Последние 120 суток растет линейно с 0,01 до 0,03.

На рис. 11 приведен осредненный за 12 лет внутригодовой ход средней концентрации хлорофилла по данным спутниковых измерений и по результатам двух расчетов. Наибольшие отличия результатов моделирования от данных спутниковых наблюдений наблюдаются в первые 90 суток года и в последние 30 суток. В первые 90 суток концентрация хлорофилла по результатам моделирования превышает спутниковые данные, особенно для первого расчета. Результаты расчета с использованием турбулентной модели заметно ближе к данным измерений. В последний месяц, наоборот, ближе к спутниковым данным результаты первого расчета. В летние месяцы концентрация хлорофилла по результатам обоих расчетов ниже спутниковых данных.

Временной ход концентрации хлорофилла для всего рассматриваемого периода (1998–2009 гг.) приведен на рис. 12. Наибольшие различия спутниковой концентрации хлорофилла и результатов моделирования наблюдаются в зимние сезоны. Особенно большие различия заметны зимой. 1998, 2000, 2002 и 2006 гг. В эти годы наблюдались максимумы потоков нитратов в верхний

50-метровый слой глубоководной части Черного моря для обоих вариантов модели (см. рис. 8). Причем для первого варианта модели эти потоки выше, соответственно больше отличие от спутниковых данных.

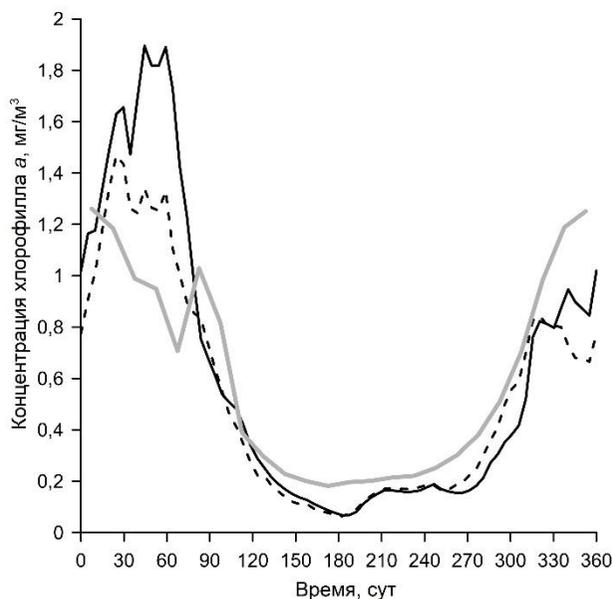


Рис. 11. Годовой ход концентрации хлорофилла *a* по данным спутниковых измерений (серая линия) и по результатам моделирования: по первому расчету (черная сплошная линия) и второму (штриховая линия)

Fig. 11. Annual variation of the chlorophyll *a* concentration based on satellite measurements (grey line) and on the simulation results: the first (solid black line) and second (dashed line) calculations

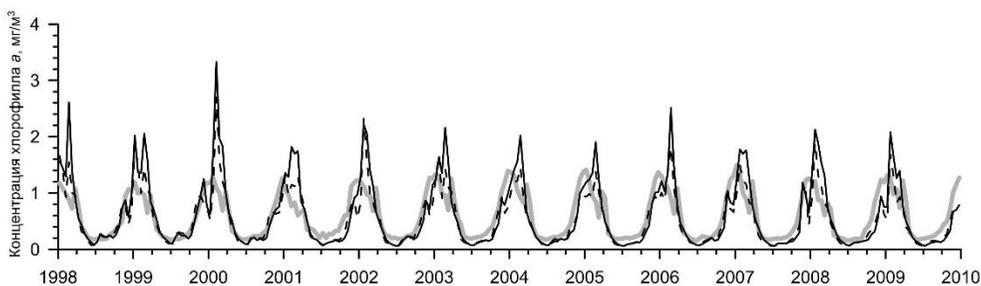


Рис. 12. Временная динамика концентрации хлорофилла *a* по данным спутниковых измерений (серая линия) и по результатам моделирования: по первому расчету (черная сплошная линия) и второму (штриховая линия)

Fig. 12. Time dynamics of the chlorophyll *a* concentration based on satellite measurements (grey line) and on the simulation results: the first (solid black line) and second (dashed line) calculations

Выводы

Проведены расчеты двенадцатилетней эволюции экосистемы Черного моря, выполненные с использованием двух вариантов параметризации вертикального обмена. На основе этих расчетов была получена средняя

сезонная изменчивость параметров экосистемы. Анализ результатов показал, что сезонная изменчивость основных параметров экосистемы в этих расчетах различается не очень сильно. В частности, распределение нитратов с глубиной, полученное по расчету с использованием турбулентной модели, имеет большие градиенты в местах верхнего и нижнего нитроклинов. При этом максимум нитратов располагается выше, чем тот, который получается по результатам первого расчета.

Для фитопланктона различия результатов двух расчетов проявляются в том, что летний подповерхностный максимум концентрации расположен глубже для расчета с турбулентной моделью. Кроме того, зимняя поверхностная концентрация фитопланктона в глубоководной части Черного моря выше для первого расчета. Это, по-видимому, вызвано более интенсивным турбулентным перемешиванием в приповерхностном слое для второго расчета. В расчете с использованием турбулентной модели концентрация фитопланктона зимой почти однородна до глубины 40 м, а в первом расчете в этом слое наблюдается заметный градиент концентрации.

Межгодовая изменчивость параметров экосистемы характеризуется уменьшением биомассы в фотической зоне глубоководной части моря для обоих расчетов, вызванным отрицательным трендом количества биогенных веществ, поступающих с реками. При этом среднегодовые концентрации, соответствующие первому расчету, выше, чем в расчете с использованием турбулентной модели. Это связано с более высокими значениями потоков нитратов в поверхностный слой моря из слоя верхнего нитроклина для этого расчета. Что, в свою очередь, связано с более интенсивной вертикальной ячейкой циркуляции, полученной по результатам первого расчета.

При этом поступление нитратов в фотическую зону из нижележащего слоя обеспечивается в большей степени адвекцией, а не турбулентной диффузией.

Поверхностная концентрация хлорофилла, рассчитанная по результатам моделирования, сравнивалась со спутниковыми данными. Наибольшие различия наблюдаются в зимний сезон, когда концентрация хлорофилла по результатам моделирования для обоих вариантов превышает спутниковые данные. При этом различие результатов, полученных с использованием турбулентной модели, меньше, чем в первом варианте модели. То есть параметризация вертикальной диффузии с помощью турбулентной модели более реалистично воссоздает поверхностную концентрацию хлорофилла. Наибольшие различия наблюдаются в те годы, когда вертикальные потоки нитратов в верхний слой моря, в основном адвективные, максимальны. Из этого можно сделать вывод, что, по-видимому, интенсивность вертикальной ячейки циркуляции, получаемой в первом варианте модели циркуляции, завышена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
2. A Physical-Biochemical Model of Plankton Productivity and Nitrogen Cycling in the Black Sea / T. Oguz [et al.] // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1999. Vol. 46, iss. 4. P. 597–636. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00074-0)

3. *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 Biogeochemical Cycles*. 2000. Vol. 14, iss. 4. P. 1331–1352. <https://doi.org/10.1029/1999GB001253>
4. *Grégoire M., Raïck C., Soetaert K.* Numerical Modeling of the Central Black Sea Ecosystem Functioning During the Eutrophication Phase // *Progress in Oceanography*. 2008. Vol. 76, iss. 3. P. 286–333. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.01.002>
5. Modeling the response of top-down control exerted by gelatinous carnivores on the Black Sea pelagic food web / T. Oguz [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, iss. C3. P. 4543–4564. <https://doi.org/10.1029/1999JC000078>
6. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Изучение долговременной изменчивости экосистемы черного моря на основе ассимиляции данных дистанционных измерений в численной модели // *Водные ресурсы*. 2019. Т. 46, № 1. С. 58–69. EDN YZGLXV. doi:10.31857/S0321-059646158-69
7. *Dorofeyev V., Sukhikh L.* A model for monitoring the evolution of the Black Sea ecosystem on the basis of remote sensing data assimilation // *International Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 39, iss. 24. P. 9339–9355. doi:10.1080/01431161.2018.1523589
8. *Демьяшев С. Г., Коротаев Г. К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке С // *Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане: Атмосфера-Океан-Космос*. Москва : ИВМ РАН, 1992. С. 163–231.
9. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
10. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Изучение долговременной изменчивости динамики Черного моря на основе ассимиляции дистанционных измерений в модели циркуляции // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 2. С. 254–264. EDN YRWQMX. doi:10.7868/S000235151702002X
11. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows / B. Galperin [et al.] // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1988. Vol. 45, iss. 1. P. 55–62. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<0055:AQETEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0055:AQETEM>2.0.CO;2)
12. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Reviews of Geophysics*. 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
13. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Моделирование долговременной эволюции гидрофизических полей Черного моря // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 6. С. 871–884. EDN ZVRIAN. doi:10.7868/S003015741706003X
14. River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? / W. Ludwig [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2009. Vol. 80, iss. 3–4. P. 199–217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.001>
15. *Suslin V., Churilova T.* A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480-560 nm bands from ocean colour scanners // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, iss. 18. P. 4380–4400. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>
16. *Финенко З. З., Мансурова И. М., Суслин В. В.* Временная динамика биомассы фитопланктона в поверхностном слое Черного моря по данным спутниковых наблюдений // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 3. С. 416–427. EDN NEKDHS. doi:10.31857/S0030157422030042
17. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в период 1993 – 2012 годов на основе результатов выполненного реанализа // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 33–48. doi:10.22449/0233-7584-2016-1-33-48

18. *Кубрякова Е. А., Кортаев Г. К.* Механизм горизонтального массо- и солеобмена между водами континентального склона и центральной части Черного моря // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 1. С. 115–124. EDN YIUXVX. doi:10.7868/S0002351517010072.
19. *Юнев О. А., Коновалов С. К., Великова В.* Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. Москва : ГЕОС, 2019. 164 с.

Об авторах:

Дорофеев Виктор Львович, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: G-1050-2014**, viktor.dorofeev@mhi-ras.ru

Сухих Лариса Ивановна, научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: M-4381-2018**, l.sukhikh@gmail.com