

Научная статья

УДК 551.46 (262.5)
EDN: AFHGMU

Распределение и вертикальные потоки взвешенного органического вещества в Черном море по результатам численного моделирования

В. Л. Дорофеев, Л. И. Сухих ✉

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

Поступила в редакцию 11.06.2024; одобрена после рецензирования 22.08.2024;
принята к публикации 12.09.2024.

Аннотация

Цель. Изучение пространственного распределения, временной изменчивости и потоков взвешенного органического вещества в Черном море на основе численного моделирования – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Для оценки пространственного распределения и вертикальных потоков взвешенного органического вещества в верхнем 200-метровом слое используется модель нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря. Чтобы расширить исследование на всю толщу Черного моря, была разработана модель, состоящая из уравнения эволюции концентрации взвешенного органического вещества в слое от 200 м до дна. В качестве коэффициентов этого уравнения и уравнений модели экосистемы использовались гидродинамические и термодинамические поля, являющиеся результатами выполненного ранее реанализа. Расчет проводился за период 2016–2020 гг. Получены концентрации и вертикальные потоки взвешенного органического вещества на регулярной сетке с дискретностью по времени в 1 сутки. Потоки взвешенного органического углерода, полученные по результатам численного моделирования, сравнивались с результатами обработки проб, отобранных с помощью седиментационных ловушек в двух точках Черного моря. Результаты моделирования показали довольно хорошее качественное и количественное соответствие с результатами измерений.

Выводы. В работе создана модель для расчета содержания взвешенного органического вещества в глубоких слоях Черного моря. По результатам моделирования показано, что за счет биологических процессов концентрация взвешенной органики в приповерхностном слое Черного моря существенно выше, чем в глубоководном. Значение вертикальных потоков взвешенной органики в приповерхностном слое определяется в основном концентрацией взвеси, в глубоководном – значением вертикальной скорости. На основе результатов моделирования был оценен поток углерода из толщи воды на дно как результат оседания взвешенного вещества. Основная часть этого потока приходится на шельфовую зону моря.

Ключевые слова: карбонатная система, взвешенное органическое вещество, морская экосистема, Черное море, численное моделирование, седиментационные ловушки

Благодарности: расчет полей концентрации взвешенного органического вещества и его вертикальных потоков выполнен в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2023-0001; гидродинамические поля подготовлены в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012.

© Дорофеев В. Л., Сухих Л. И., 2024

Для цитирования: Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Распределение и вертикальные потоки взвешенного органического вещества в Черном море по результатам численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 6. С. 905–917. EDN AFHGMU.

Original article

Distribution and Vertical Fluxes of Particulate Organic Matter in the Black Sea Based on the Results of Numerical Modeling

V. L. Dorofeev, L. I. Sukhikh ✉

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

Abstract

Purpose. The work is purposed at studying the spatial distribution, temporal variability and fluxes of particulate organic matter in the Black Sea based on numerical modeling.

Methods and Results. A model of the lower trophic level of the Black Sea ecosystem is applied to estimate the spatial distribution and vertical fluxes of particulate organic matter in the upper 200-meter layer. To extend the study to the whole thickness of the Black Sea, a model consisting of an equation for the evolution of particulate organic matter concentration in the layer from 200 m to the bottom was developed. The hydrodynamic and thermodynamic fields resulted from the previously performed reanalysis, are used as the coefficients of this equation and the equations of ecosystem model. The modeling was carried out for the period 2016–2020. The concentrations and vertical fluxes of particulate organic matter are obtained on a regular grid and with time resolution 1 day. The particulate organic carbon fluxes derived from numerical modeling are compared with the results of processing the samples collected by the sediment traps at two points in the Black Sea. The simulation results are in a fairly good qualitative and quantitative agreement with the measurement results.

Conclusions. A model for calculating the particulate organic matter content in the deep layers of the Black Sea was developed. The modeling results have shown that due to the biological processes, the particulate organic matter concentration in the surface layer of the Black Sea significantly exceeds the one in the deep-sea layer. The magnitude of vertical particulate organic matter fluxes in the surface layer is conditioned mainly by the suspended matter concentration, whereas in the deep-sea layer – by the value of vertical velocity. Based on the modeling results, the carbon flux directed from the water column to the bottom was classified as a result of suspended matter settling. The main part of this flux falls on the shelf zone of the sea.

Keywords: carbonate system, particulate organic matter, marine ecosystems, Black Sea, numerical modeling, sediment traps

Acknowledgments: The fields of particulate organic matter concentration and its vertical fluxes were calculated within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2023-0001, the hydrodynamic fields were prepared within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012.

For citation: Dorofeev, V.L. and Sukhikh, L.I., 2024. Distribution and Vertical Fluxes of Particulate Organic Matter in the Black Sea Based on the Results of Numerical Modeling. *Physical Oceanography*, 31(6), pp. 851-862.

Введение

Пространственное распределение, временная изменчивость и потоки взвешенного органического вещества (ВОВ) имеют большое значение при изучении карбонатной системы Черного моря. Исследование вертикального распределения взвешенной органики и ее временной изменчивости выполнено в ряде

работ (напр., ^{1, 2} [1–3]). Одним из основных направлений таких исследований является изучение проб взвеси, взятых с помощью стационарных седиментационных ловушек. В настоящее время работы по изучению вертикальных потоков взвеси, в том числе органического и неорганического углерода, ведутся совместно учеными ФГБУН ФИЦ МГИ и ИО РАН [4, 5] на постоянной основе. Измерения потоков взвеси с помощью стационарных седиментационных ловушек проводятся только в отдельных точках акватории Черного моря, что ограничивает понимание процессов, происходящих в море. Для того чтобы получить пространственные распределения и временной ход компонентов карбонатной системы, полезно использовать численные трехмерные модели морской среды, с помощью которых можно определить временную эволюцию и пространственное распределение интересующего параметра на регулярной сетке. В данной работе приведены результаты численного моделирования пятилетней эволюции взвешенного органического вещества в Черном море с целью изучения пространственно-временной изменчивости его концентрации и вертикальных потоков.

Материалы и метод исследования

Важную роль в формировании взвешенного органического вещества, особенно в верхнем кислородсодержащем слое моря, играют связанные с функционированием планктонного сообщества биологические процессы, в основе которых лежит образование первичной продукции за счет процессов фотосинтеза и ассимиляции фитопланктоном биогенных элементов. Поэтому для оценки пространственного распределения и вертикальных потоков ВОВ в верхнем слое использовалась модель нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря [6]. Биогеохимическая часть модели представляет собой систему из 15 (по числу переменных состояния) уравнений переноса – диффузии, в правые части которых включены слагаемые, описывающие биогеохимические взаимодействия между переменными состояниями.

Система уравнений биогеохимической части модели в качестве коэффициентов включает поля скорости течений и коэффициенты турбулентного обмена, которые являются выходными параметрами модели циркуляции Черного моря. Кроме того, в слагаемых, описывающих взаимодействие компонентов модели экосистемы, используются поля температуры и солености, которые также являются выходными параметрами гидродинамической модели. Единицей измерения переменных состояния в модели является азот. В местах впадения крупных рек задаются потоки неорганических соединений азота (нитратов и аммония), пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока. Для перевода единиц измерения органического вещества из азота в углерод использовались массовые отношения C:N для разных параметров экосистемы Черного моря, взятые в работе [7]. В дальнейшем взвешенная органика рассматривается в единицах углерода.

¹ Филиппов В. С. Взвешенный органический углерод в водах аэробной зоны Черного моря // Экосистема пелагиали Черного моря. Москва : Наука, 1980. С. 62–64.

² Востоков С. В. Взвешенное органическое вещество в открытых водах Черного моря весной 1984 г. // Современное состояние экосистемы Черного моря. Москва : Наука, 1987. С. 59–67.

В данной работе в качестве гидродинамических и термодинамических полей использовались результаты реанализа, проведенного для периода 1993–2020 гг. [8] на основе численной модели циркуляции Черного моря с ассимиляцией данных спутниковых измерений температуры поверхности моря и аномалий топографии уровня. Горизонтальный шаг модели равен 4,8 км, в вертикальном направлении сетка модели имеет 35 z -уровней, сгущающихся к поверхности.

В биогеохимической части модели расчетная область по горизонтали совпадает с областью модели циркуляции (также совпадают шаги сетки), а по вертикали занимает верхние 200 м Черного моря (18 расчетных уровней, соответствующих модели циркуляции).

Описанная биогеохимическая модель дает распределение ВОВ только в верхнем 200-метровом слое моря. Для того чтобы расширить исследование на всю толщу Черного моря, было добавлено уравнение эволюции концентрации ВОВ в слое от 200 м до дна:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} + \frac{\partial((W + W_s)C)}{\partial z} = K_h \nabla^2 C + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + R, \quad (1)$$

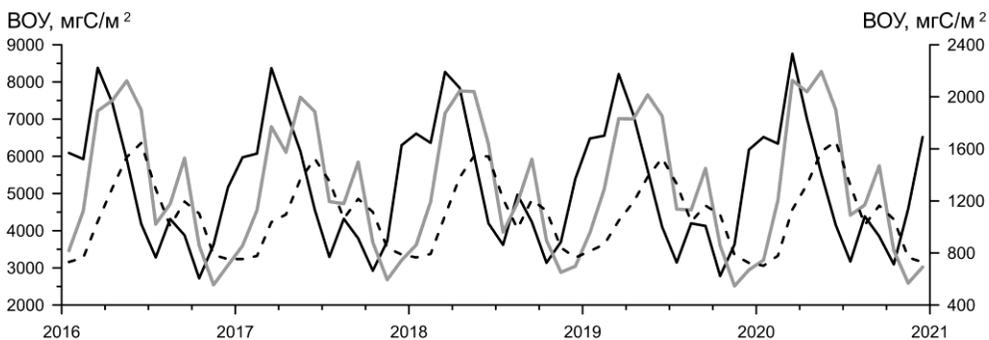
где C – концентрация ВОВ; U, V, W – компоненты скоростей течений; K_h, K_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно, полученные из модели циркуляции; W_s – скорость седиментации, зависящая от глубины; R – скорость изменения концентрации ВОВ в результате химических процессов. Величина скорости седиментации меняется в диапазоне 0,4–2,5 м/сут. Последнее слагаемое в правой части уравнения (1) описывает анаэробное разложение ВОВ. Горизонтальная сетка и расчетные уровни соответствуют модели циркуляции Черного моря. Источником ВОВ для уравнения (1) является верхний 200-метровый слой, где работает модель экосистемы. Получаемая там концентрация ВОВ на нижнем уровне (200 м) служит граничным условием для уравнения (1).

Основной расчет эволюции концентрации ВОВ проводился на 5 лет с 2016 по 2020 г. Для подготовки начальных полей для уравнения (1) использовалась следующая процедура. Проводился расчет по уравнению (1) с нулевыми начальными условиями. При этом граничные условия на верхней границе и коэффициенты уравнения (скорости течений) задавались в цикле для 2015 г. После того как поля концентрации ВОВ на всех горизонтах выходили на стационарный режим, счет заканчивался и полученные поля использовались в качестве начальных для основного расчета. Для этого потребовалось около ста лет модельного времени.

Результаты

После получения начальных условий был проведен расчет трехмерного распределения ВОВ по всей акватории Черного моря. В результате получен массив данных на регулярной сетке с дискретностью одни сутки. На рис. 1 показаны графики временной изменчивости суммарного взвешенного органического углерода в трех слоях: 0–56, 56–95 и 95–350 м. Первый слой примерно соответствует глубине слоя фотосинтеза в Черном море, второй – субанаэроб-

ной зоне, третий – сероводородной зоне согласно работе [1], в которой изучалось распределение взвешенного органического углерода (ВОУ) на основе данных проб, полученных на 11 станциях 26-го рейса НИС «Витязь» в 1992 г. В слое 0–56 м основной максимум присутствует примерно в марте во время «цветения» диатомовых водорослей. В более нижних слоях этот максимум становится меньше и сдвигается по времени вправо в соответствии с оседанием взвешенного вещества.

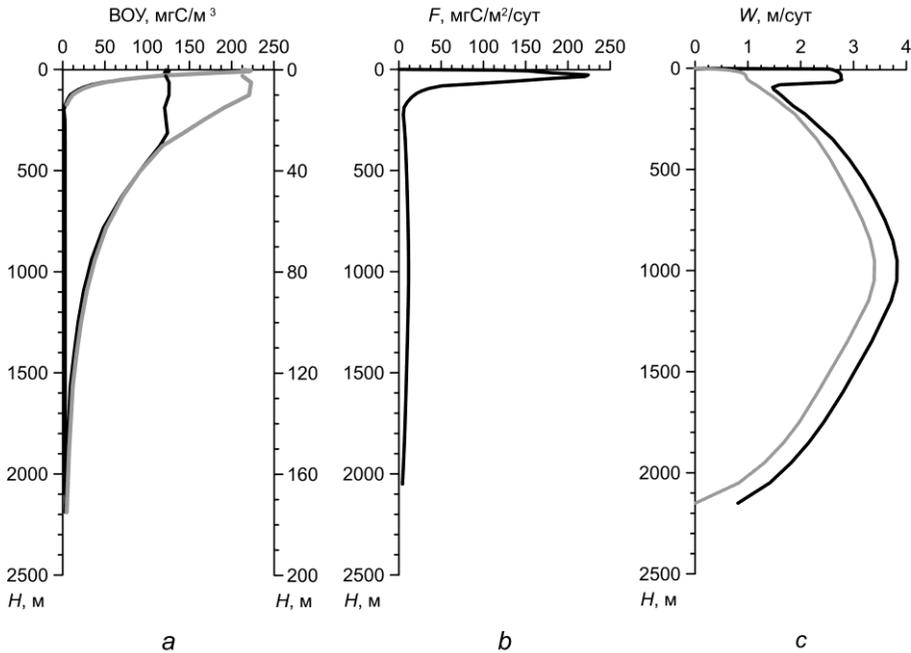


Р и с. 1. Временная изменчивость суммарного взвешенного органического углерода в трех слоях: 0–56 м (черная линия), 56–95 м (серая линия) и 95–350 м (штриховая). Левая ось ординат относится к слою 0–56 м, правая – к двум другим слоям. Графики построены по результатам численного моделирования

Fig. 1. Temporal variability of total particulate organic carbon in three layers: 0–56 m (black line), 56–95 m (gray line), and 95–350 m (dashed line). The left ordinate axis refers to the 0–56 m layer, and the right one – to the other two layers. The graphs are constructed based on the results of numerical modeling

В работе [1] приводится среднее содержание ВОУ в этих слоях – 4,7, 1,0 и 7,9 г. В работе [9], где рассматриваются результаты измерений в юго-западной части Черного моря, приводятся близкие значения. Соответствующие значения, полученные по данным рис. 1, равны 5,2, 1,3 и 1,1 г. Для первых двух слоев сходство с результатами измерений довольно хорошее, хотя измерения выполнены для другого временного периода. Для сероводородной зоны результаты моделирования оказываются заниженными.

На рис. 2, а представлены вертикальные профили ВОУ, осредненные по площади и за 5 лет для всего бассейна и шельфа. Профиль, осредненный по всей акватории Черного моря, имеет максимальное значение $\sim 120 \text{ мг/м}^3$ в верхнем 20-метровом слое. На шельфе максимальное значение превышает 200 мг/м^3 . В работе [1] показан профиль ВОУ, полученный осреднением по всем измерениям. В верхнем 20-метровом слое значения ВОУ имеют максимум 142 мг/м^3 , который находится между значениями максимумов для всей акватории моря и шельфа, полученными по результатам численного моделирования.



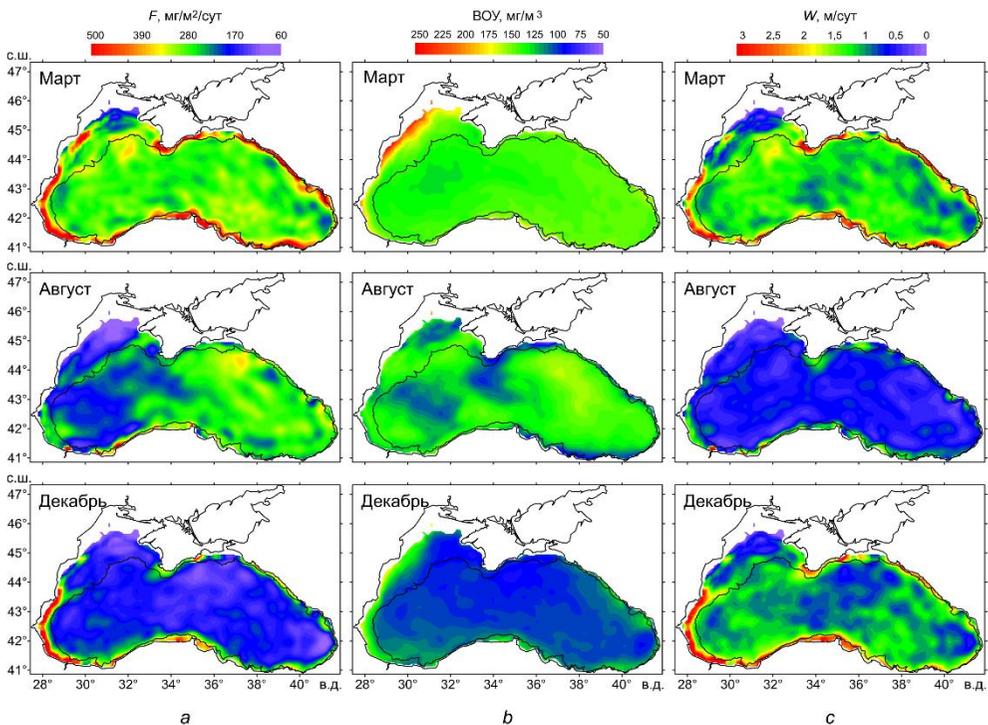
Р и с. 2. Вертикальные профили ВОУ для всей толщи воды (левая ось ординат) и верхнего 200-метрового слоя (правая ось), осредненные по всему бассейну (черная линия) и шельфу (серая линия) (a); профиль вертикального потока ВОУ (b); профили средней вертикальной скорости жидкости, направленной ко дну (серая линия) и скорости жидкости плюс скорости седиментации (черная линия) (c). Все профили построены по результатам численного моделирования

F i g. 2. Vertical profiles of POC for the whole water column (left ordinate axis) and the upper 200-meter layer (right ordinate axis) averaged over the whole basin (black line) and shelf (gray line) (a); profile of the POC vertical flux (b); profiles of the liquid average vertical velocity directed towards the bottom (gray line), and the liquid velocity plus the sedimentation velocity (black line) (c). All the profiles are constructed based on the results of numerical modeling

На основе полученных в расчетах распределений ВОУ были построены поля среднемесячных потоков (F) неорганического углерода, направленных вниз для всех горизонтов модели. Потоки рассчитывались следующим образом. В каждой точке сетки модели и расчетном горизонте суммировалось в течение месяца значение F : $F = POC(W + W_s)$ при $W + W_s > 0$ и $F = 0$ при $W + W_s < 0$, где POC – концентрация ВОУ; W – скорость жидкости; W_s – скорость седиментации частичек органического углерода. Отметим, что скорость имеет положительное значение, если она направлена от поверхности ко дну. Затем полученное значение делилось на число дней в месяце. Такой способ определения потока ВОУ выбран для того, чтобы результаты моделирования можно было сравнивать с результатами измерений, полученных в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» с помощью седиментационных ловушек, в которых отбор проб проводился с экспозицией 1 мес. Эти пробы использовались затем для исследования особенностей вертикального потока органического и неорганического углерода [10].

Профиль вертикального потока ВОУ, осредненный по всей акватории Черного моря и за временной интервал 5 лет, изображен на рис. 2, b. На рис. 2, c

представлены аналогичные профили вертикальной скорости жидкости и суммы $W + W_s$. Профиль вертикального потока ВОУ в верхнем 100-метровом слое имеет максимум, который существенно, по крайней мере на порядок, превышает значения средних потоков ниже 200 м. Средняя вертикальная скорость в пределах всего слоя меняется максимально в 3 раза (не считая горизонтов возле поверхности и у дна), а сумма $W + W_s$ – максимально в 4 раза. Локальный максимум последней в верхнем 100-метровом слое объясняется высокой скоростью седиментации в этом слое. Концентрация ВОУ в приповерхностном слое моря также существенно выше, чем в слое глубже 200 м, где средняя концентрация меняется незначительно. Отсюда можно сделать вывод, что средний вертикальный поток взвешенной органики в приповерхностном слое определяется в основном концентрацией ВОУ, а в слое ниже 200 м – вертикальной скоростью.



Р и с. 3. Карты распределения потоков ВОУ (a), концентрации ВОУ (b), вертикальной скорости жидкости, направленной вниз (c), для горизонта 30 м по результатам численного моделирования
F i g. 3. Maps of distribution of POC fluxes (a) and concentration (b), and liquid vertical velocity directed downwards (c) for the 30 m horizon based on the results of numerical modeling

Приведенные на рис. 3 среднемесячные карты распределения потоков ВОУ, его концентрации и вертикальной скорости на горизонте 30 м получены осреднением за 5 лет для трех месяцев – марта, августа и декабря. В марте концентрация ВОУ довольно высока на всей акватории Черного моря (~ 150 мг/м³), соответственно вертикальные потоки ВОУ также имеют высокие значения (~ 300 мг/м²/сут) по всей акватории. В августе концентрация ВОУ заметно

ниже, чем в марте, также ниже и значения вертикальных потоков, особенно в западной части моря. В декабре наблюдаются самые низкие значения концентрации и вертикальных потоков ВОУ. Таким образом, на горизонте 30 м значения вертикальных потоков ВОУ хорошо коррелируют с его концентрацией. Это подтверждает сделанный ранее вывод, что в приповерхностном слое Черного моря вертикальные потоки ВОУ определяются главным образом его концентрацией. Что касается вертикальной скорости (рис 3, *с*), то ее наименьшие значения наблюдаются в августе, тогда как наименьшие значения потоков отмечаются в декабре (рис 3, *а*). В то же время пространственная изменчивость вертикальной скорости существенно влияет на пространственное распределение потоков. Так, в марте наблюдаются повышенные значения вертикальной скорости на периферии бассейна, в этих же местах отмечаются повышенные значения потоков ВОУ. В декабре высокие вертикальные скорости и повышенные значения потоков ВОУ наблюдаются вдоль глубоководной части западного берега и южного берега Черного моря.

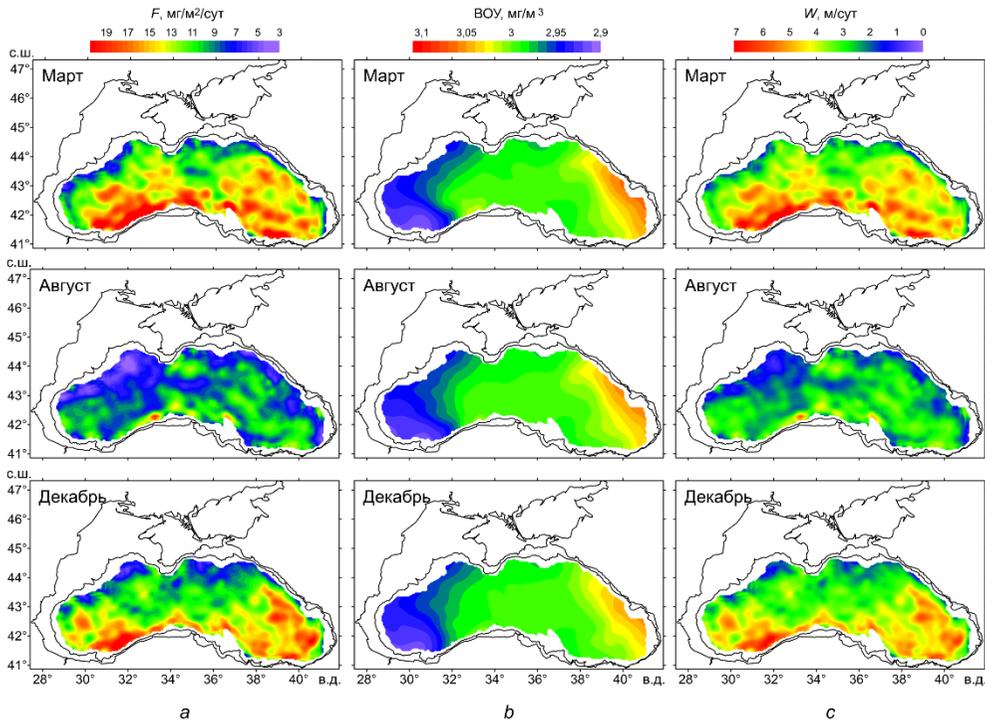
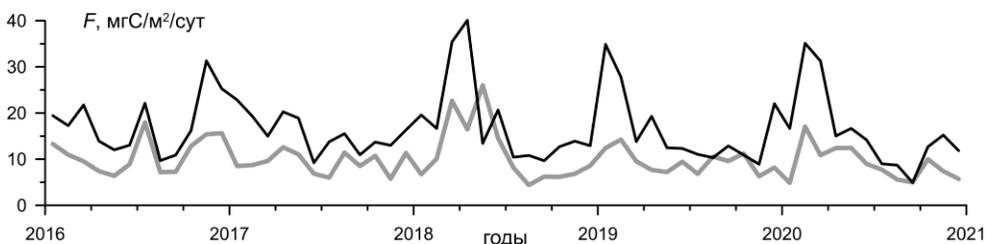


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для горизонта 1200 м
Fig. 4. The same as in Fig. 3 for the 1200 m horizon

На горизонте 1200 м концентрация ВОУ практически не зависит от месяца (рис. 4). Пространственная изменчивость также достаточно слабая, поэтому основной вклад в вертикальные потоки вносит вертикальная скорость жидкости. В августе она самая низкая из представленных на рис. 4, *с*, в этом же месяце наблюдаются самые слабые вертикальные потоки ВОУ. Пространственное распределение вертикальных потоков практически совпадает с пространственным распределением вертикальной скорости.

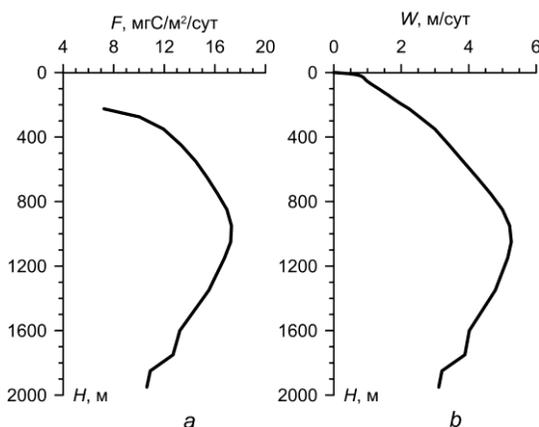
В работе [11] приведены результаты анализа материала, собранного во время проведения эксперимента с седиментационными ловушками, который проводился возле г. Амасра, Турция, в глубоководной части Черного моря. В ходе эксперимента (длительностью три года с октября 1982 г.) использовались две седиментационные ловушки, установленные на горизонтах 250 и 1200 м. Одним из результатов проведенного исследования является тот факт, что суммарный поток взвешенного вещества выше в глубоководной ловушке; поток ВОУ на нижней ловушке достигал максимальных значений ~ 40 мг/м²/сут, на более мелководной ~ 20 мг/м²/сут.

На рис. 5 приведены полученные по результатам моделирования графики изменчивости во времени потоков ВОУ для этих горизонтов в узле сетки с координатами $42,063^\circ$ с. ш. и $32,362^\circ$ в. д. Несмотря на то что результаты моделирования относятся к другому промежутку времени, главные особенности, отмеченные в работе [11], сохраняются и для них: вертикальный поток ВОУ на горизонте 1200 м практически на всем периоде моделирования больше, чем на горизонте 250 м, его максимальные значения составляли ~ 40 мг/м²/сут, в то время как на горизонте 250 м они достигали ~ 20 мг/м²/сут.



Р и с. 5. Изменение во времени потоков ВОУ в узле расчетной сетки модели с координатами $42,063^\circ$ с. ш. и $32,362^\circ$ в. д. на горизонтах 250 м (серая линия) и 1200 м (черная)

F i g. 5. Graphs of time variability of POC fluxes in the model computational grid node (coordinates are 42.063° N and 32.362° E) at the 250 m (gray line) and 1200 m (black line) horizons

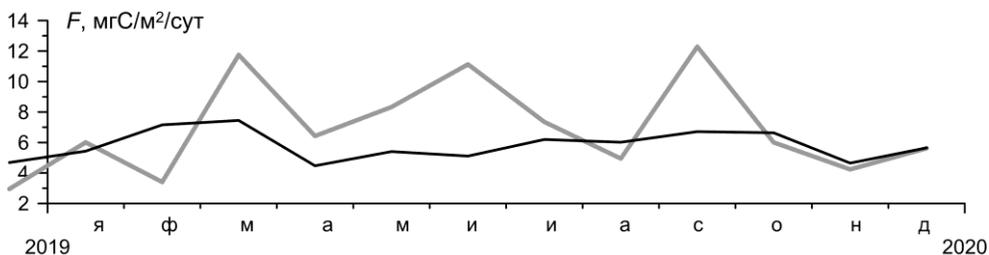


Р и с. 6. Профили потока ВОУ (a) и вертикальной скорости (b) для узла расчетной сетки модели с координатами $42,063^\circ$ с. ш. и $32,362^\circ$ в. д.

F i g. 6. Profiles of POC flux (a) and vertical velocity (b) for the model computational grid node (coordinates are 42.063° N and 32.362° E)

На картах, приведенных на рис. 4, видно, что в районе координат, указанных на рис. 5, наблюдаются повышенные значения вертикальной скорости и соответственно – потоков ВОУ для всех месяцев. На рис. 6 показаны профили вертикальной скорости и потока ВОУ, полученные осреднением за весь период интегрирования. Средняя вертикальная скорость, направленная ко дну бассейна, достигает максимального значения на глубине ~ 1000 м, вертикальный поток ВОУ также имеет максимум приблизительно на этой глубине. То есть характер течений в этом месте Черного моря таков, что на горизонте 1200 м вертикальный поток заметно больше, чем на глубине 250 м.

В последние годы отбор проб с помощью седиментационных ловушек проводится на постоянной основе. В работе [10] изложены некоторые результаты обработки проб, полученных с помощью ловушек, установленных в глубоководной части Черного моря на разрезе м. Херсонес – пролив Босфор в точке с координатами 43,8° с. ш. и 32,1° в. д. в ноябре 2018 г. на глубинах 150 и 1700 м. Отбор проб проводился в течение года с заданной экспозицией 1 мес. Средний за весь период измерений вертикальный поток ВОУ по результатам обработки образцов составил 1,9 мг/м²/сут для горизонта 150 м и 6,57 мг/м²/сут для горизонта 1700 м. То есть значения потоков ВОУ на глубинном горизонте выше, чем на мелководном.



Р и с. 7. Временная изменчивость потоков ВОУ в узле расчетной сетки модели с координатами 43,8° с. ш. и 32,1° в. д. на горизонтах 150 м (серая линия) и 1700 м (черная)

F i g. 7. Temporal variability of POC fluxes in the model computational grid node (coordinates are 43.8° N and 32.1° E) at the 150 m (gray line) and 1700 m (black line) horizons

Представленные на рис. 7 вертикальные потоки за 2019 г. получены по результатам моделирования. Здесь на горизонте 150 м в целом они больше (за исключением нескольких месяцев), чем на горизонте 1700 м. Средние значения потоков составили 6,95 мг/м²/сут на глубине 150 м и 5,8 мг/м²/сут на глубине 1700 м. Таким образом, среднее значение вертикального потока ВОУ на глубинном горизонте, полученное по результатам моделирования, близко к измеренному, а на горизонте 150 м результаты моделирования превышают измеренные значения.

На основе полученных полей можно оценить, сколько взвешенного углерода оседает на дно и тем самым выводится из карбонатной системы Черного моря. Так как вертикальная скорость жидкости на дне равна нулю в силу условия непротекания, вертикальный поток взвешенного углерода в каждой точке морского дна будет равен $F_b = POC_b \cdot W_s$, где POC_b – концентрация взвешенного углерода в придонной ячейке. На рис. 8 приведены графики изменения

суммарного потока взвешенного углерода на дно Черного моря для всей акватории и шельфовой зоны. Значения потоков для шельфа и всего моря практически совпадают. Это говорит о том, что в основном оседание взвешенного углерода на дно на шельфе происходит за счет того, что на значительной части северо-западного шельфа глубина меньше 50 м, а на этих глубинах концентрация ВОУ на два порядка превосходит соответствующие значения в глубинных слоях моря. Максимум оседания на дно приходится примерно на март, что соответствует максимуму суммарного содержания ВОУ в слое фотосинтеза (рис. 1).

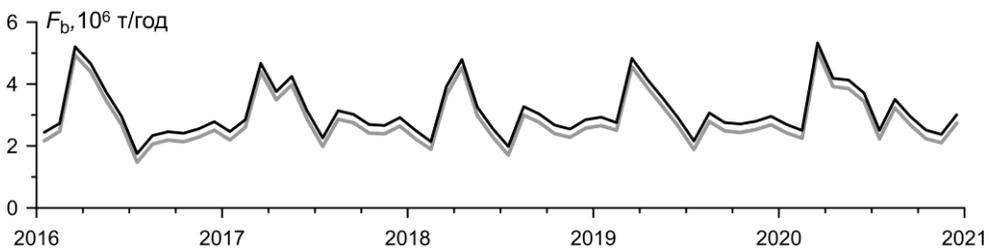


Рис. 8. Суммарный поток оседания ВОУ на дно Черного моря (черная линия) и шельфа (серая линия) по результатам численного моделирования
Fig. 8. Total flux of POC settling to the Black Sea bottom (black line) and shelf (gray line) based on the results of numerical modeling

На рис. 9 показано распределение потоков оседания ВОУ на дно Черного моря для марта (максимумы на графиках рис. 8) и для июля (минимумы). Видно, что оседание на дно в районе шельфа существенно превосходит оседание в глубоководной части моря. Среднее значение потери углерода вследствие оседания на дно равно (по графику на рис. 8) $3,1 \cdot 10^6$ т/год ($2,83 \cdot 10^6$ т/год – на шельфе). В работе [11] поступление в Черное море ВОУ со стоком рек оценивалось в $2,6 \cdot 10^6$ т/год, что оказалось близким к значению оседания на дно, полученному по результатам моделирования.

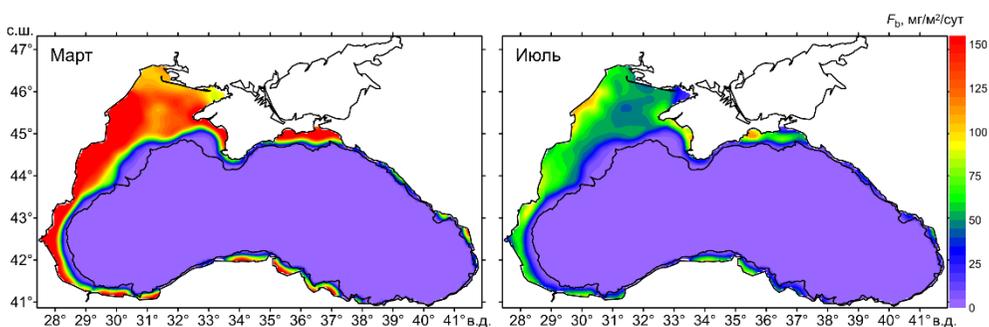


Рис. 9. Карты распределения потоков оседания ВОУ на дно Черного моря для двух месяцев по результатам численного моделирования
Fig. 9. Maps of distribution of POC settling fluxes to the Black Sea bottom for two months based on the results of numerical modeling

Заключение

В работе рассмотрена созданная модель для расчета содержания взвешенного органического вещества в глубоких слоях Черного моря. Для расчета ВОВ в верхнем 200-метровом слое применяется существующая модель нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря, результаты которой на нижнем расчетном горизонте используются в качестве граничных условий для расчета концентрации органического углерода в нижележащих слоях.

Был выполнен расчет по модели на 5 лет, в результате получены концентрации ВОУ на регулярной сетке с дискретностью по времени 1 сут. Концентрация взвешенной органики в приповерхностном слое Черного моря по результатам моделирования существенно выше, чем в глубоководном слое в силу влияния биологических процессов.

С использованием модельных полей концентрации ВОУ и гидродинамических полей, полученных по модели циркуляции Черного моря, были рассчитаны вертикальные потоки ВОУ. Так же, как и концентрации, значения потоков существенно больше в приповерхностном слое Черного моря. Вертикальный поток ВОУ в приповерхностном слое определяется в основном концентрацией взвеси, в глубоководном слое – вертикальной скоростью, направленной вниз. Этот вывод подтверждается картами распределения средних концентраций, потоков ВОУ и вертикальной скорости на горизонтах 30 и 1200 м. Однако пространственное распределение потока ВОУ даже на горизонте 30 м может заметно коррелировать с распределением вертикальной скорости.

Результаты численного моделирования потоков ВОУ сравнивались с результатами обработки проб, отобранных с помощью седиментационных ловушек в двух точках Черного моря. Результаты моделирования показали довольно хорошее качественное и иногда количественное соответствие с результатами измерений.

На основе результатов моделирования был оценен поток углерода из толщи воды на дно как результат оседания взвешенного вещества. Основная часть этого потока приходится на шельфовую зону моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Люцарев С. В., Шанин С. С. Особенности распределения взвешенного органического углерода в толще вод Черного моря // *Океанология*. 1996. Т. 36, № 4. С. 538–542.
2. Еремеева Л. В., Бурлакова З. П., Коновалов С. К. Сезонная и пространственная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в деятельном слое Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 1998. № 5. С. 30–62.
3. Бурлакова З. П., Еремеева Л. В., Коновалов С. К. Бюджет и потоки взвешенного органического углерода и азота по данным их вертикального распределения в глубоководной части Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2003. № 3. С. 34–49.
4. Геологические исследования Черного моря (81-й рейс научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий») / А. А. Клювиткин [и др.] // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 5. С. 838–840. EDN ZMDQCB. <https://doi.org/10.7868/S0030157417050197>
5. Комплексные исследования Черного моря в 101-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» / А. А. Клювиткин [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 2. С. 315–318. EDN ZKXFXF. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574592315-318>

6. *Dorofeev V. L., Sukhikh L. I.* Studying Long-Term Variations in Black-Sea Ecosystem Based on the Assimilation of Remote Sensing Data in a Numerical Model // *Water Resources*. 2019. Vol. 46, iss. 1. P. 65–75. <https://doi.org/10.1134/S0097807819010032>
7. *Gregoire M., Raick 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>
8. *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Анализ долговременной изменчивости гидродинамических полей в верхнем 200-метровом слое Черного моря на основе результатов реанализа // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 5. С. 617–630. EDN PILFWG.
9. *Karl D. M., Knauer G. A.* Microbial production and particle flux in the upper 350 m of the Black Sea // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1991. Vol. 38, Suppl. 2. P. S921–S942. [https://doi.org/10.1016/S0198-0149\(10\)80017-2](https://doi.org/10.1016/S0198-0149(10)80017-2)
10. *Мукосеев И. Н., Гурова Ю. С., Орехова Н. А.* Потоки углерода со взвешенным веществом в Черном море // *Моря России: от теории к практике океанологических исследований : тезисы докладов Всероссийской научной конференции*. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2023. С. 276–277. EDN XNBZRI.
11. *Particle flux in the Black Sea: Nature of the organic matter / E. Izdar [et al.] // Mitteilungen aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Hamburg : Hamburg, 1987. SCOPE/UNEP Sonderband Heft 62. P. 1–18.*

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**, **SPIN-код: 7144-1950**, dorofeyev_viktor@mail.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**, **SPIN-код: 6168-6090**, l.sukhikh@gmail.com