

## Взвешенное вещество глубоководной части Черного моря

И. Н. Мукосеев , Н. А. Орехова

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
 igor.mukos@gmail.com

Поступила в редакцию 01.07.2024; одобрена после рецензирования 07.08.2024;  
принята к публикации 12.09.2024.

### *Аннотация*

*Цель.* Исследование потока взвешенного вещества (ВВ) в глубоководной части Черного моря, его изменчивости и трансформации состава в анаэробных условиях по данным 2021–2022 гг. – цель настоящей работы.

*Методы и результаты.* Данные получены с помощью седиментационных ловушек, установленных на пяти горизонтах на разрезе мыс Херсонес – пролив Босфор (Черное море). Автоматическая глубоководная седиментационная обсерватория (АГОС) была установлена в ходе 119-го рейса НИС «Профессор Водяницкий», подъем осуществлялся в 124-м рейсе в 2022 г. Исследования охватили все сезоны 2021–2022 гг. Для сбора материала в составе АГОС были использованы два типа ловушек – для определения вертикального распределения ВВ и для исследования его сезонного хода. Обработка проводилась по единой для всех проб методике, включающей фильтрацию, высушивание, гравиметрический анализ для расчета потоков ВВ, а также определение содержания органического и неорганического углерода методом кулонометрического титрования в лаборатории Морского гидрофизического института РАН. В ходе исследования были получены данные как вертикального распределения потока ВВ, так и его сезонного хода. Выявлены закономерности распределения ВВ, а также органического и неорганического углерода, входящего в его состав.

*Выводы.* Динамика потока ВВ и углерода определяется различными процессами, включая физические и биогеохимические. Потоки ВВ имеют неоднородное распределение по глубине и характеризуются сезонной изменчивостью. Анализируя данные интегральных ловушек, можно отметить, что поток ВВ изменяется в пределах  $62\text{--}99\text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  на различных глубинах. На глубинах 218 и 1568 м поток ВВ достигает пиковой интенсивности. Его снижение зависит от различных биогеохимических процессов – растворения, окисления и минерализации. В свою очередь, увеличение потока ВВ может быть связано как с глубинными течениями, так и с физико-химическими процессами сорбции. Сезонные изменения потока ВВ представлены двумя пиками – максимумом в период с июля по сентябрь и минимумом в марте. Концентрация углерода во ВВ также меняется в зависимости от глубины и сезонного хода, который в основном определяется биологическими процессами. Отставание между пиками «цветения» кокколитофорид на поверхности и максимальными значениями потока неорганического углерода, зафиксированного ловушкой, может объясняться скоростями осаждения.

**Ключевые слова:** взвешенное вещество, органический углерод, неорганический углерод, карбонаты, седиментационные ловушки, кокколитофориды, Черное море

**Благодарности:** работа выполнена в рамках тем государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2022-0002 «Мониторинг карбонатной системы, содержания и потоков CO<sub>2</sub> в морской среде Черного и Азовского морей» и FNNN-2023-0001 «Обеспечение климатического и биогеохимического мониторинга потоков углерода в Черном море с использованием многолетних данных наблюдений и результатов численного моделирования». Авторы выражают благодарность за помощь в организации работ и постановке ловушки кандидату геолого-минералогических наук ведущему научному сотруднику лаборатории физико-геологических исследований им. А. П. Лисицына Института океанологии РАН А. А. Клювиткину.

**Для цитирования:** *Мукозеев И. Н., Орехова Н. А.* Взвешенное вещество глубоководной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 6. С. 891–904. EDN OAGXII.

Original article

## Suspended Matter of the Deep-Water Part of the Black Sea

I. N. Mukoseev , N. A. Orekhova

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

 *igor.mukos@gmail.com*

### *Abstract*

**Purpose.** The purpose of the work is to research the suspended matter (SM) flux in the deep part of the Black Sea, its variability and transformation of composition under the anaerobic conditions based on the data of 2021–2022.

**Methods and Results.** The data were obtained using the sediment traps installed at five horizons at the transect Cape Chersonesos – Bosphorus Strait in the Black Sea. The automatic deep-sea sedimentation observatory (AGOS) was installed during the 119<sup>th</sup> cruise of the RV «Professor Vodyanitsky» and lifted during the 124<sup>th</sup> cruise in 2022. The research covered all the seasons in 2021–2022. To collect the material, two types of traps were included in AGOS: to determine the SM vertical distribution and to study its seasonal variation. The processing was carried out by the method common for all the samples, including filtration, drying, gravimetric analysis for calculating suspended particulate matter fluxes, as well as determination of the organic and inorganic carbon contents by the coulometric titration method in the laboratory of Marine Hydrophysical Institute of RAS. The study made it possible to obtain the data both on the vertical distribution of SM flux and its seasonal variation. The patterns of distribution of SM, as well as organic and inorganic carbon involved in its composition were revealed.

**Conclusions.** The dynamics of SM and carbon fluxes are determined by different processes including the physical and biogeochemical ones. The SM fluxes are distributed unevenly over depth and change seasonally in course of a year. Analysis of the integral trap data shows that at different depths the SM flux changes within 62–99 mg·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>. At depths 218 and 1568 m it reaches its peak intensity. Its decrease depends on various biogeochemical processes, namely dissolution, oxidation and mineralization. The increase of SM flux, in its turn, can be related both to the deep-sea currents, and to the physical and chemical sorption processes. The seasonal changes in SM flux are represented by two peaks: its maximum falls on the period July – September and its minimum – on March. The carbon concentration in SM also varies with depth and seasonal variations which are conditioned mainly by the biological processes. The lag between the peaks of coccolithophore bloom at the surface and the maximum values of the inorganic carbon flux recorded by the trap can be explained by the sedimentation rates.

**Keywords:** suspended matter, organic carbon, inorganic carbon, carbonates, sediment traps, coccolithophores, Black Sea

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI on themes “Monitoring of the carbonate system, CO<sub>2</sub> content and fluxes in the marine environ-

ment of the Black Sea and the Sea of Azov” FNNN-2022-0002 and “Ensuring climatic and biogeochemical monitoring of carbon fluxes in the Black Sea using long-term *in situ* data and numerical modeling results” FNNN-2023-0001. The authors are grateful to A. A. Klyuvitkin, Ph.D. (Geolog. and mineralog.), Head scientist researcher in the Laboratory of physical and geological research n. a. A. P. Lisitsyn (Institute of Oceanology, RAS) for his assistance in organizing the work and installing the trap.

**For citation:** Mukoseev, I.N. and Orekhova, N.A., 2024. Suspended Matter of the Deep-Water Part of the Black Sea. *Physical Oceanography*, 31(6), pp. 838-850.

## Введение

Взвешенное вещество (ВВ) является важным компонентом морской экосистемы. Формирование его состава происходит преимущественно в верхней толще вод в результате комплексного воздействия веществ различных геосфер – литосферы, атмосферы, гидросферы, биосферы [1]. Взвешенное вещество включает следующие составляющие: литогенную (компоненты терригенного и абиогенного происхождения, поступают с речным стоком, в результате механических разрушений берегов и эолового переноса, а также благодаря таянию льда) и биогенную (остатки живых и отмерших организмов, образуется из органического вещества ( $C_{\text{орг}}$ ), аморфного кремнезема ( $\text{SiO}_{2\text{био}}$ ) и взвешенного карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), которые входят в состав планктона и его детрита) [2–4].

При смене окислительно-восстановительных условий, как правило, происходит изменение соотношения и содержания литогенной и биогенной составляющих ВВ. Качественный и количественный состав ВВ отражает процессы его трансформации в водной толще. Так как углерод является ключевым компонентом ВВ, исследование его органической и неорганической форм, а также их соотношения позволяет изучить доминирующие механизмы цикла углерода в гидросфере. Содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) во взвешенном веществе отражает продуктивность экосистемы, интенсивность протекания в ней биохимических процессов и устойчивость к воздействиям на нее различных природных и антропогенных факторов [5, 6]. Также весомый вклад во взвешенное вещество вносят карбонаты – как терригенные, вынесенные с суши, так и автохтонные, образованные в водной толще [7]. Неорганический углерод ( $C_{\text{карб}}$ ) является структурным компонентом карбонатных минералов, представленных во взвеси биогенными и хемогенными образованиями.

Согласно данным многолетних исследований фитопланктона, основными карбонат-концентрирующими биогенными частицами в составе ВВ в Черном море являются кокколитофориды *Emiliana huxleyi* [8, 9]. Эти водоросли служат посредником при перемещении  $C_{\text{карб}}$  из атмосферы и эвфотической зоны в донные отложения, так как в период окончания «цветения» кокколиты частично оседают на дно и являются основным компонентом известковых илов [8].

В водной толще тонкодисперсные микро- и наночастицы ВВ агрегируются под влиянием биологических (фильтрация воды организмами зоопланктона с превращением осадочного вещества в pellets и аморфные комки (морской

снег)), а также физико-химических (коагуляция и флокуляция коллоидов) процессов. Вследствие этого формируются вертикальные потоки осадочного вещества, которое трансформируется при прохождении водной толщи и в конечном счете подвергается процессу захоронения в виде донных отложений [7]. Соответственно, исследование вертикального распределения ВВ представляет собой основу для понимания процессов современного осадконакопления [1].

Таким образом, исследование потока ВВ и механизмов его образования и трансформации является актуальной океанографической задачей.

До последнего времени исследование ВВ в российском секторе Черного моря носило эпизодический характер [6, 10] и выполнялись преимущественно в шельфовых районах [11]. Наиболее полно обзор по изучению ВВ и его потока в Черном море представлен в монографии [1]. Современные исследования ВВ основаны преимущественно на спутниковых данных [3–5, 12], при этом у такого подхода имеется ряд недостатков, в частности отсутствие возможности изучать вертикальный профиль ВВ и процессы его трансформации.

В 2015 г. сотрудниками Института океанологии РАН положено начало исследованиям вертикального профиля и внутригодовой изменчивости взвешенного вещества в открытой части Черного моря [1]. В глубоководной части были установлены седиментационные ловушки в составе автоматической глубоководной седиментационной обсерватории (АГОС), концепция которой разработана и внедрена в практику седиментологических исследований академиком А. П. Лисицыным [13, 14].

Концепция АГОС подразумевает возможность использования комплексного подхода в изучении потока ВВ для определения сопутствующих параметров, а именно: определения основных параметров верхнего слоя вод дистанционными методами исследования с использованием спутниковых снимков; использования седиментационных ловушек с различным временным разрешением, устанавливаемых на различных глубинах; подключения дополнительных зондов для определения гидрологических параметров среды в точке постановки ловушки (течения, температура, соленость, содержание, прозрачность, флуоресценция и др.).

Цель настоящей работы – количественная оценка потока взвешенного вещества в глубоководной части Черного моря, его изменчивости и трансформации состава в анаэробных условиях по данным 2021–2022 гг.

### **Материалы и методы**

Данные были получены в результате постановки на пяти горизонтах седиментационных ловушек в глубоководной части Черного моря (глубина постановки станции 1968 м) на разрезе м. Херсонес – пролив Босфор (расстояние от м. Херсонес 180 км).

Для отбора проб использовались два типа седиментационных ловушек: первый – с возможностью получения непрерывного по времени сбора материала с заданным временем экспозиции (дифференциальные 12-стаканные седи-

ментационные ловушки «Лотос-3»), второй – интегральные малые цилиндрические седиментационные ловушки МСЛ-110, которые собирают материал в течение всего времени работы станции [1]. На рис. 1 показан район установки седиментационных ловушек. Обсерватория АГОС была установлена в ходе 119-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» 24 сентября 2021 г., подъем станции выполнен 4 октября 2022 г. в ходе 124-го рейса этого научно-исследовательского судна. Для интегрального сбора материала в течение года были установлены МСЛ на глубинах 218, 568, 1068, 1568 и 1918 м. На глубинах 218 м («Лотос-3») и 1918 м (ловушка «Лотос-1» не сработала, данные в работе не обсуждаются) были установлены дифференциальные седиментационные ловушки со временем экспозиции 30 сут. Таким образом, период работы АГОС на разных глубинах и с заданной дискретностью сбора ВВ составил 12 мес (375 сут), он охватывал все сезоны с сентября 2021 г. по октябрь 2022 г. Для сохранения собираемого материала в условиях, максимально приближенных к естественным, емкости-приемники заполняли 4%-ным раствором хлорида натрия, что в два раза превышает среднюю соленость вод Черного моря.

На глубине 218 м ловушки были установлены для оценки потока из верхнего квазиоднородного слоя, на глубине 1918 м – для оценки потока, достигающего дна и участвующего в формировании осадков. Три промежуточные глубины были выбраны для оценки изменчивости потока ВВ с глубиной.

После подъема емкости с пробами ВВ сохранялись в холодильной камере до лабораторной обработки, которая проводилась по единой методике, описанной в [1].

Пробы фильтровали под вакуумом через параллельные предварительно взвешенные ядерные фильтры с размером пор 0,45 мкм для определения суммарного потока ВВ, а также через прокаленные при температуре 450°C стекловолокнистые фильтры *Whatman GF/F* для определения содержания общего, органического и карбонатного углерода.

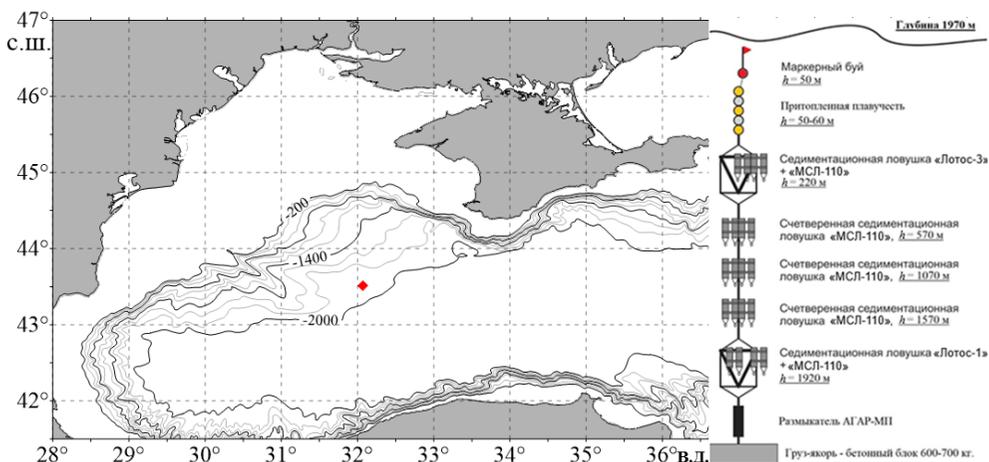
После высушивания при температуре 60°C до постоянной массы и взвешивания фильтров с отфильтрованным веществом получали суммарное количество материала (масса сухой взвеси, мг). Для взвешивания материала использовали аналитические лабораторные весы *Adventurer AR2140* с точностью измерения до 0,0001 г.

Поток взвешенного вещества рассчитывался как отношение массы сухого ВВ к произведению площади сбора ловушки и времени экспозиции:

$$F = \frac{m}{ST}, \quad (1)$$

где  $F$  – поток ВВ,  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ ;  $m$  – масса сухой взвеси, мг;  $S$  – площадь сбора,  $\text{м}^2$ ;  $T$  – время экспозиции, сут.

Содержание общего, органического и карбонатного углерода определяли методом кулонометрического титрования на анализаторе углерода АН-7529 [15].



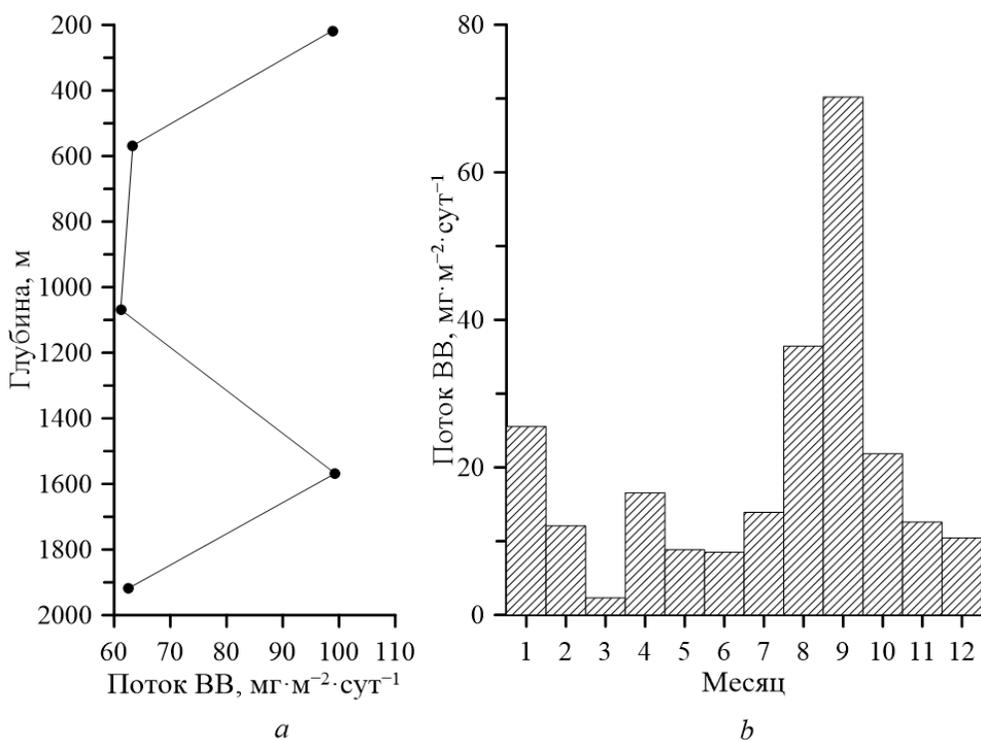
**Р и с. 1.** Схема АГОС (а) и район ее постановки (b)  
**F i g. 1.** Scheme of the AGOS (a) and the area of its installation (b)

### Результаты

По данным, полученным с помощью седиментационных ловушек, определены вертикальный поток ВВ, содержание  $S_{орг}$  и  $S_{карб}$  в пробах, а также рассчитаны потоки органического и неорганического углерода со взвешенным веществом. На глубине 218 м изучена их сезонная изменчивость. Потоки ВВ характеризовались неоднородностью распределения как по глубине, так и в течение года (рис. 2).

По данным интегральных ловушек, поток ВВ изменялся в диапазоне  $62\text{--}99 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  (рис. 2, а). Отмечено наличие двух пиков одинаковой интенсивности ( $99 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ ) на глубинах 218 и 1568 м; на глубинах 568, 1068 и 1918 м значение снижалось и составляло  $61\text{--}63 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ . Порядок этих значений сопоставим как с современными данными за 2015–2016 гг. для центральной части моря у подножия северо-западного склона глубоководной котловины [1], так и с данными 80-х годов прошлого века для Анатолийского побережья [16–18].

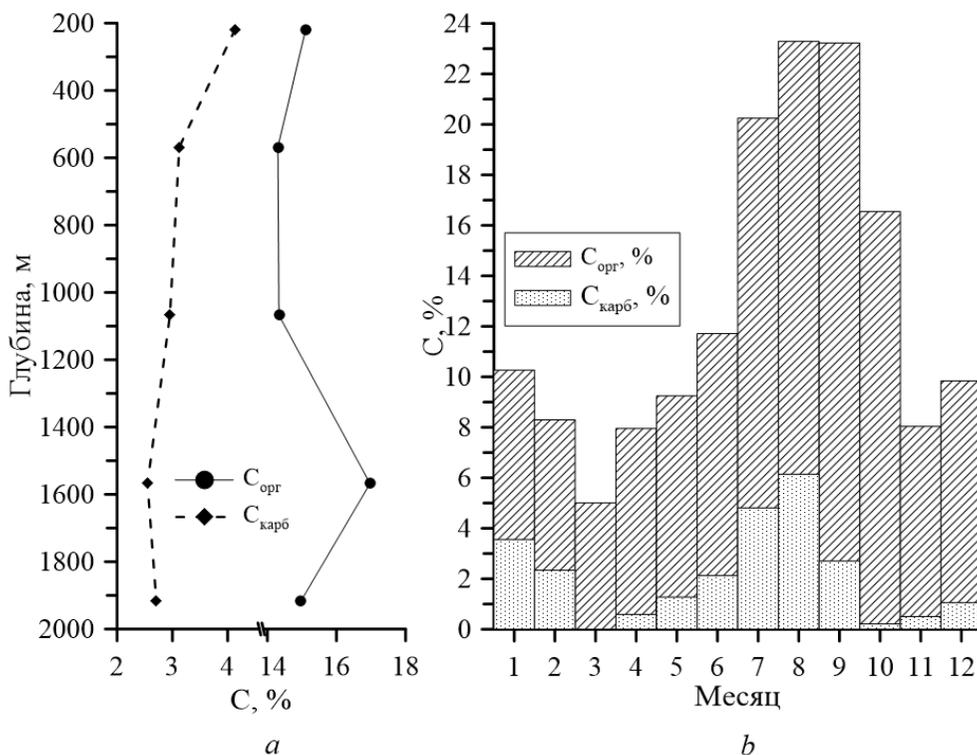
Сезонная изменчивость потока ВВ на глубине 218 м характеризовалась максимумом в сентябре ( $70,2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  в пересчете на 30 дней) и минимумом в марте ( $2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ ) (рис. 2, b). В целом значения потока ВВ изменялись в пределах  $9\text{--}36 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , что также соответствует литературным данным [1, 16–18].



**Р и с. 2.** Вертикальная (*a*) и сезонная (*b*) изменчивость потока ВВ по данным 2021–2022 гг.  
**F i g. 2.** Vertical (*a*) and seasonal (*b*) variability of the suspended matter flux based on the 2021–2022 data

Распределение углерода, одного из основных компонентов ВВ, соответствовало вертикальному профилю его потока: максимальные концентрации наблюдались на глубинах 218 и 1568 м (19,25 и 19,52% соответственно); на глубинах 568, 1068, 1918 м концентрации находились в узких пределах 17,29–17,68%. С глубиной незначительно изменялось соотношение органической и неорганической форм углерода (рис. 3, *a*), при этом вклад органического углерода в среднем составлял 83%.

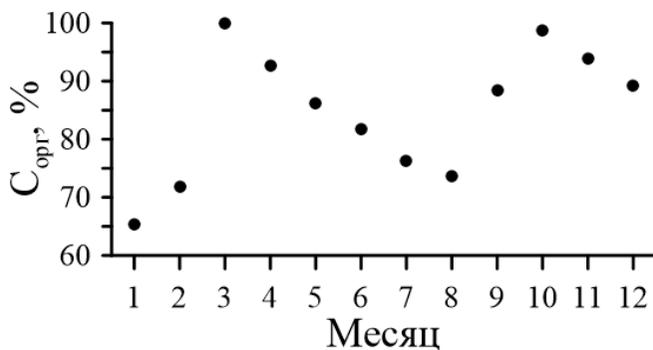
В течение года содержание углерода во взвешенном веществе изменялось в пределах 5–23,29% с максимумом в августе и сентябре и минимумом в марте, когда наблюдался минимальный поток ВВ (рис. 2, *b*). Сезонная изменчивость концентрации  $S_{\text{орг}}$  качественно совпадала с сезонной изменчивостью потока ВВ и характеризовалась минимумами в марте и ноябре (5,0 и 7,54% соответственно) и максимумами в июле – сентябре (16,3–20,53%) (рис. 3, *b*). Распределение  $S_{\text{карб}}$  во взвешенном веществе носило несколько иной характер: наблюдались минимумы концентрации в весенний и осенний периоды (в марте, апреле и октябре, ноябре соответственно).



**Р и с. 3.** Распределение органической ( $C_{\text{орг}}$ ) и неорганической ( $C_{\text{карб}}$ ) форм углерода с глубиной (a) и в течение года (b)

**Fig. 3.** Distribution of organic ( $C_{\text{орг}}$ ) and inorganic ( $C_{\text{карб}}$ ) forms of carbon with depth (a) and during a year (b)

Подобное распределение концентраций органической и неорганической форм углерода выявило, что вклад органической составляющей также характеризуется выраженной сезонностью с максимумами в марте и октябре (рис. 4): в первый период наблюдалось плавное снижение доли  $C_{\text{орг}}$  на 25% с марта по август; во второй – более резкое снижение доли  $C_{\text{орг}}$  с октября по январь.



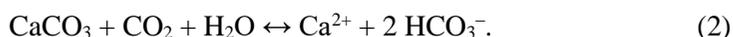
**Р и с. 4.** Доля органической составляющей от суммарного углерода во взвешенном веществе

**Fig. 4.** Share of organic component in total carbon in suspended matter

## Обсуждение результатов

**Вертикальный профиль.** Колебание интенсивности потока ВВ с глубиной обусловлено влиянием как физических, так и биогеохимических процессов. По данным, полученным с помощью седиментационных ловушек, определены вертикальные потоки, содержание  $C_{\text{орг}}$  и  $C_{\text{карб}}$  в пробах, а также рассчитаны потоки органического и неорганического углерода со взвешенным веществом. На глубине 218 м изучена их сезонная изменчивость.

Поток  $C_{\text{карб}}$  для Черного моря определяется преимущественно процессами с участием кокколитофорид, так как для этой экосистемы они являются преобладающими водорослями, имеющими в основе карбонатный скелет [8, 9]. За счет недостаточного насыщения глубинных водных масс карбонатами [19], а также снижения рН и увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  должно происходить растворение карбонатов, что проявляется в снижении потока  $C_{\text{карб}}$  с глубиной (рис. 3, а):



Увеличение потока ВВ на глубине 1568 м и ниже, возможно, обусловлено глубинными течениями [10]. По данным [20], в нижних нефелоидных слоях, которые образуются в результате донной эрозии под действием внутренних приливов и волн, происходит адвективный перенос вод. Мелкозернистые, ресуспендированные отложения, включающие частицы глины, ила и кокколит, часто вовлекаются в эту форму придонного горизонтального переноса [16, 17].

Увеличение концентрации взвеси также может определяться влиянием анаэробных условий вод Черного моря и рядом особенностей протекания биохимических реакций в этих условиях. Так, некоторые исследователи связывают это с реакциями с участием марганца, железа и других микроэлементов, образующих в сероводородной зоне нерастворимые сульфиды, которые в дальнейшем осаждаются, сорбируя некоторую часть растворенных соединений, и способствуют формированию взвеси сложного состава [10]. Наличие пиритов во взвеси глубинных вод Черного моря показано в работе [1]. Кроме того, доля потока углерода составляет 20% от потока ВВ, что указывает на сложный компонентный состав ВВ и подтверждает теорию образования в анаэробном слое сульфидов металлов, в частности железа и марганца, и сорбирование ими других растворенных компонентов с образованием комплексных соединений:



Поскольку в наших исследованиях наблюдается снижение потока ВВ с глубиной, а профиль потока органического вещества качественно совпадает с вертикальным профилем потока ВВ (рис. 2, а; 3, а), можно предположить, что для глубоководных вод Черного моря вклад органической составляющей является преобладающим при формировании ВВ. На это также указывает тот

факт, что, согласно данным [1], с увеличением глубины концентрация карбонатов резко уменьшается и не определяется на глубине 1775 м. При этом увеличение интенсивности потока ВВ на глубине 1568 м и концентрации  $C_{орг}$ , вероятнее всего, определяется физическими процессами переноса.

**Сезонная изменчивость потока ВВ и углерода.** Установка долгосрочных седиментационных ловушек с заданным временем экспозиции, последующим сбором и анализом материала дает возможность изучать вклад различных физических, химических и биологических процессов в формирование ВВ и его последующую трансформацию при смене условий.

Сезонная изменчивость характеристик ВВ и его потока, прежде всего, определяется биологическими процессами с участием планктона и бактерий, которые, в свою очередь, также зависят от гидрологических условий, сезонных явлений [10] (в частности, от сезонных циклов первичных продуцентов, «цветения» кокколитофорид и диатомовых микроводорослей) в эвфотической зоне глубоководной области Черного моря [18, 21, 22].

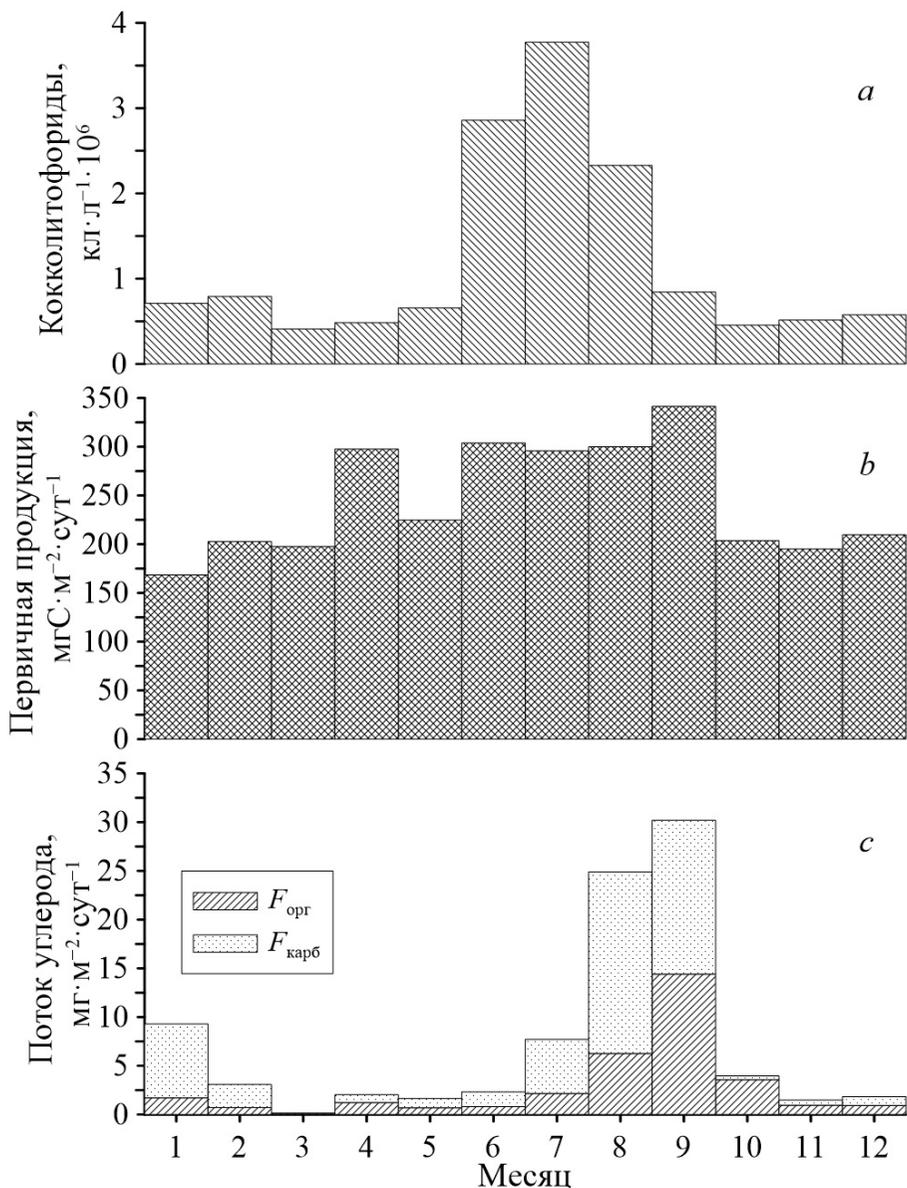
Пики значений потока ВВ на глубине 218 м приходятся на летний (август) и осенний (сентябрь) периоды (36,4 и 70,2  $мг \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$  соответственно). Их суммарный вклад составляет 45% от суммарного значения годового потока (рис. 2).

С учетом того, что по спутниковым данным (рис. 5, а) вспышка «цветения» кокколитофорид приходилась на июнь [9], а по данным ловушек максимальный вклад карбонатов в поток ВВ приходился на июль, август и сентябрь (40,1, 51,1 и 22,5% соответственно (рис. 5, с)), можно предположить, что в этот период поток ВВ обусловлен карбонатной составляющей и осаждением кокколитофорид. Скорость осаждения ВВ в этом случае должна соответствовать примерно  $7-9 м \cdot сут^{-1}$ , что согласуется с данными [23].

Наблюдаемое отставание в один-два месяца между временем пика продуктивности фитопланктона в эвфотической зоне и максимальными значениями потока неорганического углерода (представленного преимущественно кокколитофоридами) также обусловлено скоростями осаждения (в пределах  $1-36 м \cdot сут^{-1}$ ) [24].

В остальное время поток ВВ изменялся в пределах  $2,3-25,5 мг \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$  при среднем значении  $13 мг \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$  и характеризовался чередованием максимумов и минимумов (рис. 2). Минимальный поток ВВ зафиксирован в марте, в этот период он определялся только органической компонентой, а вклад неорганической составляющей отсутствовал (рис. 3, б; 4, 5). Для вод Черного моря характерно два пика «цветения» фитопланктона – осенне-зимний (более интенсивный, максимум приходится на ноябрь – декабрь) и зимне-весенний [25], это проявляется и в сезонном распределении ВВ и его потока (рис. 2, б).

Таким образом, сезонная динамика потока ВВ преимущественно совпадает с динамикой первичной продукции и численностью кокколитофорид (рис. 5) [9, 26].



**Р и с. 5.** Концентрации кокколитофорид (a) и первичной продукции (b) в районе постановки ловушки по спутниковым данным за 2022 г.; сезонный ход потоков органического ( $F_{\text{орг}}$ ) и неорганического углерода в составе карбонатов ( $F_{\text{карб}}$ ) во взвешенном веществе на глубине 218 м по данным ловушки «Лотос-3» (c)

**Fig. 5.** Concentrations of coccolithophores (a) and primary production (b) in the area of installed trap based on satellite data for 2022; seasonal variations of organic ( $F_{\text{орг}}$ ) and inorganic ( $F_{\text{карб}}$ ) carbon fluxes, as the parts of carbonates, in suspended matter at the 218 m depth based on the “Lotus” trap data (c)

### Заклучение

Сезонная динамика потока ВВ и углерода определяется влиянием как физических, так и биогеохимических процессов. Потоки ВВ характеризовались неоднородностью распределения с глубиной и в течение года.

Отмечено наличие двух пиков потока ВВ одинаковой интенсивности на глубинах 218 и 1568 м. Снижение интенсивности потока ВВ происходит за счет протекания биогеохимических процессов, приводящих к растворению, окислению и минерализации веществ, образующих ВВ. Увеличение концентрации ВВ и его потока, вероятнее всего, обусловлено влиянием течений либо протеканием физико-химических процессов сорбции на сульфидах металлов.

Сезонная изменчивость потока ВВ определялась преимущественно биологическими процессами с участием планктона, вклад органической составляющей достигал 83%. Пики значений потока ВВ приходились на летний период, их суммарный вклад составлял 45% от значений годового потока.

Минимальный поток ВВ зафиксирован в марте, в этот период он определялся только органической компонентой, а вклад неорганической составляющей отсутствовал.

Сезонная динамика потока ВВ соответствует спутниковым данным по первичной продукции и численности кокколитофорид, соотношение времени пиков их «цветения» в зоне фотосинтеза и потоков неорганического углерода на глубине 218 м соответствует расчетным скоростям осаждения в пределах 1–36 м·сут<sup>-1</sup>.

Измерения проведены в Центре коллективного пользования НИС «Профессор Водяницкий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества в глубоководной части Черного моря / А. А. Кловиткин [и др.] // Система Черного моря. Москва : Научный мир, 2018. С. 350–396. EDN ANCZBB. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018.350>
2. *Лисицын А. П.* Терригенная седиментация, климатическая зональность и взаимодействие терригенного и биогенного материала в океанах // Литология и полезные ископаемые. 1977. № 6. С. 3–22.
3. *Кукушкин А. С., Пархоменко А. В.* Пространственно-временная изменчивость содержания взвешенного вещества в поверхностном слое открытой части Черного моря // Океанология. 2021. Т. 61, № 2. С. 307–319. EDN EYVMTL. <https://doi.org/10.31857/S0030157421010123>
4. *Кукушкин А. С., Сулин В. В.* Оценка применимости спутниковых данных для исследования изменчивости содержания взвешенного вещества в поверхностном слое глубоководной области Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 595–605. EDN LPFNPI. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-595-605>
5. *Кукушкин А. С., Пархоменко А. В.* Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в юго-западной части Крымского побережья по данным судовых и спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 137–146. EDN ZABHZZ. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-137-146>
6. *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.
7. *Лукашин В. Н., Лисицын А. П.* Геохимия рассеянного осадочного вещества и его потоки в толще вод Каспийского моря // Океанология. 2016. Т. 56, № 5. С. 741–756. EDN WLNGJX. <https://doi.org/10.7868/S0030157416050099>

8. *Шоман Н. Ю., Соломонова Е. С., Акимов А. И.* Влияние света на изменение морфофизиологических характеристик кокколитофориды *Emiliania huxleyi* // Физиология растений. 2022. Т. 69, № 2. С. 216–224. EDN VBEJKE. <https://doi.org/10.31857/S0015330322020178>
9. *Микаэлян А. С., Силкин В. А., Паутова Л. А.* Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // Океанология. 2011. Т. 51, № 1. С. 45–53. EDN NDJCPH.
10. *Витюк Д. М.* Взвешенное вещество и его компоненты в Черном море // Гидробиологический журнал. 1975. Т. 11, № 1. С. 12–18.
11. *Денисов В. И., Латун В. В.* Потоки химических элементов в составе осаждающегося взвешенного вещества на шельфе Чёрного моря (по данным седиментационных ловушек) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2018. № 4. С. 77–85. EDN YSAVSH.
12. *Кукушкин А. С.* Оценка изменчивости содержания взвешенного вещества в глубоководной части Черного моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 2. С. 184–191. EDN BHISNR. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-2-184-191>
13. Глубоководные обсерватории на транскаспийском разрезе – непрерывные исследования потоков рассеянного осадочного вещества / А. П. Лисицын [и др.] // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456, № 4. С. 485–489. EDN SDXIAR. <https://doi.org/10.7868/S0869565214160245>
14. Рассеянные формы осадочного вещества и их потоки в океанах и морях на примере Белого моря (результаты 12 лет исследований) / А. П. Лисицын [и др.] // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456, № 3. С. 355–359. EDN OMDILJ. <https://doi.org/10.7868/S086956521415016X>
15. *Забегав И. А., Шульгин В. Ф., Орехова Н. А.* Применение инструментальных методов анализа донных отложений для экологического мониторинга морских экосистем // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Т. 7, № 4. С. 242–254.
16. Seasonal cyclicality of lithogenic particle fluxes at a southern Black Sea sediment trap station / S. Honjo [et al.] // Particles in the ocean. Eds. E. T. Degens, E. Izdar, S. Honjo. Mitteilungen aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Hamburg. 1987. SCOPE/UNEP Sonderband Heft 62. 19–39.
17. Particle flux in the Black Sea: Nature of the organic matter / E. Izdar [et al.] // Particles in the ocean. Eds. E. T. Degens, E. Izdar, S. Honjo. Mitteilungen aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Hamburg. 1987. SCOPE/UNEP Sonderband Heft 62. P. 1–18.
18. First data on sediment trap experiment in Black Sea deep water / E. Izdar [et al.] // Naturwissenschaften. 1984. Vol. 71. P. 478–479. <https://doi.org/10.1007/BF00455904>
19. *Zeebe R. E., Wolf-Gladrow D.* CO<sub>2</sub> in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes / Ser. ed. D. Halpern. Amsterdam : Elsevier, 2001. P. 360. (Elsevier Oceanography Series ; vol. 65)
20. *Dickson R. R., McCave I. N.* Nepheloid layers on the continental slope west of Porcupine Bank // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1986. Vol. 33, iss. 6. P. 791–818. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(86\)90089-0](https://doi.org/10.1016/0198-0149(86)90089-0)
21. *Samyshev E. Z., Minkina N. I.* The Seasonal Variability and Sedimentation Rate of Suspended Matter in Photic Layer of the Black Sea // Environment and Ecology Research. 2017. Vol. 5, iss. 3. P. 227–234. <https://doi.org/10.13189/eer.2017.050308>
22. Sedimentation of particulate matter during a phytoplankton spring bloom in relation to the hydrographical regime / V. Smetacek [et al.] // Marine Biology. 1978. Vol. 47. P. 211–226. <https://doi.org/10.1007/BF00541000>
23. *Пархоменко А. В., Кукушкин А. С.* Седиментационный поток взвешенного органического фосфора в пелагиали Черного моря // Океанология. 2018. Т. 58, № 2. С. 258–268. EDN ORRNGH. <https://doi.org/10.7868/S0030157418020107>

24. *Asper V. L.* Measuring the flux and sinking speed of marine snow aggregates // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1987. Vol. 34, iss. 1. P. 1–17. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(87\)90117-8](https://doi.org/10.1016/0198-0149(87)90117-8)
25. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла А / С. В. Востоков [и др.] // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 99–103. EDN RKUJZH. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485199-103>
26. *Vostokov S. V., Vostokova A. S., Vazyulya S. V.* Seasonal and Long-Term Variability of Coccolithophores in the Black Sea According to Remote Sensing Data and the Results of Field Investigations // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, iss. 1. 97. <https://doi.org/10.3390/jmse10010097>

*Об авторах:*

**Мукосеев Игорь Николаевич**, старший инженер, отдел биогеохимии моря, лаборатория мониторинга и исследования потоков парниковых газов и кислорода в морской среде, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7600-4992**, **ORCID ID: 0009-0000-3485-1004**, [igor.mukos@gmail.com](mailto:igor.mukos@gmail.com)

**Орехова Наталья Александровна**, ведущий научный сотрудник, зав. отделом биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 9050-4772**, **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X**, **ResearcherID: I-1755-2017**, **Scopus Author ID: 35784884700**, [natalia.orekhova@mhi-ras.ru](mailto:natalia.orekhova@mhi-ras.ru)