

Научная статья  
УДК 551.46 (262.5)  
EDN WRBJXJ

## Оценка потоков углекислого газа через поверхность Черного моря по результатам численного моделирования

В. Л. Дорофеев, Л. И. Сухих \*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\* e-mail: l.sukhikh@gmail.com*

### Аннотация

На основе численного моделирования изучается пространственно-временное распределение потоков  $\text{CO}_2$  через свободную поверхность Черного моря. Основным уравнением для решения этой задачи является трехмерное эволюционное уравнение переноса – диффузии для концентрации растворенного неорганического углерода. При моделировании в качестве входных параметров используются гидродинамические поля, являющиеся результатом проведенного ранее физического реанализа. Для описания влияния биологических факторов на распределение растворенного углекислого газа используется модель нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря. По результатам численного моделирования были рассчитаны концентрация и равновесное парциальное давление растворенного углекислого газа в поверхностном слое Черного моря. Показано, что зависимость от времени этих величин носит выраженный сезонный характер. На растворимость углекислого газа и, следовательно, на его потоки существенно влияет температура морской воды. Осредненное по площади Черного моря равновесное парциальное давление углекислого газа минимально в январе – феврале и максимально в июне – июле. Соответственно в теплый сезон поток углекислого газа направлен преимущественно из моря в атмосферу, в холодный сезон море в основном поглощает углекислый газ. На содержание  $\text{CO}_2$  в море влияют также биологические факторы. Так, в начале года почти по всей акватории Черного моря наблюдается высокая концентрация фитопланктона, из-за чего преобладает поглощение углекислого газа в процессе фотосинтеза. Летом преобладает выделение углекислого газа вследствие дыхания планктона и окисления органического вещества. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с натурными измерениями равновесного парциального давления растворенного углекислого газа, полученными в ходе научных рейсов.

**Ключевые слова:** карбонатная система, углекислый газ, парциальное давление углекислого газа, Черное море, морская экосистема, численное моделирование

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2023-0001. Авторы благодарят сотрудников отдела биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ за предоставленные результаты обработки натуральных данных.

© Дорофеев В. Л., Сухих Л. И., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Оценка потоков углекислого газа через поверхность Черного моря по результатам численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 36–48. EDN WRBJXJ.

## Estimation of Carbon Dioxide Fluxes through the Surface of the Black Sea from Numerical Simulation Results

V. L. Dorofeev, L. I. Sukhikh \*

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: l.sukhikh@gmail.com

### Abstract

Based on numerical simulation, the paper studies the spatiotemporal distribution of CO<sub>2</sub> fluxes through the free surface of the Black Sea. The basic equation for solving this problem is the three-dimensional evolutionary transport–diffusion equation for the concentration of dissolved inorganic carbon. The simulation uses hydrodynamic fields resulting from a previous physical reanalysis as input parameters. A model of the lower level of the Black-Sea ecosystem food chain is used to describe the influence of biological factors on the dissolved carbon dioxide distribution. The concentration and equilibrium partial pressure of dissolved carbon dioxide in the surface layer of the Black Sea were calculated from the numerical simulation results. It is shown that the time dependence of these quantities is highly seasonal. The seawater temperature significantly affects the solubility of carbon dioxide and therefore its fluxes. The equilibrium partial pressure of carbon dioxide averaged over the area of the Black Sea is minimal in January–February and maximal in June–July. Accordingly, in the warm season, the flux of carbon dioxide is directed mainly from the sea to the atmosphere; in the cold season, the sea mainly absorbs carbon dioxide. Biological factors also influence the CO<sub>2</sub> content in the sea. Thus, at the beginning of the year, a high concentration of phytoplankton is observed almost throughout the entire Black Sea water area, which is why the absorption of carbon dioxide predominates during photosynthesis. In summer, the release of carbon dioxide predominates due to plankton respiration and oxidation of organic matter. The simulation results are in fairly good agreement with *in situ* measurements of the partial pressure of dissolved carbon dioxide obtained during scientific cruises.

**Keywords:** carbonate system, carbon dioxide, partial pressure of carbon dioxide, Black Sea, marine ecosystem, numerical simulation

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the topic of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2023-0001. The authors thank the staff of the Marine Biogeochemistry Department of the FSBSI FRC MHI for providing the results of field data processing.

**For citation:** Dorofeev, V.L. and Sukhikh, L.I., 2024. Estimation of Carbon Dioxide Fluxes through the Surface of the Black Sea from the Numerical Simulation Results. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 36–48.

## Введение

Изучению карбонатной системы Черного моря и, в частности, потока углекислого газа через поверхность посвящено большое количество работ (например, [1–7]). Эти исследования базируются в основном на данных измерений. Недостатком этих данных является ограниченность по пространству и времени. Для получения пространственных распределений и временной эволюции компонентов карбонатной системы необходимо использовать численные трехмерные модели морской среды. В последнее время получило широкое распространение численное моделирование морских экосистем, в том числе моделирование экосистемы Черного моря [8–11]. В качестве примера модели для всего Мирового океана можно упомянуть модель *PISCES* [12]. Численные модели экосистемы описывают эволюцию биологических и геохимических полей, а также элементов карбонатной системы. Их преимуществом является возможность получения последовательности параметров морской среды на регулярной сетке. Разумеется, результаты моделирования не могут заменить натурные измерения, но они могут экстраполировать их результаты во времени и на более широкие пространственные области. В данной работе представлены предварительные результаты оценки потоков углекислого газа между Черным морем и атмосферой на основе численного моделирования.

## Метод исследования

Количественная оценка потоков углекислого газа через поверхность раздела море – атмосфера является одной из основных задач в исследовании цикла углерода. В данной работе решение этой задачи осуществляется с помощью численного моделирования. Основным уравнением является трехмерное эволюционное уравнение переноса – диффузии для концентрации растворенного неорганического углерода

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = K_h \nabla^2 C + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + R, \quad (1)$$

где  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – компоненты скоростей течений;  $K_h$ ,  $K_v$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно. Эти поля, представляющие собой коэффициенты уравнения (1), обеспечиваются моделью циркуляции Черного моря. Слагаемое  $R$  в правой части уравнения (1) имеет вид  $R = Res - upt + O\alpha$ , где  $Res$  описывает поступление углекислого газа вследствие дыхания всех видов планктона;  $-upt$  описывает уменьшение растворенного неорганического углерода в результате фотосинтеза при производстве первичной продукции,  $O\alpha$  – поступление его за счет окисления взвешенного органического вещества [13].

Для вычисления этих величин используется существующая трехмерная модель нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря [14, 15]. Биогеохимическая часть модели представляет собой с математической точки зрения систему пятнадцати (по числу переменных состояния) уравнений переноса – диффузии, однотипных с уравнением (1). Слагаемые в правых частях этой системы описывают биогеохимические взаимодействия между переменными состояния модели экосистемы. Вид этих источников для модели

экосистемы представлен в работе [15]. Перевод единиц измерения переменных из азота в углерод происходит с помощью соотношений C:N для Черного моря, взятых в работе [16].

Связь модели циркуляции с биогеохимической частью в данной работе является односторонней. То есть поля скоростей течений, температура, соленость и коэффициенты турбулентной диффузии, полученные по гидродинамической модели заранее, используются затем для вычисления параметров биогеохимической модели и в уравнении (1). Расчетная область для уравнения (1) и биогеохимической части модели по горизонтали совпадает с соответствующей областью для модели циркуляции (соответственно совпадают шаги сетки, равные 4.8 км), а по вертикали занимает верхний 200-метровый слой Черного моря. При этом расчетные горизонты соответствуют моделям циркуляции. В качестве гидродинамических полей в данной работе использовались результаты 28-летнего физического реанализа полей Черного моря (1993–2020 гг.) [17].

Для получения начальных полей был проведен расчет для 2017 г. в цикле, в котором входные параметры модели экосистемы (поля скорости течений, температуры и солености за 2017 г.) брались из реанализа. После того как биогеохимические поля выходили на стационарный режим, счет заканчивался и полученные поля использовались в качестве начальных для основного расчета.

Концентрация растворенного углекислого газа  $\text{CO}_2$  рассчитывалась по полученным полям растворенного неорганического углерода по формуле

$$[DIC] = [\text{CO}_2] \times \left\{ 1 + \frac{K_1}{[\text{H}^+]} + \frac{K_1 K_2}{[\text{H}^+][\text{H}^+]} \right\},$$

где эффективные константы диссоциации угольной кислоты  $K_1$ ,  $K_2$  зависят от температуры и солености морской воды. Затем по концентрации растворенного углекислого газа с помощью коэффициента Генри  $K_0$  определяется его равновесное парциальное давление по формуле  $[\text{CO}_2] = K_0 p\text{CO}_2$  [18]. Коэффициент Генри не является константой, а зависит от температуры и солености морской воды.

Для расчета концентрации растворенного углекислого газа по общей концентрации неорганического углерода в воде необходимо знать, помимо коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ , концентрацию ионов водорода. Для оценки потоков углекислого газа через поверхность моря необходимы только поверхностные значения концентрации углекислого газа. В данной работе параметр pH не рассчитывался по модели, а аппроксимировался по времени и по пространству согласно данным атласа<sup>1)</sup>, где представлены карты распределения pH на поверхности Черного моря для четырех сезонов.

Парциальное давление углекислого газа в приводном слое атмосферы считалось постоянным и равным 410 мкатм. Поток углекислого газа между морем и атмосферой рассчитывался по формуле  $F = Tr(p\text{CO}_{2w} - p\text{CO}_{2a})$ , где  $Tr$  – коэффициент передачи углекислого газа между морем и атмосферой;  $p\text{CO}_{2w}$  и  $p\text{CO}_{2a}$  – парциальное давление в воде и в атмосфере. Значение

---

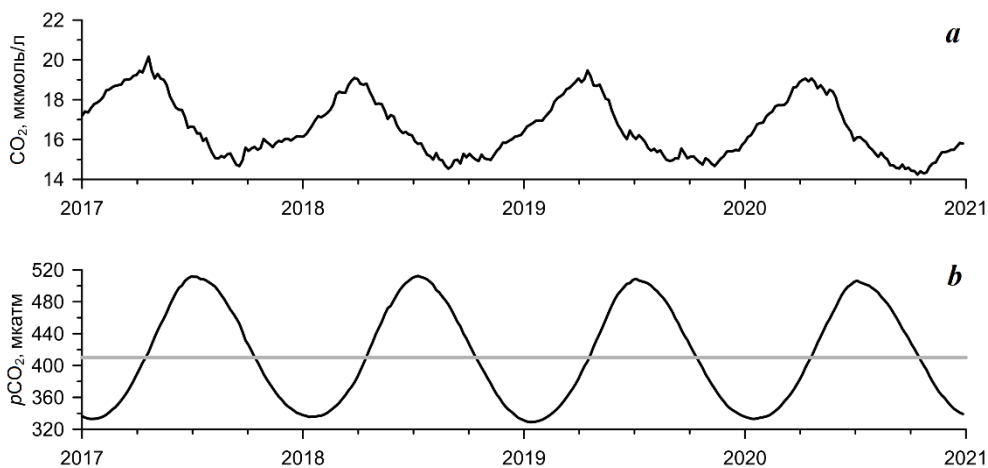
<sup>1)</sup> Атлас охраны природы Черного и Азовского морей. ГУН и О, Санкт-Петербург, 2006. 436 с.

коэффициента  $Tt$  выбиралось равным  $0.5 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкратм}^{-1}\cdot\text{мес}^{-1}$  (среднее значение по Мировому океану согласно [19]).

### Результаты

Основной расчет проводился на четыре года с 2017 по 2020 г. На рис. 1 представлена изменчивость средних по площади бассейна концентрации углекислого газа у поверхности моря и его равновесного парциального давления, полученных по результатам моделирования. Зависимость от времени носит выраженный сезонный характер. Значения давления растворенного углекислого газа имеют минимум примерно в январе – феврале и максимум примерно в июне – июле. Когда парциальное давление растворенного в морской воде углекислого газа превышает давление в атмосфере, поток через свободную поверхность направлен из моря в атмосферу, и наоборот. Таким образом, из графика изменения  $p\text{CO}_2$  следует, что в холодное время (примерно с октября по апрель) в среднем по акватории Черного моря наблюдается инвазия, потому что парциальное давление  $\text{CO}_2$ , растворенного в море, ниже парциального давления в атмосфере. И, наоборот, в теплое время (примерно с апреля по октябрь) в среднем наблюдается эвазия.

Максимумы и минимумы на графике временной изменчивости концентрации углекислого газа в поверхностном слое Черного моря не совпадают с соответствующими экстремумами на графике для давления. Они сдвинуты примерно на три месяца. Это вызвано тем, что константа Генри, связывающая значения концентрации  $\text{CO}_2$  в море и его равновесного парциального давления, зависит в том числе от температуры морской воды, которая значительно

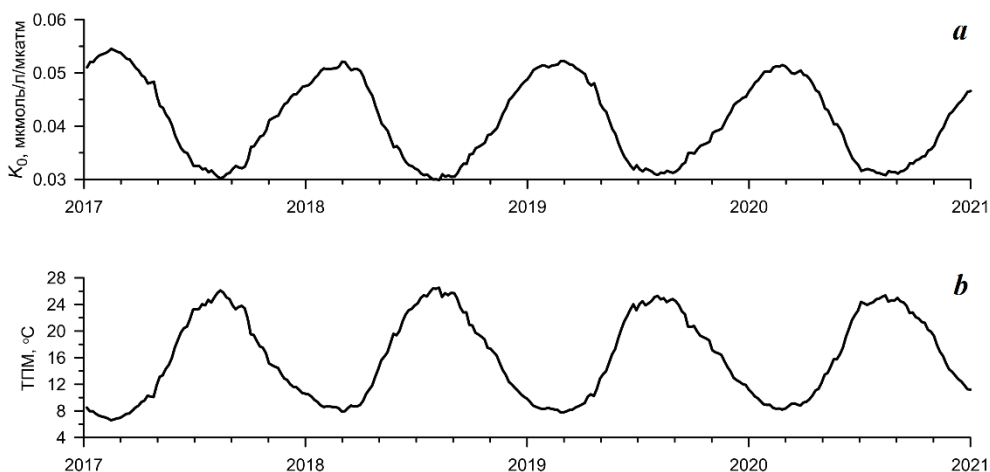


Р и с . 1 . Эволюция средних по площади бассейна концентрации углекислого газа у поверхности моря (а) и его парциального давления (б), полученных по результатам моделирования. Прямая линия показывает парциальное давление  $\text{CO}_2$  в приводном слое атмосферы

F i g . 1 . Evolution of the average over the basin area concentration of carbon dioxide at the sea surface (а) and its partial pressure (б) obtained from simulation results. The straight line shows the  $\text{CO}_2$  partial pressure in the atmospheric surface layer

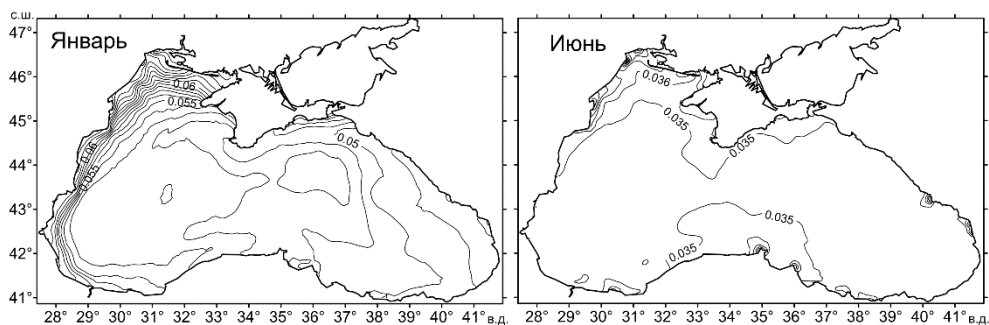
меняется в течение года. При этом размах колебаний средней по площади бассейна концентрации углекислого газа (примерно 25 % от максимального значения) существенно меньше размаха колебаний давления. На графиках (рис. 1) четко проявляется и обратная зависимость концентрации растворенного углекислого газа от парциального давления: в те периоды времени, когда поток  $\text{CO}_2$  направлен из атмосферы в море, концентрация  $\text{CO}_2$  растет, и наоборот, когда поток направлен в атмосферу, концентрация падает.

На рис. 2, *a* представлен график зависимости от времени среднего по площади моря значения коэффициента Генри. При расчете значения коэффициента в каждой точке сетки использовались поля температуры и солёности, полученные в реанализе гидродинамических полей Черного моря. Изменчивость коэффициента Генри также носит выраженный сезонный характер и находится почти в противофазе с изменением парциального давления углекислого газа (см. рис. 1, *b*). В течение года среднее по площади значение коэффициента Генри меняется почти в два раза. На рис. 2, *b* представлен график изменения поверхностной температуры моря. Эти два графика меняются в противофазе, и можно сделать вывод, что изменение среднего по площади моря значения коэффициента Генри определяется главным образом температурой морской воды. То есть основной вклад во внутригодовую изменчивость парциального давления  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое моря вносят гидрологические факторы (в основном температура воды). При понижении температуры воды парциальное давление уменьшается, а при увеличении температуры – растет. Соответственно, пока давление растворенного  $\text{CO}_2$  больше атмосферного, поток через поверхность моря направлен в атмосферу, что сопровождается уменьшением концентрации растворенного  $\text{CO}_2$ , затем, когда давление растворенного газа становится меньше атмосферного, поток через поверхность меняет направление, при этом увеличивается концентрация растворенного углекислого газа.



Р и с . 2 . Эволюция средних по площади моря значений коэффициента Генри (*a*) и температуры поверхности моря (*b*)

F i g . 2 . Evolution of sea area averaged values of the Henry coefficient (*a*) and sea surface temperature (*b*)



Р и с . 3 . Пространственное распределение коэффициента Генри (мкмоль/л/мкатм) для января и июня 2017 г.

F i g . 3 . Spatial distributions of the Henry coefficient ( $\mu\text{mol/L}/\mu\text{atm}$ ) for January and June 2017

На рис. 3 представлено пространственное распределение коэффициента Генри. Летом распределение коэффициента Генри почти равномерно по всей акватории за исключением мест впадения рек, где вода сильно распреснена. Зимой значение коэффициента выше летнего. Кроме того, хорошо видно повышение значений коэффициента на северо-западном шельфе (СЗШ) и вдоль западного берега Черного моря. Это вызвано тем, что на СЗШ зимой самая холодная и распресненная вода. А интенсивное в зимнее время Основное Черноморское течение переносит эту воду вдоль западного берега.

Представление о пространственном распределении парциального давления углекислого газа в поверхностном слое Черного моря дает рис. 4, *a, b*. На нем изображены среднемесячные карты для двух месяцев: января и июня 2017 г. (что соответствует минимуму и максимуму на рис. 1, *b*). Пространственные распределения  $p\text{CO}_2$  для обоих месяцев похожи: максимумы наблюдаются в центре бассейна и на СЗШ (причем в январе только в северной его части). Однако средний уровень существенно различается. В январе на всей акватории поверхностное парциальное давление растворенного углекислого газа ниже атмосферного (410 мкатм), а в июне почти на всей акватории оно выше.

Биологические процессы также влияют на распределение давления растворенного углекислого газа. На рис. 4, *c, d* представлены для тех же месяцев среднемесячные карты поверхностного распределения величины  $R = Res - upt + O\alpha$ , описывающей поступление растворенного углекислого газа вследствие дыхания планктона и окисления органики и его убыль во время фотосинтеза.

В январе почти на всей акватории эта величина имеет отрицательные значения (за исключением небольшой области в Каркинитском и Тендровском заливах). На карте распределения  $p\text{CO}_2$  (рис. 4, *a*) в этом месте выделяется локальный максимум. То есть за счет биологических процессов в январе преобладает поглощение углекислого газа над его выделением. В июне большая часть области имеет положительные значения, за исключением центральной части моря, где она близка к нулю.

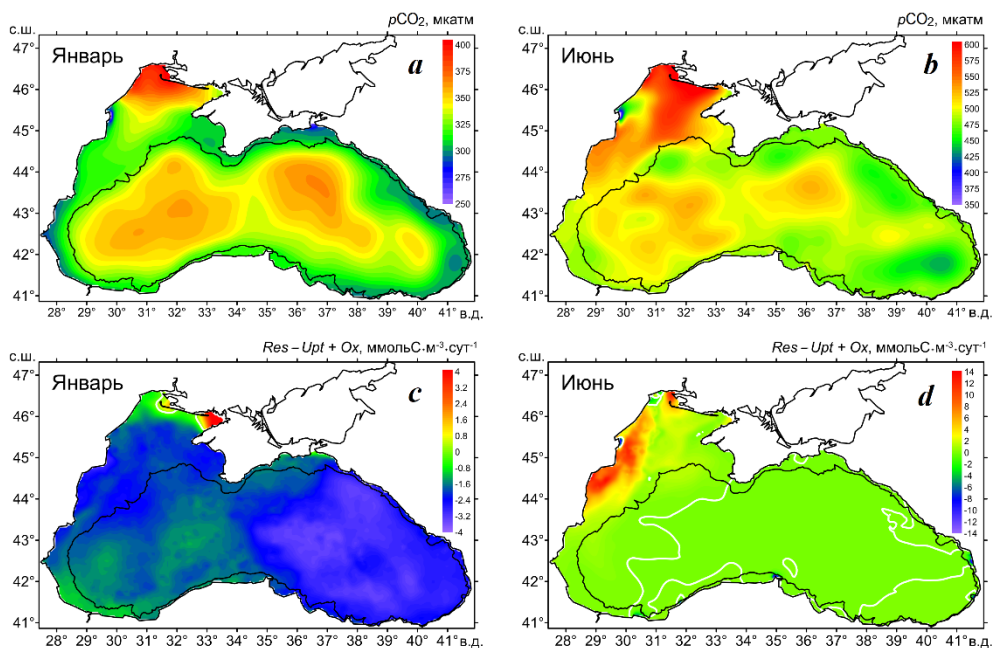


Рис. 4. Пространственное распределение парциального давления углекислого газа в поверхностном слое Черного моря (*a, b*) и среднемесячные карты поверхностного распределения величины  $R = Res - upt + Ox$  (*c, d*) для января и июня 2017 г. (белым цветом на рис. 4, *d* обозначена нулевая изолиния)

Fig. 4. Spatial distribution of partial pressure of carbon dioxide in the surface layer of the Black Sea (*a, b*) and monthly average maps of the surface distribution of the  $R = Res - upt + Ox$  value (*c, d*) for January and June 2017 (the white line in Fig. 4, *d* indicates the zero isoline)

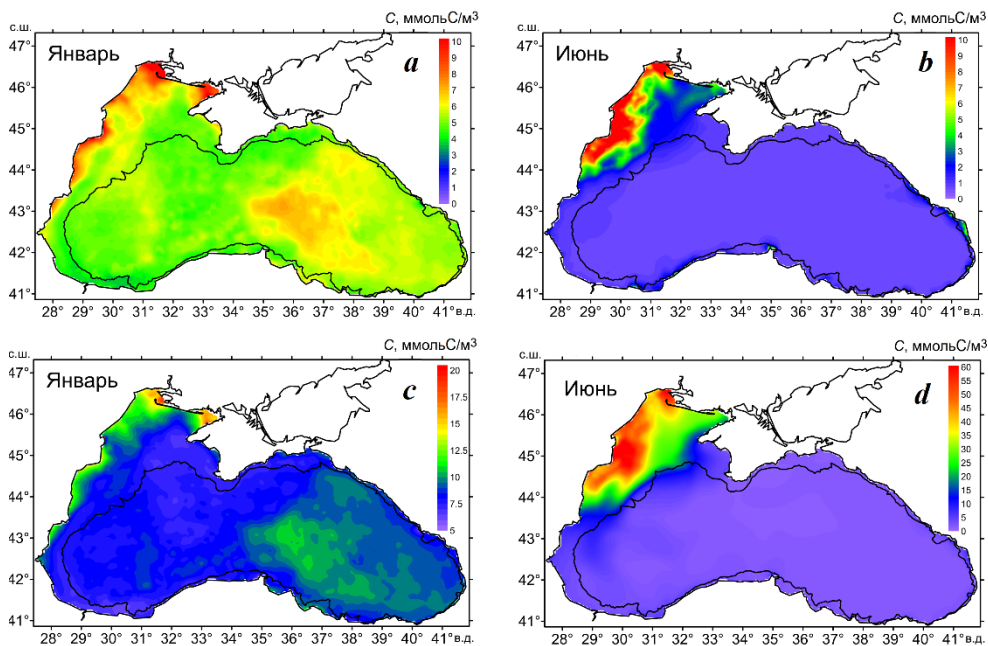
Преобладание поглощения углекислого газа над его производством биологическими процессами или наоборот связано напрямую с концентрациями планктона в верхнем слое моря. На рис. 5 представлены для тех же двух месяцев поверхностные концентрации фитопланктона (рис. 5, *a, b*) и суммарные концентрации всего планктона (рис. 5, *c, d*).

В январе поверхностная концентрация фитопланктона достаточно велика по всей акватории Черного моря (рис. 5, *a*), в том числе и в глубоководной части. Суммарная концентрация всего планктона также имеет высокие значения (рис. 5, *c*), но в основном за счет фитопланктона. Соответственно на рис. 5, *c* преобладает поглощение углекислого газа в процессе фотосинтеза.

В июне концентрации и фитопланктона, и всего планктона в глубоководной части моря низки, а на СЗШ высоки (рис. 5, *b, d*). Причем биомасса суммарного планктона на СЗШ существенно больше биомассы фитопланктона. Соответственно на рис. 4, *d* в западной части Черного моря, особенно на СЗШ, преобладает выделение  $CO_2$ , вызванное дыханием планктона.

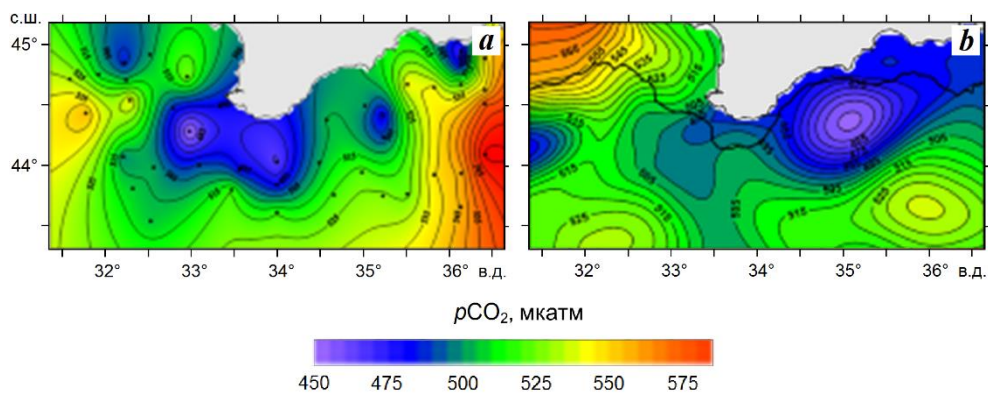
Полученные результаты численного моделирования сравнивались с данными наблюдений, которых, к сожалению, не так много, и они носят локальный характер. На рис. 6 показаны карты распределения  $pCO_2$ , построенные





Р и с . 5. Пространственное распределение поверхностных концентраций фитопланктона (*a*, *b*) и суммарных концентраций всего планктона (*c*, *d*) для января и июня 2017 г.

Fig. 5. Spatial distribution of surface phytoplankton concentrations (*a*, *b*) and total plankton concentration (*c*, *d*) for January and June 2017



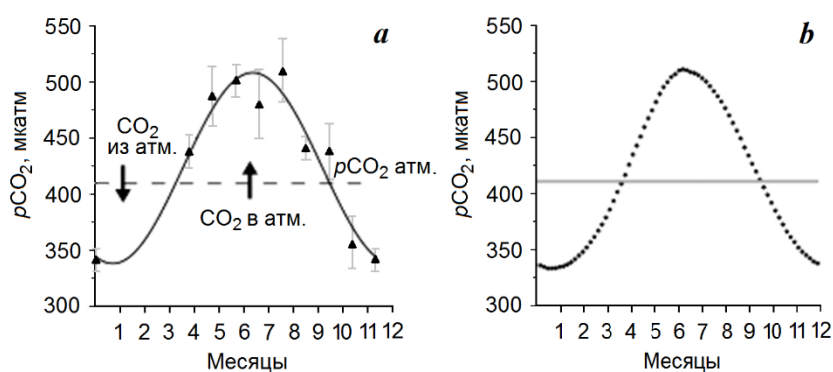
Р и с . 6. Карты распределения  $pCO_2$ , построенные по данным наблюдений (*a*) и результатам численного моделирования (*b*)

Fig. 6.  $pCO_2$  distribution maps based on observational data (*a*) and numerical simulation results (*b*)

по данным наблюдений (рис. 6, *a*) [20] и по результатам моделирования (рис. 6, *b*). Левая карта (рис. 6, *a*) – это результат обработки проб, взятых на 132 станциях, выполненных в 95-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» с 14 июня по 4 июля 2017 г.

В целом значения равновесного парциального давления  $\text{CO}_2$  возле поверхности моря, полученные по результатам моделирования, достаточно близки к данным измерений. Пространственное распределение давления на двух картах не совпадает, однако на обеих картах наблюдается характерное понижение значений давления возле Южного берега Крыма и Севастополя. Следует также отметить, что карта, полученная по модели, относится к конкретной дате (26 июня), а съемка, по результатам которой построена левая карта (рис. 6, *a*), длилась больше двух недель.

На рис. 7 представлены графики внутригодовой изменчивости средних по акватории Черного моря значений равновесного парциального давления углекислого газа  $p\text{CO}_2$ , полученные по результатам измерений и по результатам моделирования, осредненным за четыре года. Левый график (рис. 7, *a*) любезно предоставлен отделом биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ. Он построен на основе обработки данных, полученных в 2015–2021 гг. в ходе выполнения экспедиционных исследований ФГБУН ФИЦ МГИ на НИС «Профессор Водяницкий». Схема расположения станций приведена в работе [7, с. 871]. Оба графика довольно близки. Таким образом, внутригодовая изменчивость среднего по акватории Черного моря равновесного парциального давления растворенного углекислого газа в поверхностном слое моря хорошо воспроизводится моделью.



Р и с . 7 . Внутригодовая изменчивость  $p\text{CO}_2$  по данным наблюдений (*a*) и результатам численного моделирования (*b*)

F i g . 7 . Intra-annual variability of  $p\text{CO}_2$  from observational data (*a*) and numerical simulation results (*b*)

## Выводы

На основе результатов численного моделирования был получен временной ход и пространственное распределение таких элементов карбонатной системы, как концентрация растворенного углекислого газа в поверхностном слое моря и его равновесное парциальное давление. Временной ход этих параметров носит выраженный сезонный характер.

Показано, что в период времени примерно с октября по апрель, т. е. в холодный период, в среднем по акватории Черного моря наблюдается инвазия, потому что равновесное парциальное давление углекислого газа  $\text{CO}_2$ , растворенного в море, ниже парциального давления в атмосфере. В теплое время года, примерно с апреля по октябрь, когда  $p\text{CO}_2$  в воде в среднем выше, чем в атмосфере, наблюдается эвазия.

При постоянном парциальном давлении  $\text{CO}_2$  в атмосфере (согласно атласу<sup>1)</sup> оно по данным измерений в 2017 г. менялось в течение года на 5 %) на направление потока углекислого газа через поверхность Черного моря основное влияние оказывает температура морской воды. Когда она понижается, равновесное парциальное давление растворенного газа уменьшается, при увеличении температуры – растет. Пока давление  $\text{CO}_2$  в воде больше атмосферного, поток через поверхность моря направлен в атмосферу, что сопровождается уменьшением концентрации растворенного  $\text{CO}_2$ . Когда давление растворенного газа становится меньше атмосферного, поток через поверхность меняет направление, что сопровождается увеличением концентрации растворенного углекислого газа.

На поток углекислого газа через свободную поверхность моря также влияют биологические процессы. Зимой почти на всей акватории Черного моря преобладает поглощение углекислого газа над его выделением благодаря высокой концентрации фитопланктона у поверхности Черного моря. Летом же на большей части акватории преобладает выделение углекислого газа вследствие дыхания планктона.

Равновесное парциальное давление растворенного углекислого газа, полученное в результате моделирования, сравнивалось с данными гидрохимических съемок. Сравнение показало достаточно хорошее соответствие результатов численного моделирования данным измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об обмене  $\text{CO}_2$  между морем и атмосферой в некоторых районах Черного моря / В. А. Жоров [и др.] // *Океанология*. 1981. Т. 21, № 1. С. 55–62.
2. Хоружий Д. С., Коновалов С. К. Суточный ход и межсуточные изменения содержания углекислого газа и растворенного неорганического углерода в прибрежных водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 1. С. 28–43. EDN TDXUTZ.
3. Общий неорганический углерод, карбонатная система и потоки углекислого газа в прибрежной зоне Южного берега Крыма: мониторинг, характеристика, динамика / С. К. Коновалов [и др.] // *Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 335–372.

4. *Хоружий Д. С.* Изменчивость равновесного парциального давления углекислого газа ( $p\text{CO}_2$ ) и концентрации растворенного неорганического углерода ( $\text{TCO}_2$ ) в прибрежных водах Черного моря в 2010–2014 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 4. С. 38–52. EDN WINRCH. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-4-38-52>
5. *Орехова Н. А., Коновалов С. К., Медведев Е. В.* Особенности регионального баланса неорганического углерода морских экосистем в условиях антропогенной нагрузки // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 3. С. 248–260. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-3-248-260>
6. *Силкин В. А., Подымов О. И., Лифанчук А. В.* Биологическая углеродная помпа в Черном море // *Экология гидросферы*. 2022. № 2. С. 69–92. [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2\(8\)-69-92](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2(8)-69-92)
7. Характеристики состояния и эволюции гидрохимической структуры вод Черного моря / А. В. Вареник [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 6. С. 867–892. EDN NPXXNC.
8. Modeling the nitrogen cycling and plankton productivity in an enclosed environment (the Black Sea) using a three-dimensional coupled hydrodynamical-ecosystem model / M. Grégoire [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004. Vol. 109, iss. C5. C05007. <https://doi.org/10.1029/2001JC001014>
9. A three-dimensional coupled model of the western Black Sea plankton dynamics: seasonal variability and comparison to SeaWiFS data / K. P. Tsiaras [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113, iss. C7. C07007. <https://doi.org/10.1029/2006JC003959>
10. *Дорофеев В. Л.* Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2009. № 6. С. 71–81. EDN VKGAMP.
11. Integrating sediment biogeochemistry into 3D oceanic models: a study of benthic–pelagic coupling in the Black Sea / A. Capet [et al.] // *Ocean Modelling*. 2016. Vol. 101. P. 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.03.006>
12. PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies / O. Aumont [et al.] // *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8, iss. 8. P. 2465–2513. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2465-2015>
13. Carbon nitrogen coupling and algal-bacterial interactions during an experimental bloom: modeling a  $^{13}\text{C}$  tracer experiment / K. Van den Meersche [et al.] // *Limnology and Oceanography*. 2004. Vol. 49, iss. 3. P. 862–878. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.3.0862>
14. *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. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523589>
15. *Dorofeyev 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>
16. *Grégoire 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>
17. *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.
18. *Millero F. J.* The marine inorganic carbon cycle // *Chemical Reviews*. 2007. Vol. 107, № 2. P. 308–341. <https://doi.org/10.1021/cr0503557>

19. Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans / T. Takahashi [et al.] // Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography. 2009. Vol. 56, iss. 8–10. P. 554–577. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>
20. *Забегаяев И. А., Медведев Е. В.* Равновесное парциальное давление углекислого газа в поверхностном слое вод северной части Черного моря на основании данных прямых наблюдений в 2017 году // *Моря России: фундаментальные и прикладные исследования* (Севастополь, 23–28 сентября 2019 г.): тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 76–78. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/morya\\_rossii-2019\\_tezisy.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/morya_rossii-2019_tezisy.pdf) (дата обращения: 26.07.2024).

Поступила 25.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

*Об авторах:*

**Дорофеев Виктор Львович**, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7144-1950**, **ResearcherID: G-1050-2014**, [viktor.dorofeev@mhi-ras.ru](mailto:viktor.dorofeev@mhi-ras.ru)

**Сухих Лариса Ивановна**, научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 6168-6090**, **ResearcherID: M-4381-2018**, [l.sukhikh@gmail.com](mailto:l.sukhikh@gmail.com)

*Заявленный вклад авторов:*

**Дорофеев Виктор Львович** – общее научное руководство исследованием, формулировка целей и задач исследования, проведение численных расчетов, анализ полученных результатов и их интерпретация

**Сухих Лариса Ивановна** – обзор литературы, проведение численных расчетов, анализ результатов

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи*