

## Поток CO<sub>2</sub> на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря

Н. А. Орехова \*, Е. В. Медведев, И. Н. Мукосеев, А. В. Гармашов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\* e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru*

### Аннотация

Углекислый газ является одним из климатообразующих веществ, его поступление в атмосферу и дальнейшее перераспределение в водах Мирового океана играют значительную роль в формировании климата на Земле и влияют на характеристики вод. Изучение внутренних морей, таких как Черное море, позволяет исследовать влияние атмосферного CO<sub>2</sub> на характеристики вод и оценить вклад региональных экосистем в общий бюджет CO<sub>2</sub> вод Мирового океана. В работе приведены количественные оценки потока CO<sub>2</sub> на границе с атмосферой, проанализирована его направленность, выделены факторы, определяющие величину потока CO<sub>2</sub> в северо-восточной части Черного моря в холодный период. Для анализа использованы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» в декабре 2022 г. Величина потока углекислого газа на границе вода – атмосфера рассчитывалась с учетом скорости ветра и градиента  $p\text{CO}_2$  между поверхностью моря и приземным слоем атмосферы. По данным прямого определения  $p\text{CO}_2$ , значения потока CO<sub>2</sub> в декабре 2022 г. изменялись в широких пределах от  $-0.05$  до  $-8.74$  ммоль·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>, среднее значение соответствовало  $-2.11 \pm 1.79$  ммоль·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>. Установлено, что в холодный период года поток CO<sub>2</sub> был направлен из атмосферы в поверхностный слой вод. Таким образом, воды Крымского побережья служат стоком атмосферного CO<sub>2</sub>. Локальные минимумы потока наблюдались в юго-восточной части Крымского побережья. При анализе корреляционной связи потока CO<sub>2</sub> с температурой, скоростью ветра и  $\Delta p\text{CO}_2$  наиболее сильная связь выявлена со скоростью ветра ( $-0.93$ ), слабая – с  $\Delta p\text{CO}_2$  ( $0.22$ ). Следовательно, интенсивность потока CO<sub>2</sub> на границе с атмосферой определялась скоростью ветра. Однако направление потока зависело от  $\Delta p\text{CO}_2$ . Вклад температуры проявлялся в изменении концентрации CO<sub>2</sub> в водной толще.

**Ключевые слова:** поток CO<sub>2</sub>, Черное море, углекислый газ, парциальное давление углекислого газа, цикл углерода

**Благодарности:** работа выполнена с использованием средств гранта № 169-15-2023-002 от 01.03.2023 Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

**Для цитирования:** Поток CO<sub>2</sub> на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря / Н. А. Орехова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 57–67. EDN GNFAZA.

© Орехова Н. А., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н., Гармашов А. В., 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

## Sea-Air CO<sub>2</sub> Flux in the Northeastern Part of the Black Sea

N. A. Orekhova \*, E. V. Medvedev, I. N. Mukoseev, A. V. Garmashov

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru

### Abstract

Carbon dioxide is one of the green gases and its entry into the atmosphere and further redistribution in the waters of the World Ocean not only plays a significant role in the climate on the Earth, but also affects the characteristics of waters. The research of inland seas, e.g. the Black Sea, makes it possible to study the influence of atmospheric CO<sub>2</sub> on the characteristics of waters and to assess the contribution of regional ecosystems to the total budget of the CO<sub>2</sub> flux of the World Ocean. The paper presents numerical estimates of the sea-air CO<sub>2</sub> flux, analyzes its direction and identifies factors that determine the values of the CO<sub>2</sub> flux in the northeastern part of the Black Sea during a cold period. For the analysis, the data obtained during the cruise of R/V *Professor Vodyanitsky* in December 2022 were used. The values of the sea-air flux of carbon dioxide were calculated taking into account the wind speed and pCO<sub>2</sub> gradient between the sea surface and the near sea surface atmosphere. According to the direct measurements of pCO<sub>2</sub>, the value of the CO<sub>2</sub> flux in December 2022 varied widely from -0.05 to -8.74 mmol·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>, the average value being -2.11 ± 1.79 mmol·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>. It was established that during the cold season, the CO<sub>2</sub> flux was directed from the atmosphere to the sea surface. Thus, the waters of the Crimean coast serve as a stock of atmospheric CO<sub>2</sub>. Local minima of flux values were observed in the southeastern regions of the Crimean coast. When analyzing the correlation of the CO<sub>2</sub> flux with temperature, wind speed and ΔpCO<sub>2</sub>, the strongest relationship was found with wind speed (-0.93), while the weakest one was with ΔpCO<sub>2</sub> (0.22). Therefore, the intensity of the sea-air CO<sub>2</sub> flux was determined by wind speed, while the direction of the flux was determined by ΔpCO<sub>2</sub>. The temperature contribution manifested as change in the concentration of CO<sub>2</sub> in the water column.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> flux, Black Sea, carbon dioxide, partial pressure of carbon dioxide, carbon cycle

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of grant no. 169-15-2023-002 dated 01.03.2023 of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

**For citation:** Orekhova, N.A., Medvedev, E.V., Mukoseev, I.N. and Garmashov, A.V., 2024. Sea-Air CO<sub>2</sub> Flux in the Northeastern Part of the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 57–67.

### Введение

Глобальный цикл природных веществ включает их перенос между различными биогеохимическими резервуарами, регулирующий баланс и бюджет веществ в атмо-, лито-, гидросфере. Одним из таких природных циклов является цикл углерода, важнейшим компонентом которого является углекислый газ (CO<sub>2</sub>)<sup>1)</sup> [1–5].

---

<sup>1)</sup> Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide / J. Raven [et al.]. London, UK : The Royal Society, 2005. 57 p. URL: <https://royalsociety.org/-/media/policy/publications/2005/9634.pdf> (дата обращения: 20.06.2023).

CO<sub>2</sub> относится к климатообразующим веществам [1–6], его поступление в атмосферу и дальнейшее перераспределение в водах Мирового океана не только играет значительную роль в формировании климата на Земле [1], но и влияет на характеристики вод [1, 6, 7].

Воды Мирового океана, несмотря на непрерывный рост уровня атмосферного CO<sub>2</sub> (около 0.4 % в год) и достигнутое к настоящему времени содержание – более 420 мкатм (URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>), все еще являются его естественным стоком. Они поглощают до 25 % атмосферного CO<sub>2</sub> антропогенного происхождения, тем самым способствуя снижению концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере [7]. Однако его накопление в водной толще ведет к негативным последствиям для экосистем всего Мирового океана, что проявляется в нарушении природных равновесий, в частности карбонатных, уменьшении pH, снижении концентрации кислорода и появлении зон его дефицита. Со временем снижается способность океана поглощать углекислый газ из атмосферы [8–10], а в крайних случаях воды могут стать источником CO<sub>2</sub> для атмосферы [7].

Первичным фактором, определяющим влияние CO<sub>2</sub> на состояние морских систем, является его поток из атмосферы, который зависит при прочих равных условиях от соотношения парциального давления CO<sub>2</sub> в приводном слое атмосферы и равновесного парциального давления CO<sub>2</sub> в поверхностном слое вод. Это соотношение определяет направление и величину потока CO<sub>2</sub>.

Важным аспектом исследований потока CO<sub>2</sub> на границе с атмосферой и величины  $p\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод является изучение характера изменений на масштабах времени от сезонного до межгодового, что связано со значительной пространственно-временной изменчивостью биологических и физических процессов, влияющих на эти характеристики.

Внутренние моря, по сравнению с открытыми районами Мирового океана, характеризуются более интенсивным протеканием физических и биогеохимических процессов. Вследствие этого их экосистема более динамична на временном и пространственном масштабах и любое внешнее воздействие проявляется быстрее. К таким проявлениям относится прежде всего изменение характеристик системы: концентрации кислорода и CO<sub>2</sub>, величины pH, а также скорости и направления продукционно-деструкционных процессов [10]. Кроме того, эти экосистемы характеризуются более выраженным откликом на изменение концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере, что проявляется в первую очередь в смещении равновесий карбонатной системы, а также изменении окислительно-восстановительных условий<sup>1)</sup> [5–7, 10].

Исследование внутренних морей позволяет не только изучить влияние атмосферного CO<sub>2</sub> на характеристики вод, но и оценить вклад региональных экосистем в общий бюджет потока CO<sub>2</sub> вод Мирового океана.

Одним из таких внутренних морей является Черное море. Характеристики шельфовых вод северной части моря в значительной степени определяются пресноводным речным стоком и атмосферным вкладом, северо-восточной части – азовоморскими водами, глубоководной части – Основным Черноморским течением [11]. Для этого моря отмечается широкий диапазон изменения

солености и температуры [11], высокая интенсивность и сезонные изменения первично-продукционных процессов [12], высокие значения щелочности, содержания общего неорганического углерода [13–15]. Все это в значительной мере определяет состояние карбонатной системы вод моря, содержание  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод моря и формирование потока  $\text{CO}_2$  на границе с атмосферой. Перечисленные выше факторы подвержены сезонной изменчивости; соответственно, и концентрация  $\text{CO}_2$  и поток  $\text{CO}_2$  также проявляют внутригодовую изменчивость.

Можно предположить, что в холодный период концентрация  $\text{CO}_2$  должна определяться прежде всего абиотическим фактором – температурой и вертикальным переносом  $\text{CO}_2$  глубинными водами, а также обменными процессами на границе с атмосферой. В летний период преобладающим фактором должен быть биотический вследствие протекания биогеохимических процессов с участием органического вещества.

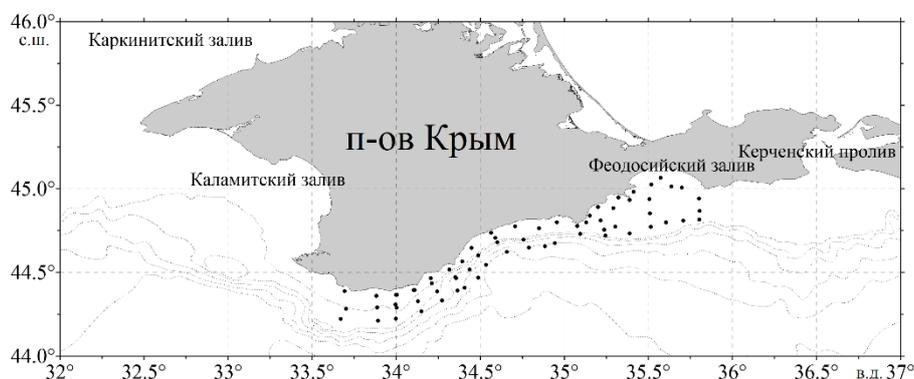
Целью данной работы было получить количественные оценки потока  $\text{CO}_2$  на границе с атмосферой и выявить его направленность, а также выделить факторы, определяющие величину потока  $\text{CO}_2$  в районе Крымского побережья Черного моря в холодный период, когда преобладает вклад абиотического фактора.

Ранее оценки потока  $\text{CO}_2$  для данной экосистемы Черного моря выполнялись по расчетным данным [13] или для локального района [14].

### Материалы и методы

В работе использованы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» в декабре 2022 г. (125-й рейс, 02–27 декабря 2022 г.). В соответствии с [11] этот период относится к позд-неосеннему.

Район исследований и схема станций отбора проб представлены на рис. 1. Исследованный полигон включает 12-мильную зону Крымского побережья в северной части Черного моря.



Р и с . 1 . Схема станций отбора проб

Fig. 1. Sampling map

Пробы из приводного слоя атмосферы отбирались на высоте 10 м над уровнем моря. Трубка для забора воздуха была расположена таким образом, чтобы по возможности избежать поступления  $\text{CO}_2$  от рабочих механизмов судна. Для прямого определения объемной концентрации и парциального давления  $\text{CO}_2$  использовался инфракрасный анализатор *LI-7000* с рабочим диапазоном концентрации  $\text{CO}_2$  0–3000  $\text{млн}^{-1}$  и паров воды 0–60 ммоль/моль, погрешность измерений составляет менее 1 % от измеряемого значения [15].

Пробы воды отбирались из поверхностного слоя (1–3 м) с помощью системы непрерывной подачи морской воды. Далее вода с постоянной скоростью направлялась в эквипратор, с помощью которого устанавливалось равновесие с определенным объемом атмосферного воздуха при температуре заборной воды по методике, описанной в работе [15]. Воздух из эквипратора прокачивался с постоянной скоростью через ячейку инфракрасного анализатора *LI-7000*, в которой определялась концентрация  $\text{CO}_2$  и паров воды при температуре ячейки. Температура ячейки определялась термодатчиком, установленным в ней, и была уравновешена с температурой атмосферы, окружающей эквипратор. Далее концентрация углекислого газа переводилась в парциальное давление углекислого газа:

$$p\text{CO}_2 = x(\text{CO}_2) \cdot p_{\text{АТМ}},$$

где  $p\text{CO}_2$  – парциальное давление углекислого газа, мкатм;  $x(\text{CO}_2)$  – концентрация углекислого газа, мкмоль/моль;  $p_{\text{АТМ}}$  – атмосферное давление, атм.

Температура и соленость поверхностного слоя вод измерялись зондирующим комплексом *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320PlusM*, а на мелководных станциях (менее 50 м) – гидрологическим *CTD*-зондом «ГАП-АК-16».

Метеорологические параметры измерялись с помощью регистрирующей аппаратуры комплекса сбора гидрометеорологических данных [16]. Датчик измерения скорости и направления ветра устанавливался на боковом выстреле длиной 1.5 м в направлении левого борта на фок-мачте, направлением на север по курсу судна. Высота установки датчика от уровня моря составляла около 8 м. Данные прошли контроль качества с отбраковкой ненадежных фрагментов и приведены к стандартной высоте наблюдения (10 м) [17]. Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации, измеренные параметры усреднялись за 10 мин, и дальнейший анализ производился уже для осредненных значений. Порывы ветра приводились как мгновенные значения скорости ветра за 5 с [17].

Значение потока углекислого газа на границе вода – атмосфера рассчитывалось по уравнениям и с допущениями, описанными в работе [18], с учетом скорости ветра и градиента  $p\text{CO}_2$  между поверхностью моря и приводным слоем атмосферы:

$$F_{\text{CO}_2} = k \cdot K_0 \cdot \Delta p\text{CO}_2, \quad (1)$$

где  $F_{\text{CO}_2}$  – поток углекислого газа на границе с атмосферой, ммоль·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>;  $K_0$  – растворимость  $\text{CO}_2$ , моль·м<sup>-3</sup>·атм<sup>-1</sup>;  $\Delta p\text{CO}_2$  – градиент между парциальным давлением углекислого газа в поверхностном слое вод и в приводном

слое атмосферы, атм;  $k$  – скорость газопереноса,  $\text{м}\cdot\text{сут}^{-1}$ , параметризованная как функция скорости ветра:

$$k = 0.251 \cdot U^2 \cdot (\text{Sc}/660)^{-0.5},$$

где  $U$  – скорость ветра,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\text{Sc}$  – число Шмидта; коэффициент 0.251 – эмпирически выведенный параметр,  $\text{см}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot(\text{м}\cdot\text{с}^{-1})^{-2}$  [19].

Установлено [18], что при скорости ветра более  $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  интенсивность потока углекислого газа определяется состоянием поверхности моря (пузырьки, шероховатость). Скорость ветра более  $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  в 125-м рейсе зафиксирована не была, таким образом, при оценке потоков учитывались только скорость ветра и градиент  $p\text{CO}_2$ .

### Результаты

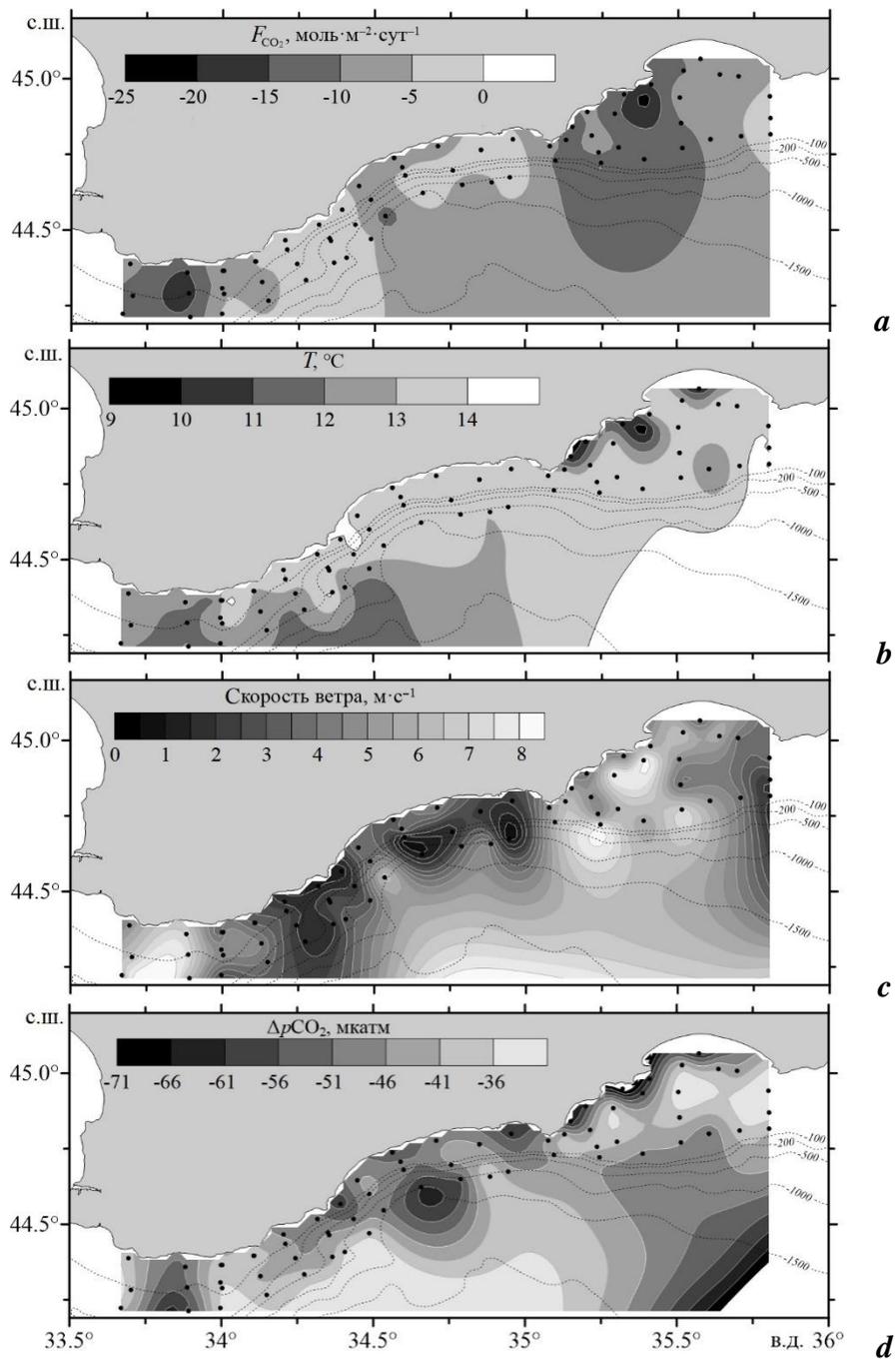
В декабре 2022 г. средняя скорость ветра составила  $4.2 \pm 3.8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  при минимальной скорости  $0.7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , максимальной –  $8.2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Температура поверхностного слоя вод изменялась в пределах  $9.6\text{--}14.1 \text{ }^\circ\text{C}$  при среднем значении  $13.04 \pm 1.06 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Среднее значение  $p\text{CO}_2$  поверхностного слоя вод составило  $388 \pm 9$  мкатм, в то время как  $p\text{CO}_2$  приводного слоя атмосферы изменялось в более узком интервале и среднее значение было  $434 \pm 4$  мкатм. Градиент  $p\text{CO}_2$  между поверхностным слоем вод и приводным слоем атмосферы ( $\Delta p\text{CO}_2$ ), таким образом, преимущественно определялся изменчивостью  $p\text{CO}_2$  поверхностного слоя вод. Значения  $\Delta p\text{CO}_2$  изменялись в пределах от  $-32.70$  до  $-70.90$  мкатм, среднее значение составило  $-45.64 \pm 8.56$  мкатм. Можно отметить, что поверхностный слой вод в период исследований был недонасыщен углекислым газом по отношению к атмосфере.

На основе полученных данных по уравнению (1) были рассчитаны значения потока  $\text{CO}_2$ . Интенсивность потока  $\text{CO}_2$  изменялась в широком диапазоне от  $-0.04$  до  $-8.74 \text{ ммоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$  при среднем значении  $2.11 \pm 1.79 \text{ ммоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ . Отрицательные значения потока указывают, что в исследуемый период воды Черного моря поглощают  $\text{CO}_2$  из атмосферы, являясь его стоком. Рассчитанные значения потока согласуются с полученными ранее данными для вод прибрежных районов Крымского побережья [14] и северо-западной части европейского шельфа [5].

Пространственная изменчивость значений потока  $\text{CO}_2$  характеризовалась неоднородностью (рис. 2, а). Локальные минимумы значений и максимальная интенсивность потока отмечены в районе восточного побережья Крыма, а также в южной его части (рис. 2, а).

Качественно пространственная изменчивость величины потока  $\text{CO}_2$  совпадает с распределением температуры, скорости ветра и  $\Delta p\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод (рис. 2). Минимумы температуры и  $\Delta p\text{CO}_2$  поверхностного слоя вод, а также максимальная скорость ветра наблюдались в зонах максимальной интенсивности и минимальной величины потока (рис. 2).



Р и с . 2. Пространственная изменчивость величины потока  $\text{CO}_2$  (a), температуры (b), скорости ветра (c) и градиента  $p\text{CO}_2$  (d) по данным 125-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»

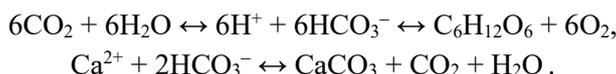
Fig. 2. Spatial variability of the sea-air  $\text{CO}_2$  flux (a), temperature (b), wind speed (c) and gradient of  $p\text{CO}_2$  (d) by data of 125 cruise of R/V *Professor Vodyanitsky*

### Обсуждение результатов

Известно, что величина потока  $\text{CO}_2$  в наибольшей степени зависит от скорости ветра и  $\Delta p\text{CO}_2$  [18, 19].

Анализ наших данных показал, что в декабре 2022 г. поток  $\text{CO}_2$  определялся преимущественно скоростью ветра (рис. 3), коэффициент корреляции ( $-0.93$ , является статистически значимым при доверительной вероятности  $p = 0.99$ ) указывает на сильную линейную связь. Характер связи имеет обратную зависимость. Направление потока определяет  $\Delta p\text{CO}_2$  между поверхностным слоем вод и приподнятым слоем атмосферы. В свою очередь,  $\Delta p\text{CO}_2$  определяется соотношением парциального давления  $\text{CO}_2$  в атмосфере и равновесного парциального давления  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод.

Величина  $p\text{CO}_2$  поверхностного слоя вод пропорциональна концентрации  $\text{CO}_2$  в воде. Концентрация  $\text{CO}_2$  зависит от биогеохимического фактора, когда вследствие трансформации органического вещества и образования карбонатов происходит продукция или изъятие  $\text{CO}_2$ , протекающие по следующим уравнениям:

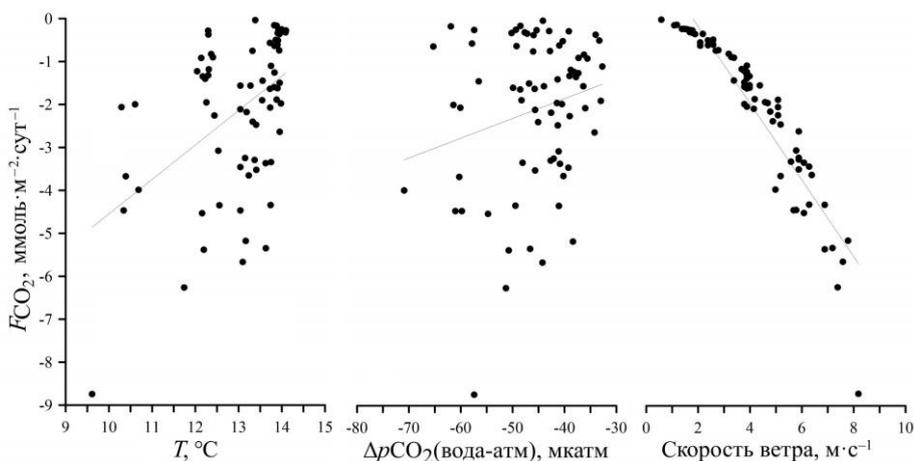


Кроме того, содержание  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод зависит от температуры, которая влияет не только на растворимость  $\text{CO}_2$ , но и на интенсивность биологических процессов, а также на смещение химических равновесий в карбонатной системе [19]:



Изменение концентрации  $\text{CO}_2$  может быть также вызвано динамикой вод, в частности поступлением  $\text{CO}_2$  с водами из нижележащих слоев [20].

При этом неожиданным результатом оказался слабый характер связи величины потока  $\text{CO}_2$  и  $\Delta p\text{CO}_2$  (коэффициент корреляции  $0.22$ , является статистически значимым при доверительной вероятности  $p = 0.95$ ). Снижение  $\Delta p\text{CO}_2$



Р и с . 3 . Зависимость потока  $\text{CO}_2$  ( $F_{\text{CO}_2}$ ) от температуры,  $\Delta p\text{CO}_2$  и скорости ветра

F i g . 3 . Dependence of  $\text{CO}_2$  flux ( $F_{\text{CO}_2}$ ) on temperature,  $\Delta p\text{CO}_2$  and wind speed

сопровождается снижением потока (рис. 3). В свою очередь, снижение  $\Delta p\text{CO}_2$  свидетельствует о снижении разницы между  $p\text{CO}_2$  поверхностного слоя вод и приводного слоя атмосферы. Так как  $p\text{CO}_2$  приводного слоя атмосферы в исследуемый период почти не изменялось (диапазон колебаний  $\pm 1\%$  при среднем значении  $p\text{CO}_2$ , равном 434 мкатм), снижение разницы обусловлено увеличением  $p\text{CO}_2$  и, соответственно, концентрации  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод.

Увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод при низких температурах этого слоя (около  $13\text{ }^\circ\text{C}$ ) может быть обусловлено либо увеличением растворимости  $\text{CO}_2$  при снижении температуры, либо динамикой вод, обеспечивающей поступление  $\text{CO}_2$  из нижележащих слоев вод, а также разложением органического вещества, образовавшегося в период осеннего цветения [12, 21].

Связь величины потока  $\text{CO}_2$  с температурой поверхностного слоя вод носила умеренный характер (коэффициент корреляции 0.47, является статистически значимым при доверительной вероятности  $p = 0.99$ ). С ростом температуры интенсивность потока  $\text{CO}_2$  на границе с атмосферой снижалась (рис. 3). Однако так как на интенсивность потока, кроме скорости ветра, влияет и  $\Delta p\text{CO}_2$ , то в данном случае целесообразно рассматривать абсолютные значения (по модулю) потока, которые определяют его интенсивность. Таким образом, нужно отметить, что в холодный период года увеличение температуры приводит к снижению  $\Delta p\text{CO}_2$  и, соответственно, уменьшению потока  $\text{CO}_2$ .

Следовательно, можно заключить, что в декабре 2022 г. преобладающий вклад в интенсивность потока вносит скорость ветра, при этом направление потока  $\text{CO}_2$  определяется разницей  $p\text{CO}_2$  между поверхностным слоем вод и приводным слоем атмосферы.

### **Выводы**

В холодный период года воды северо-восточной части Черного моря служат стоком атмосферного  $\text{CO}_2$ .

По данным прямого определения  $p\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод и приводном слое атмосферы, поток  $\text{CO}_2$  в декабре 2022 г. изменялся в широких пределах от  $-0.048$  до  $-8.74$  ммоль·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup> при среднем значении  $-2.11 \pm 1.79$  ммоль·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>. При этом выраженных особенностей пространственной изменчивости не выявлено. Локальные минимумы потока наблюдались в восточном и южном районах Крымского полуострова.

Качественно пространственная изменчивость потока  $\text{CO}_2$  совпадала с распределением температуры, скорости ветра и  $\Delta p\text{CO}_2$ .

При анализе корреляционной связи потока  $\text{CO}_2$  с температурой, скоростью ветра и  $\Delta p\text{CO}_2$  наиболее сильная связь выявлена со скоростью ветра ( $-0.93$ ), слабая – с  $\Delta p\text{CO}_2$  (0.22). При увеличении скорости ветра наблюдается увеличение интенсивности потока  $\text{CO}_2$ , при этом направленность потока  $\text{CO}_2$  определяется  $\Delta p\text{CO}_2$  и, соответственно, величиной  $p\text{CO}_2$  и концентрацией  $\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод.

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. Uptake and storage of carbon dioxide in the ocean: The global CO<sub>2</sub> survey / R. A. Feely [et al.] // *Oceanography*. 2001. Vol. 14, no. 4. P. 18–32. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2001.03>
2. Global carbon budget 2022 / P. Friedlingstein [et al.] // *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14, iss. 11. P. 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
3. Decrease in air-sea CO<sub>2</sub> fluxes caused by persistent marine heatwaves / A. Mignot [et al.] // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. 4300. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31983-0>
4. Revised estimates of ocean-atmosphere CO<sub>2</sub> flux are consistent with ocean carbon inventory / A. J. Watson [et al.] // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. 4422. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18203-3>
5. Dynamics of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the northwestern European shelf based on voluntary observing ship and satellite observations / P. Marrec [et al.] // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12, iss. 18. P. 5371–5391. <https://doi.org/10.5194/bg-12-5371-2015>
6. Biogeochemical consequences of ocean acidification and feedbacks to the earth system / M. N. Gehlen [et al.] // *Ocean Acidification* / J. P. Gattuso, L. Hansson (eds.). Oxford : Oxford University Press, 2011. Chapter 12. P. 230–248. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199591091.003.0017>
7. The variability of partial pressure of carbon dioxide (pCO<sub>2</sub>) in a river-influenced coastal upwelling system: A case of the Northeast Pacific Coast / C. I. Addey [et al.] // *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2021. Vol. 9, no. 7. P. 133–148. doi:10.4236/gep.2021.97009
8. *Park J.* A re-evaluation of the coherence between global-average atmospheric CO<sub>2</sub> and temperatures at interannual time scales // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36, iss. 22. L22704. doi:10.1029/2009GL040975
9. Evolution of carbon sinks in a changing climate / I. Y. Fung [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2005. Vol. 102, iss. 32. P. 11201–11206. doi:10.1073/pnas.0504949102
10. *Borges A. V., Gypens N.* Carbonate chemistry in the coastal zone responds more strongly to eutrophication than to ocean acidification // *Limnology and Oceanography*. 2010. Vol. 55, iss. 1. P. 346–353. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.0346>
11. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
12. *Ковалёва И. В., Суслин В. В.* Интегральная первичная продукция в глубоководных районах Черного моря в 1998–2015 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 4. С. 432–445. EDN MYVMZX. doi:10.22449/0233-7584-2022-4-432-445
13. *Медведев Е. В., Моисеенко О. Г., Хоружий Д. С.* Многолетние изменения карбонатной системы Черного моря с 1932 по 2010 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. Вып. 27. С. 318–321. EDN VBFSCR.
14. *Хоружий Д. С.* Изменчивость потока CO<sub>2</sub> на границе раздела вода – атмосфера в прибрежных водах Черного моря на разных масштабах времени в 2010–2014 гг. // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 434–445. EDN YMQLZJ. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-434-445
15. *Хоружий Д. С.* Использование приборного комплекса AS-C3 для определения парциального давления углекислого газа и концентрации неорганического углерода в морской воде // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. Вып. 23. С. 260–272. EDN WLBMPX.

16. *Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И.* Система сбора гидрометеорологической информации // Системы контроля окружающей среды. 2010. Вып. 13. С. 50–53.
17. *Garmashov A.* Hydrometeorological monitoring on the stationary oceanographic platform in the Black sea // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020 : proceedings. Sofia, 2020. Book 3.1. P. 171–176. doi:10.5593/sgem2020/3.1/s12.023
18. *Wanninkhof R.* Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // Limnology and Oceanography: Methods. 2014. Vol. 12, iss. 6. P. 351–362. doi:10.4319/lom.2014.12.351
19. *Millero F. J.* The Marine Inorganic Carbon Cycle // Chemical Reviews. 2007. Vol. 107, iss. 2. P. 308–341. doi:10.1021/cr0503557
20. Controls on surface water carbonate chemistry along North American ocean margins / W.-J. Cai [et al.] // Nature Communications. 2020. Vol. 11. 2691. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16530-z>
21. *Демидов А. Б.* Сезонная изменчивость и оценка годовых величин первичной продукции фитопланктона в Черном море // Океанология. 2008. Т. 48, № 5. С. 718–733. EDN JSJSHX.

Поступила 07.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 14.12.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

#### *Об авторах*

**Орехова Наталья Александровна**, ведущий научный сотрудник, зав. отделом биогеохимии моря, Морской гидрофизический институт РАН (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)

**Медведев Евгений Витальевич**, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 6332-4572**, **ORCID ID: 0000-0002-6093-5102**, [eugenemedvedev@mhi-ras.ru](mailto:eugenemedvedev@mhi-ras.ru)

**Мукосеев Игорь Николаевич**, старший инженер, отдел биогеохимии моря, лаборатория мониторинга и исследования потоков парниковых газов и кислорода в морской среде, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2)

**Гармашов Антон Викторович**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 8941-9305**, **Scopus Author ID: 54924806400**, **WoS ResearcherID: P-4155-2017**, [ant.gar@mail.ru](mailto:ant.gar@mail.ru)

#### *Вклад авторов*

**Орехова Наталья Александровна** – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, коррекция текста статьи

**Медведев Евгений Витальевич** – получение натуральных данных, обработка данных измерений, обсуждение результатов

**Мукосеев Игорь Николаевич** – получение натуральных данных, подготовка графического материала

**Гармашов Антон Викторович** – получение и обработка метео данных, обсуждение результатов

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*