

Сезонная изменчивость содержания CO_2 в поверхностном слое вод Черного моря и интенсивности обмена с атмосферой по данным биогеохимического реанализа

Е. М. Лемешко *, М. В. Цыганова, Е. Е. Лемешко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

Аннотация

Исследована сезонная и межгодовая пространственная изменчивость равновесного парциального давления углекислого газа $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод Черного моря и потока углекислого газа $F\text{CO}_2$ на поверхности раздела атмосфера – море на основе данных биогеохимического реанализа. Измерения *in situ* за 2015–2024 гг. использовали для валидации данных реанализа и сопоставления сезонного хода $p\text{CO}_2$ и $F\text{CO}_2$. Дополнительно сопоставляли значения $p\text{CO}_2$ по данным реанализа в приводном слое атмосферы с инструментальными измерениями. Сезонные циклы осредненного по полигону потока $F\text{CO}_2$ и равновесного парциального давления в приповерхностном слое моря по данным инструментальных наблюдений и биогеохимического реанализа совпадают в пределах 95%-ных доверительных интервалов, за исключением летнего сезона для $p\text{CO}_2$. Между рассматриваемыми параметрами установлены статистически значимые регрессионные соотношения ($p < 0.001$), в результате по данным реанализа получены новые представления о сезонной изменчивости $p\text{CO}_2$ и $F\text{CO}_2$ во всей акватории моря. Это особенно актуально, когда отсутствуют данные наблюдений в зимний и весенний периоды и ограничен район проведения экспедиций. На сезонную изменчивость $p\text{CO}_2$ и $F\text{CO}_2$ основное влияние оказывает температура воды и разность парциальных давлений CO_2 между морем и атмосферой. Распределение $p\text{CO}_2$ и $F\text{CO}_2$ на шельфе и в прибрежной зоне моря показывает значительное влияние апвеллингов у Крыма и речных плумов на сезонную динамику $F\text{CO}_2$.

Ключевые слова: парциальное давление углекислого газа, $p\text{CO}_2$, поток углекислого газа, $F\text{CO}_2$, сезонный цикл $p\text{CO}_2$, сезонный цикл $F\text{CO}_2$, температура воды, соленость, плум, апвеллинг, Черное море, региональный климат CO_2

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» (шифр «Прибрежные исследования»).

© Лемешко Е. М., Цыганова М. В., Лемешко Е. Е., 2026



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: Лемешко Е. М., Цыганова М. В., Лемешко Е. Е. Сезонная изменчивость содержания CO_2 в поверхностном слое вод Черного моря и интенсивности обмена с атмосферой по данным биогеохимического реанализа // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 3. С. 38–55. EDN UWSOMY.

Seasonal Variability of CO_2 Content in the Surface Layer of the Black Sea Waters and the Intensity of Exchange with the Atmosphere According to Biogeochemical Reanalysis Data

E. M. Lemeshko*, M. V. Tsyganova, E. E. Lemeshko

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

Abstract

This article examines the seasonal and interannual spatial variability of the equilibrium partial pressure of carbon dioxide $p\text{CO}_2$ in the surface water layer and the carbon dioxide flux FCO_2 at the atmosphere-sea interface for the Black Sea based on biogeochemical reanalysis data. *In situ* measurements for 2015–2024 were used to validate the reanalysis data and compare the seasonal variations of $p\text{CO}_2$ and FCO_2 . Additionally, $p\text{CO}_2$ from reanalysis data in the surface layer of the atmosphere was compared with instrumental measurements. Seasonal cycles of the polygon-averaged FCO_2 flux and the equilibrium partial pressure in the near-surface layer of the sea, based on instrumental observations and biogeochemical reanalysis data, coincide within 95% confidence intervals, with the exception of the summer season for $p\text{CO}_2$. Statistically significant regression relationships ($p < 0.001$) were established between the parameters under consideration. As a result, the reanalysis data provided new insights into the seasonal variability of $p\text{CO}_2$ and FCO_2 throughout the sea area. This is particularly relevant when observational data are lacking for the winter and spring periods and the expedition area is limited. Seasonal variability of $p\text{CO}_2$ and FCO_2 is primarily influenced by water temperature and the difference in partial CO_2 pressure between the sea and the atmosphere. The distribution of $p\text{CO}_2$ and FCO_2 on the shelf and in the coastal zone of the sea demonstrates the significant influence of upwellings near Crimea and river plumes on the seasonal dynamics of FCO_2 .

Key words: carbon dioxide partial pressure, $p\text{CO}_2$, carbon dioxide flux, FCO_2 , seasonal cycle of $p\text{CO}_2$, seasonal cycle of FCO_2 , water temperature, salinity, plume, upwelling, Black Sea, regional climate CO_2

Acknowledgments: This work was carried out under state assignment of the Federal Research Center “Marine Hydrophysical Institute of the RAS” on topic FNNN-2024-0016. “Study of spatio-temporal variability of oceanological processes in the coastal, coastal and shelf zones of the Black Sea under the influence of natural and anthropogenic factors based on contact measurements and mathematical modeling” (code “Coastal Research”).

For citation: Lemeshko, E.M., Tsyganova, M.V. and Lemeshko, E.E., 2026. Seasonal Variability of CO_2 Content in the Surface Layer of the Black Sea Waters and the Intensity of Exchange with the Atmosphere According to Biogeochemical Reanalysis Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 38–55.

Введение

Углекислый газ, как один из парниковых газов, влияет на теплообмен между поверхностью суши и океана, модулируя повышение температуры воздуха, что запускает вариации климатической системы и в глобальном, и в региональном масштабах [1]. В отличие от открытого океана источники и стоки атмосферного углекислого газа (CO_2) и его поток на границе вода – атмосфера в прибрежных морях изучены недостаточно [2–4]. Для прибрежных регионов Мирового океана характерно поглощение (инвазия) CO_2 в умеренных и высоких широтах и выделение (эвазия) CO_2 в низких широтах и тропиках [2, 3, 5]. При этом среднегодовые значения потока CO_2 в этих регионах сопоставимы с его значениями в прилегающем открытом океане. В целом прибрежные моря являются областями абсорбции CO_2 . Наиболее интенсивные и стационарные зоны поглощения находятся в полярных и субполярных прибрежных морях, район океана около Южной Гренландии имеет самые высокие значения потока CO_2 (до $-7.9 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) [5]. Черное море занимает второе место по абсорбции CO_2 , поток этого газа достигает здесь приблизительно $-5.0 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ [5, 6]. Таким образом, актуальность проводимого исследования обусловлена важностью изучения потока CO_2 на границе раздела море – атмосфера не только в шельфовой зоне, но и на всей акватории Черного моря во все сезоны.

В Черном море до 1960–1970-х гг. преобладала инвазия CO_2 из атмосферы в воду, поскольку равновесное парциальное давление ($p\text{CO}_2$) оставалось ниже парциального давления углекислого газа в атмосфере [7]. В 1960–1990-е гг. в Черном море было отмечено увеличение общего растворенного неорганического углерода (TCO_2), $p\text{CO}_2$ и уменьшение pH, что привело к негативным тенденциям в трансформации карбонатной системы моря [7]. По времени это совпало с ростом глобально осредненной концентрации атмосферного CO_2 , обусловленным в основном антропогенным воздействием.

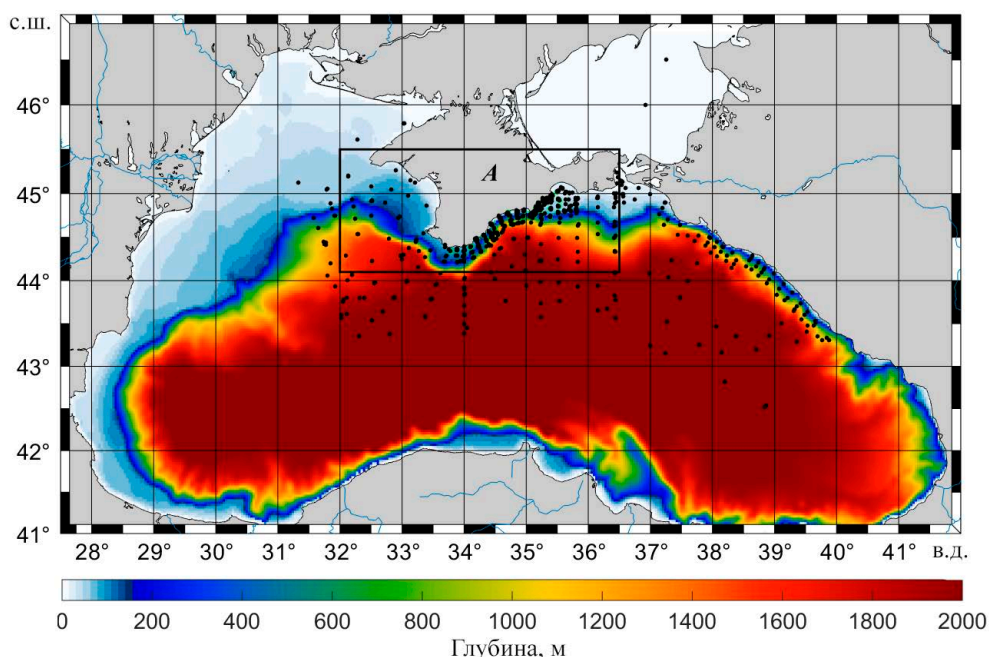
По осредненным данным высокоточных измерений *in situ* парциального давления $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод, выполненных в ходе 13 экспедиций за 2015–2021 гг. в северо-северо-восточной части Черного моря, был рассчитан сезонный ход $p\text{CO}_2$. Он относится к синусоидальному типу с изменением от 324 до 570 мкاتم при среднем значении 460 мкاتم [8]. При этом с апреля по октябрь северная часть Черного моря выделяет CO_2 в атмосферу, а с ноября по март абсорбирует его [8–10]. Расчеты потока CO_2 в зимний период по данным пространственной гидрохимической съемки северо-северо-восточной части Черного моря в декабре 2022 г. подтвердили направленность потока CO_2 из атмосферы в море с максимумами вдоль восточного побережья Крыма [10]. Показано также, что в прибрежных водах на синоптическом масштабе времени поток CO_2 характеризуется меньшей амплитудой колебаний по сравнению с сезонной и межгодовой изменчивостью [6].

Основными абиотическими факторами, влияющими на поток CO_2 , являются температура воды, скорость ветра и динамика вод [11]. На десятилетнюю изменчивость поглощения CO_2 в океане преимущественное влияние оказывают изменения циркуляции вод и биотические факторы, которые способствуют перераспределению как естественного, так и антропогенного углерода в океане [11]. Пространственная изменчивость потока CO_2 на шельфе Крыма

в декабре 2022 г. качественно совпадала с распределением температуры, скорости ветра и градиента парциального давления на границе море – атмосфера $\Delta p\text{CO}_2$, хотя наиболее сильная корреляционная связь потока CO_2 была выявлена со скоростью ветра (-0.93) [10].

Для внутренних морей дополнительным источником CO_2 являются речные воды, что особенно влияет на потоки CO_2 на шельфе [5, 12]. В Черном море вклад этого источника значителен: сток Дуная, Днестра, Днепра и Южного Буга формируют обширный опресненный поверхностный слой на северо-западном шельфе с высокими концентрациями CO_2 [5,13]. Дополнительным фактором поглощения атмосферного CO_2 в море выступают апвеллинги, которые приводят к снижению температуры поверхностных вод, притоку глубинных богатых углеродом вод и увеличению первичной продукции [4, 14]. Общая площадь поверхности, занимаемой водами апвеллинга, может достигать 14 % от всей площади Черного моря, а в межгодовой изменчивости числа апвеллингов проявляется квазидвухлетняя цикличность [15].

Таким образом, для более полного описания пространственно-временной изменчивости потоков CO_2 и их зависимости от гидрофизических и метеорологических условий для всей акватории Черного моря недостаточно использования только высокоточных гидрохимических измерений *in situ* ввиду ограниченности их выборки по пространству и времени (рис. 1).



Р и с . 1 . Район работ в Черном море. Точками указаны гидрохимические станции, выполненные в 2015–2024 гг., прямоугольником выделена область осреднения данных реанализа (A)

Fig. 1. The study area in the Black Sea. The dots indicate hydrochemical stations for 2015–2024; the rectangle highlights the area of reanalysis data averaging (A)

Цели работы:

1) оценить характеристики пространственно-временной сезонной и меж-годовой изменчивости парциального давления CO_2 ($p\text{CO}_2$) в поверхностном слое вод и потока CO_2 на границе раздела море – атмосфера ($F\text{CO}_2$) по данным контактных измерений и биогеохимического реанализа;

2) установить статистически значимые регрессионные соотношения для $p\text{CO}_2$, $F\text{CO}_2$ по данным контактных измерений и биогеохимического реанализа и оценить зависимость этих параметров от температуры поверхностных вод.

Материалы и методы

В статье использованы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» за 2015–2024 гг. (табл. 1, рис. 1). Район экспедиционных работ включает северную и северо-восточную части Черного моря и 12-мильную (22.2 км) зону крымского побережья, в которой измерения в основном проводились после 2022 г. (рис. 1). Гидрохимические данные собраны в виде базы градиентов концентрации и потоков CO_2 на границе вода – атмосфера по результатам прямых измерений $p\text{CO}_2$ в северной части Черного моря¹⁾ и представлены в табл. 1.

Таблица 1. Равновесное парциальное давление CO_2 в поверхностном слое вод ($p\text{CO}_2$), в атмосфере ($p\text{CO}_2^{\text{atm}}$), поток CO_2 ($F\text{CO}_2$) и температура воды (T), осредненные по данным измерений в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» за 2015–2024 гг.

Table 1. Equilibrium partial pressure of CO_2 in the surface water layer ($p\text{CO}_2$), in the atmosphere ($p\text{CO}_2^{\text{atm}}$), CO_2 flux ($F\text{CO}_2$) and water temperature (T), averaged based on measurement data from R/V *Professor Vodyanitsky* cruises for 2015–2024

Номер рейса / Cruise number	Дата / Date	$p\text{CO}_2$, мкатм / $p\text{CO}_2$, μatm	$p\text{CO}_2^{\text{atm}}$, мкатм / $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$, μatm	$F\text{CO}_2$, ммоль·м ⁻² ·сут ⁻¹ / $F\text{CO}_2$, mmol·m ⁻² ·day ⁻¹	T , °C
81	03.11.2015– 10.11.2015	329.4 ± 3.7	402.9 ± 6.8	-3.042 ± 2.76	15.1 ± 0.46
87	01.07.2016– 14.07.2016	490.2 ± 21.2	389.3 ± 2.7	5.84 ± 2.68	25.2 ± 0.32
89	06.10.2016– 15.10.2016	438.2 ± 28.3	405.4 ± 4.9	2.07 ± 1.53	19.2 ± 1.13
91	21.11.2016– 01.12.2016	392.3 ± 8.6	411.4 ± 4.1	-0.28 ± 0.15	12.0 ± 0.82
94	27.04.2017– 05.05.2017	471.2 ± 17.6	413.4 ± 3.8	1.37 ± 0.80	12.4 ± 0.69

¹⁾ База данных градиентов концентрации и потоков CO_2 на границе вода-атмосфера по данным прямых измерений $p\text{CO}_2$ для северной части Черного моря / С. К. Коновалов, Н. А. Орехова, Е. В. Медведев, А. В. Ингеров [и др.] ; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Электрон. дан. Москва, 2023. № гос. регистрации 2023623055.

Окончание табл. 1 / Table 1 (concluded)

Номер рейса / Cruise number	Дата / Date	$p\text{CO}_2$, мкатм / $P\text{CO}_2$, μatm	$p\text{CO}_2^{\text{atm}}$, мкатм / $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$, μatm	$F\text{CO}_2$, ммоль·м ⁻² ·сут ⁻¹ / $F\text{CO}_2$, mmol·m ⁻² ·day ⁻¹	T , °C
95	16.06.2017– 02.07.2017	505.3 ± 6.0	395.2 ± 1.4	4.93 ± 1.11	22.5 ± 0.63
98	14.11.2017– 28.11.2017	366.5 ± 7.8	410.5 ± 3.2	–3.05 ± 1.33	12.5 ± 0.59
101	17.12.2017– 26.12.2017	355.1 ± 5.0	413.5 ± 2.4	–6.93 ± 2.46	11.1 ± 0.36
102	12.06.2018– 27.06.2018	500.8 ± 8.8	404.3 ± 2.6	3.05 ± 1.57	23.6 ± 0.82
108	14.07.2019– 02.08.2019	459.5 ± 9.1	402.7 ± 2.8	3.14 ± 1.15	24.5 ± 0.50
114	21.09.2020– 08.10.2020	469.4 ± 30.6	430.3 ± 5.8	3.31 ± 2.65	22.8 ± 1.20
117	30.07.2021– 08.08.2021	515.5 ± 11.9	409.7 ± 1.5	2.69 ± 1.09	28.1 ± 0.30
119	04.09.2021– 19.09.2021	440.5 ± 2.6	411.4 ± 1.28	1.44 ± 0.28	22.3 ± 0.20
125	02.12.2022– 27.12.2022	388.2 ± 2.2	433.9 ± 1.0	–2.06 ± 0.41	13.0 ± 0.25
126	16.03.2023– 04.04.2023	413.4 ± 2.9	438.1 ± 1.0	–2.20 ± 0.69	9.6 ± 0.09
127	14.06.2023– 02.07.2023	474.5 ± 3.5	421.9 ± 1.8	1.70 ± 0.52	22.9 ± 0.21
129	06.10.2023– 22.10.2023	423.2 ± 2.8	437.3 ± 1.0	–0.86 ± 0.38	18.9 ± 0.41
130	07.03.2024– 21.03.2024	370.5 ± 6.8	435.9 ± 2.1	–2.63 ± 0.60	10.3 ± 0.17
131	28.05.2024– 18.06.2024	497.3 ± 5.3	434.3 ± 1.0	2.24 ± 0.56	20.4 ± 0.43

Примечание. Для средних значений приведены 95%-ные доверительные интервалы.

Note: For average values, 95% confidence intervals are given.

Значения парциального давления CO_2 определяли с помощью системы непрерывной прокачки забортной морской воды из поверхностного слоя 1–3 м по методике [16].

Температуру и соленость поверхностного слоя вод измеряли зондирующим комплексом *IDRONAUT OCEAN SEVEN 320PlusM*, а на мелководных станциях с глубинами менее 50 м – гидрологическим *CTD*-зондом ГАП-АК-16. Скорость ветра измеряли системой сбора гидрометеорологической информации и приводили к стандартной 10-метровой высоте наблюдения [17]. Значение

потока углекислого газа на границе вода – атмосфера FCO_2 рассчитывали на основе параметризаций и подхода, предложенных в работе [18]. При этом учитывали константы для диапазона измеренных значений скорости ветра и градиента ΔpCO_2 между поверхностью Черного моря и приводным слоем атмосферы, описанные в работе [10].

Кроме того, использованы данные биогеохимического реанализа на основе модели *NEMO* и блока *BAMHBI* (*Biogeochemical Model for Hypoxic and Benthic Influenced areas*)²⁾. В работе использовали среднемесячные значения pCO_2 и FCO_2 на поверхности моря из реанализа модели *NEMO*–*BAMHBI* на регулярной сетке 2.5×2.5 км за 2015–2024 гг.³⁾ Инструментальные измерения

Т а б л и ц а 2. Регрессионные зависимости параметров реанализа (pCO_2^{re} , pCO_2^{atm-re} , FCO_2^{re} , T^{re}) от соответствующих параметров измерений *in situ* (pCO_2 , pCO_2^{atm} , FCO_2 , T) при уровне значимости $p < 0.001$

Table 2. Regression dependences of parameters (pCO_2^{re} , pCO_2^{atm-re} , FCO_2^{re} , T^{re}) according to reanalysis data on *in situ* measurement data (pCO_2 , pCO_2^{atm} , FCO_2 , T) for the significance level $p < 0.001$

Регрессионная зависимость / Regression dependence	Период / Period	Уравнение регрессии / Regression equation
1. T^{re} от T / T_{re} on T	2015– 2020	$T^{re} = (0.95 \pm 0.08) \cdot T + 0.11 \pm 1.57$, $D = 0.91, R = 0.96$
2. pCO_2 от T / pCO_2 on T	2015– 2024	$pCO_2 = (6.11 \pm 0.97) \cdot T + 333.4 \pm 18.3$, $D = 0.56, R = 0.76$
3. FCO_2 от T / FCO_2 on T		$FCO_2 = (0.35 \pm 0.05) \cdot T - (5.6 \pm 1.0)$, $D = 0.58, R = 0.76$
4. FCO_2 от $(pCO_2 - pCO_2^{atm})$ / FCO_2 on $(pCO_2 - pCO_2^{atm})$		$FCO_2 = (0.045 \pm 0.004) \cdot (pCO_2 - pCO_2^{atm}) -$ $-(0.34 \pm 0.23)$, $D = 0.81, R = 0.90$
5. $(pCO_2 - pCO_2^{atm})$ от T / $(pCO_2 - pCO_2^{atm})$ on T		$(pCO_2 - pCO_2^{atm}) = (7.2 \pm 1.1) \cdot T - 107.6 \pm 19.9$, $D = 0.62, R = 0.79$
6. pCO_2^{re} от pCO_2 / pCO_2^{re} on pCO_2	2015– 2020	$pCO_2^{re} = (1.50 \pm 0.14) \cdot pCO_2 - (192.8 \pm 60.5)$, $D = 0.83, R = 0.91$
7. pCO_2^{atm-re} от pCO_2^{atm} / pCO_2^{atm-re} on pCO_2^{atm}		$pCO_2^{atm-re} = (0.43 \pm 0.11) \cdot pCO_2^{atm} +$ $+(224.8 \pm 45.7)$, $D = 0.53, R = 0.73$
8. FCO_2^{re} от FCO_2 / FCO_2^{re} on FCO_2	2015– 2024	$FCO_2^{re} = (0.69 \pm 0.12) \cdot FCO_2 - (0.09 \pm 0.34)$, $D = 0.58, R = 0.76$

Примечание. D – коэффициент детерминации; R – коэффициент корреляции.

Note: D is the determination coefficient, R is the correlation coefficient

²⁾ Grégoire M., Vandenbulcke L., Capet A. Black Sea Biogeochemical Reanalysis (CMEMS BS-Biogeochemistry) (Version 1) : [Data set] / Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020. https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_REANALYSIS_BIO_007_005_BAMHBI

³⁾ Vandenbulcke L., Mouchet A., Grégoire M. Black Sea MFC BLKSEA_MULTI-YEAR_BGC_007_005. CMEMS, 2024. 36 p. (Quality information document ; CMEMS-BLK-QUID-007-005). URL: <https://documentation.marine.copernicus.eu/QUID/CMEMS-BLK-QUID-007-005.pdf> (дата обращения: 12.08.2026).

$p\text{CO}_2$ в приводном слое атмосферы сопоставляли с $p\text{CO}_2$ атмосферного реанализа на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ за 2015–2023 гг. [3]. Погрешность измерений парциального давления CO_2 в приводном слое атмосферы составила менее 1 % [16].

В 2015–2024 гг. распределение экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» по месяцам было следующим: в августе и сентябре – по две экспедиции, в июне – пять, в июле – четыре, в остальные месяцы – по три (табл. 1). В январе и феврале рейсов не проводилось. Продолжительность измерений в каждом месяце также варьировалась от нескольких дней до двух недель. Неравномерное распределение данных по месяцам для каждого месяца учитывали при расчете средних значений и среднеквадратических отклонений (СКО), а также соответствующих доверительных интервалов. Методика сравнения средних по полигону инструментальных наблюдений и средних по району А данных реанализа (рис. 1) сначала была опробована на поверхностной температуре воды, для которой получено уравнение регрессии при уровне значимости $p < 0.001$ с коэффициентом детерминации $D = 0.91$ и коэффициентом корреляции $R = 0.96$ (строка 1 в табл. 2).

Результаты и обсуждение

Сезонный ход парциального давления CO_2 в море, осредненного по району А и по всему морю, по данным реанализа и по соответствующим рейсам из табл. 1, представлен на рис. 2, а. По данным инструментальных наблюдений, сезонный ход достигал максимума 495 мкатм (СКО – 40.6 мкатм) в летний период и минимума 364.1 мкатм (СКО – 6.7 мкатм) в ноябре (при отсутствии наблюдений в январе и феврале). Среднее значение при этом составило 440 мкатм.

Отмечается тенденция к уменьшению значений СКО в зимний период по сравнению с летним. По данным реанализа, сезонный ход $p\text{CO}_2$ описывается синусоидальной кривой для осреднения как по району работ А, так и по всему морю. Для всего моря максимум достигался в июне (583 мкатм), минимум (369 мкатм) – в январе при среднем значении 457 мкатм. По данным, осредненным по району работ А, максимум наблюдался в июле (553 мкатм), минимум (338 мкатм) – в январе при среднем значении 425 мкатм.

Пространственное расположение станций при осреднении влияет на соответствие данным реанализа (см. рис. 1). Средние инструментальные значения $p\text{CO}_2$ за март, апрель, октябрь и декабрь хорошо согласуются с кривой реанализа, осредненной по всему морю, тогда как значения *in situ* за май, сентябрь и ноябрь лучше соответствуют кривой для района А (рис. 2, а). Летние значения $p\text{CO}_2$, по данным инструментальных наблюдений, примерно на 50 мкатм меньше значений реанализа. Одно из возможных объяснений заключается в изъятии CO_2 из поверхностного слоя вод в период «цветения» кокколитофорида (май – июль) и других биологических организмов, имеющих карбонатный скелет [19]. Однако по данным измерений было установлено отсутствие выраженной статистической связи между концентрацией кокколитов и величиной $p\text{CO}_2$, что указывает на второстепенный вклад «цветения» в изменчивость концентрации CO_2 в поверхностном слое вод [19].

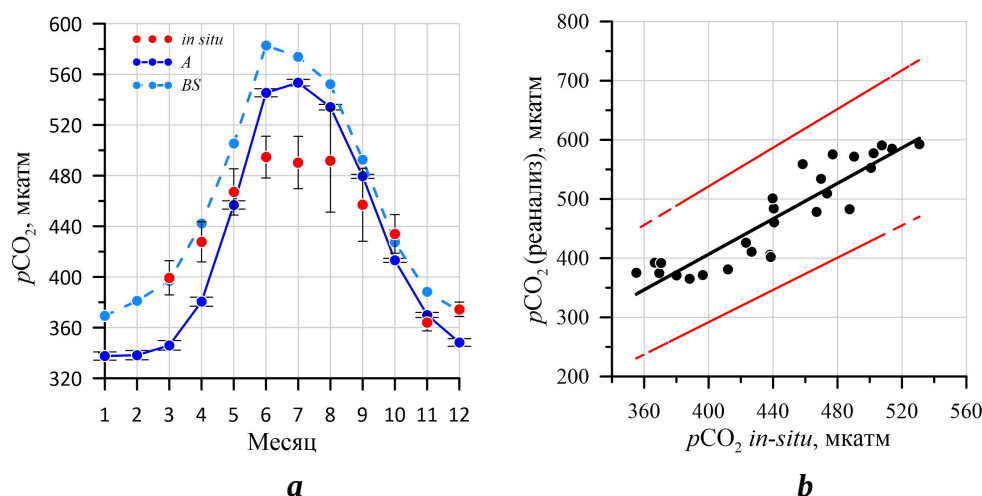
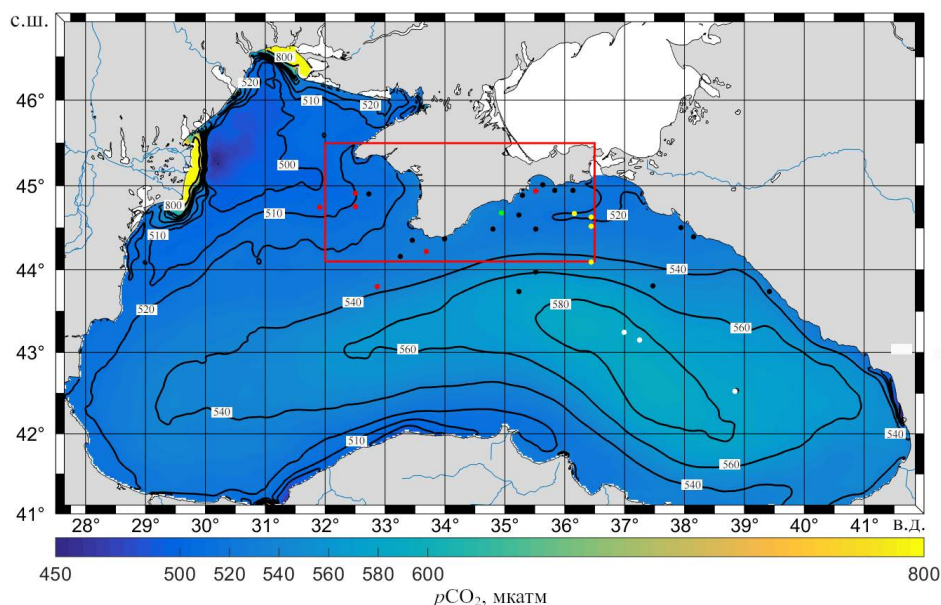


Рис. 2. Сезонный ход равновесного парциального давления CO_2 в море, осредненного по району A , всему морю (BS) и по *in situ* данным экспедиций, приведены среднеквадратичные отклонения (a); регрессия $p\text{CO}_2$ *in situ* и данных реанализа $p\text{CO}_2^{\text{re}}$, осредненных по району A (черная сплошная линия), 95%-ные доверительные интервалы обозначены красными линиями (b)

Fig. 2. Seasonal variations in partial pressure of CO_2 in the sea, averaged over the region (A), the entire sea (BS), and according to *in situ* expedition data (a). Regression of $p\text{CO}_2$ *in situ* and reanalysis data, averaged over region A (solid black line) and 95% confidence intervals (red lines) (b)

Уменьшение значений $p\text{CO}_2$ по инструментальным данным в летний сезон в сравнении с данными реанализа, по-видимому, объясняется большим количеством станций в прибрежной зоне (см. рис. 1, 3). Поэтому указанное выше смещение $p\text{CO}_2$ примерно на 50 мкاتم (рис. 2, a) в летний сезон по данным инструментальных наблюдений объясняется неравномерной локализацией станций в прибрежной зоне Крыма именно в летний сезон проведения экспедиций (рис. 3), в то время как данные реанализа равномерно осреднены по всей области A . Это видно из сопоставления распределения станций по акватории (см. рис. 1) и сезонных карт распределения $p\text{CO}_2$ (рис. 3). Тем не менее между данными $p\text{CO}_2$ *in situ* и данными реанализа, осредненными по району A , получена значимая на уровне $p < 0.001$ регрессия с коэффициентами детерминации 0.83 и корреляции 0.91 (см. рис. 2, b), уравнение регрессии приведено в табл. 2 (строка 6). Следует отметить хорошее соответствие графиков сезонного хода по данным инструментальных наблюдений и по данным реанализа, осредненным для района A . При этом значения $p\text{CO}_2$, по данным реанализа, для всего моря больше, чем для района A , а максимум для всего моря достигается на месяц раньше (в июне) по сравнению с районом A (июль) (см. рис. 2, a).

Результаты сопоставления парциального давления CO_2 в приводном слое атмосферы по данным атмосферного реанализа и прямых измерений показали хорошее соответствие. Для них получено регрессионное соотношение на уровне значимости $p < 0.001$ с коэффициентом детерминации $D = 0.53$ и корреляции $R = 0.73$ (строка 7 в табл. 2).



Р и с . 3 . Среднегодовое распределение $p\text{CO}_2$ за июль по данным реанализа за 2015–2024 гг. с указанием гидрохимических станций, для которых выполнена оценка сезонного хода по инструментальным данным, полученным в ходе рейсов: № 87, 2016 г. (красные точки); № 95, 2017 г. (желтые точки); № 108, 2019 г. (черные точки); № 117, 2021 г. (белые точки); № 127, 2023 г. (зеленые точки)

Fig. 3. Annual mean distribution $p\text{CO}_2$ for July 2015–2024 from reanalysis data and location of hydrochemical stations for which an estimate of the seasonal variation was obtained based on instrumental data from cruises: No. 87 (2016, red dots), No. 95 (2017, yellow dots), No. 108 (2019, black dots), No. 117 (2021, white dots), No. 127 (2023, green dots)

В холодный период года, с января по апрель и с октября по декабрь, в районе исследований А происходило поглощение атмосферного CO_2 . Максимальные отрицательные значения среднего по району А потока $F\text{CO}_2$ составили $-3 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ в марте и декабре, по инструментальным данным, и до $-4 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, по данным реанализа (рис. 4, а). В теплый период года, с мая по сентябрь, в районе исследований А поток $F\text{CO}_2$ был направлен в атмосферу, достигая максимума $3.4 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ в августе (рис. 4, а). Средняя температура поверхностного слоя моря также достигала максимума (27°C), по данным инструментальных наблюдений, в августе. При этом значения потока $F\text{CO}_2$, по данным реанализа, для всего моря больше, чем для района А (рис. 4, а). Осредненный по всему морю поток $F\text{CO}_2$ меняет направление с поглощения на эмиссию примерно на месяц раньше (в апреле), чем в районе А (в мае) (рис. 4, а).

Максимум $F\text{CO}_2$ по данным реанализа достигается летом на месяц раньше (в июле) и приблизительно на $1 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ превышает средний поток

по инструментальным данным (рис. 4, *a*). Тем не менее занижение инструментальных оценок сезонного хода $p\text{CO}_2$ в летний сезон (см. рис. 2, *a*) приводит к занижению FCO_2 по данным измерений относительно реанализа в июле (рис. 4, *a*). Однако по среднемесячным данным о FCO_2 (измерений *in situ* и реанализа) для района А за 2015–2024 гг. получена значимая на уровне $p < 0.001$ регрессия (рис. 4, *b*) с коэффициентами детерминации и корреляции соответственно 0.58 и 0.76 (строка 8 в табл. 2). Качественно сезонная изменчивость среднего по области исследований потока FCO_2 совпадала с сезонным ходом средней температуры и среднего градиента парциального давления $\Delta p\text{CO}_2$, для которых получены значимые уравнения регрессии (строки 3 и 4 в табл. 2 соответственно). Следует отметить хорошее соответствие графиков сезонного хода FCO_2 по данным инструментальных наблюдений и реанализа, осредненных для района А (рис. 4, *a*).

На основе данных реанализа получено сезонное пространственное распределение парциального давления (см. рис. 3, 5) и потока CO_2 (рис. 6, 7). В июле район А характеризовался значениями $p\text{CO}_2$ до 560 мкатм, что соответствует повышенным значениям на графике сезонного хода, так как большая часть станций находится в прибрежной и шельфовой зонах с $p\text{CO}_2$ до 520 мкатм (см. рис. 3). Минимальные значения (до 500 мкатм) зафиксированы на северо-западном шельфе моря. При этом прибрежные области стоков рек Южный Буг, Днепр и Днестр дают максимальные значения $p\text{CO}_2$ (до 800 мкатм) (см. рис. 3).

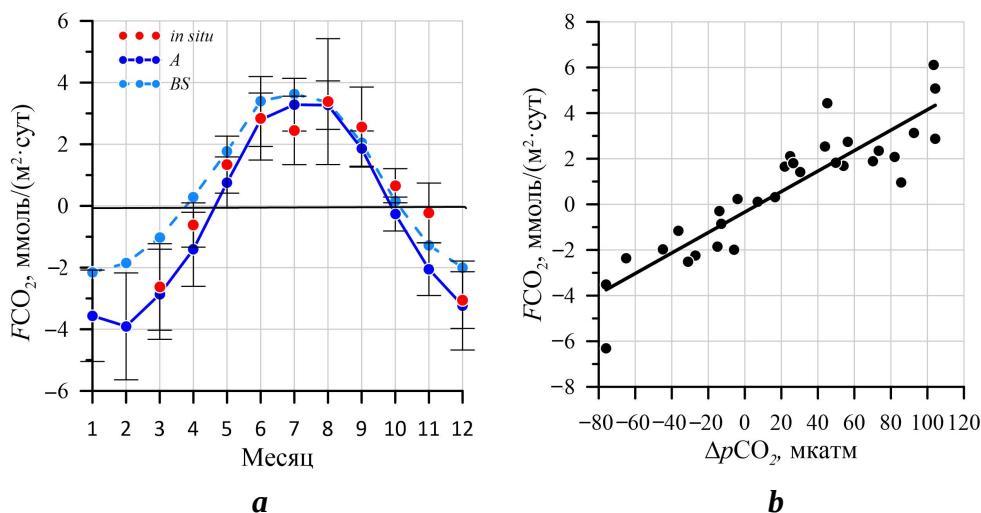
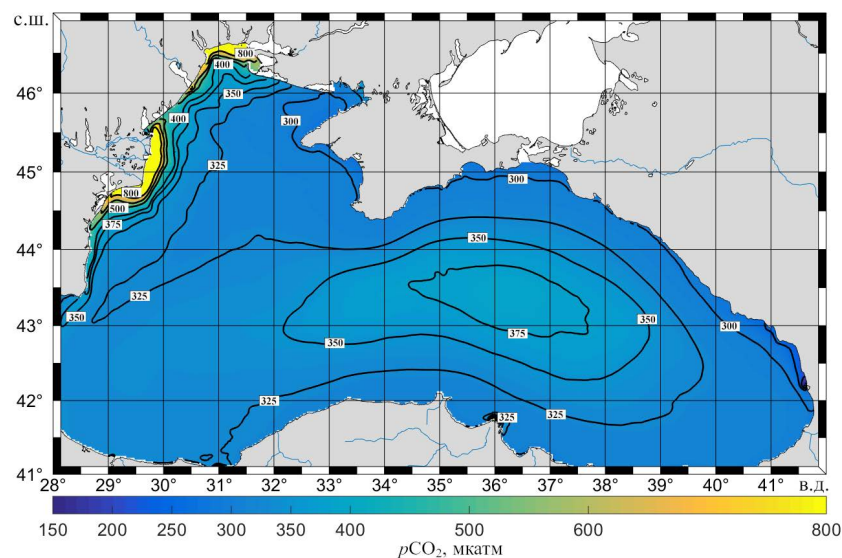


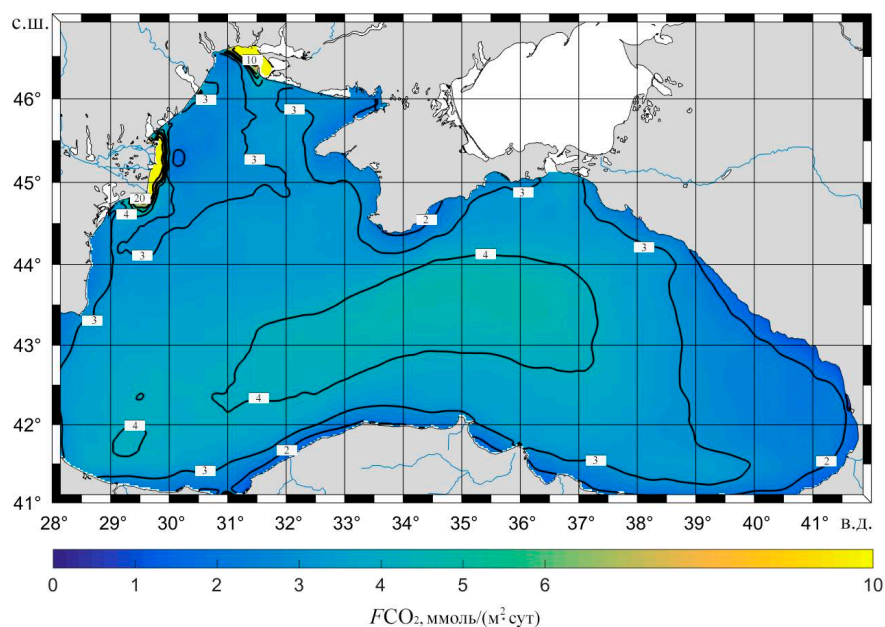
Рис. 4. Сезонный ход потока FCO_2 , осредненного по району А, по всему морю (BS) и по *in situ* данным экспедиций, приведены среднеквадратичные отклонения (*a*); регрессия FCO_2 и градиента парциального давления CO_2 на поверхности раздела море – атмосфера $\Delta p\text{CO}_2$ по среднемесячным данным *in situ* (*b*)

Fig. 4. Seasonal variation of the FCO_2 flux averaged over region A, over the entire sea (BS) and according to *in situ* expedition data (*a*). Regression of FCO_2 and the partial pressure gradient of CO_2 at the sea-atmosphere interface $\Delta p\text{CO}_2$ based on monthly average *in situ* data (*b*)



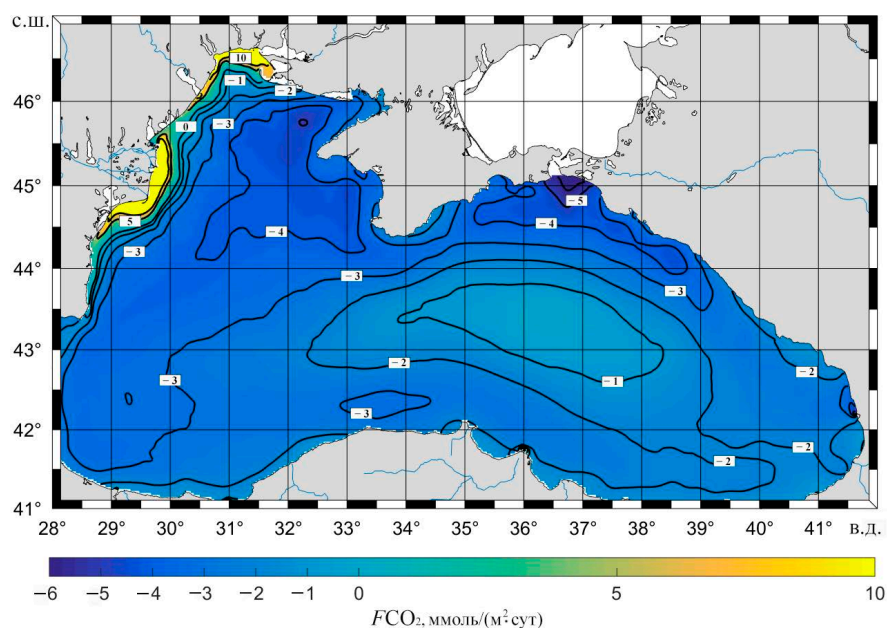
Р и с . 5 . Среднегодовое распределение $p\text{CO}_2$ по данным реанализа за январь 2015–2024 гг.

Fig . 5 . Annual mean distribution $p\text{CO}_2$ according to reanalysis data for January 2015–2024



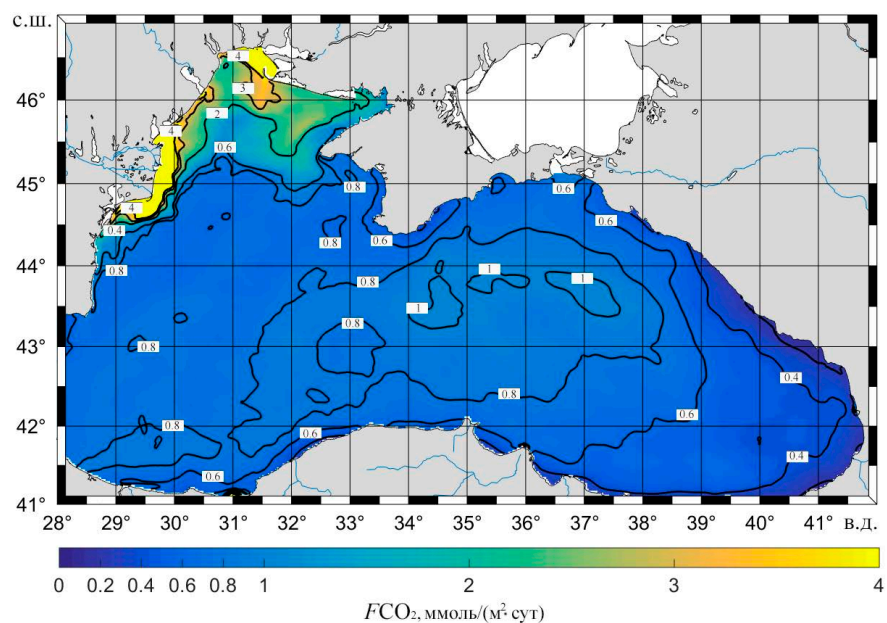
Р и с . 6 . Среднегодовое распределение FCO_2 по данным реанализа за июль 2015–2024 гг.

Fig . 6 . Annual mean distribution FCO_2 according to reanalysis data for July 2015–2024



Р и с . 7. Среднегодовое распределение FCO_2 по данным реанализа за январь 2015–2024 гг.

Fig . 7. Annual mean distribution FCO_2 according to reanalysis data for January 2015–2024



Р и с . 8. Среднегодовое распределение СКО FCO_2 по данным реанализа за июль 2015–2024 гг.

Fig . 8. Annual mean distribution of pCO_2 standard deviation according to reanalysis data for July 2015–2024

Наибольший источник стока CO_2 в море связан с плюмом Дуная, где значения $p\text{CO}_2$ достигают более 800 мкاتم (см. рис. 3). В центральной и западной глубоководных частях также отмечаются значения $p\text{CO}_2$ до 560 мкاتم (см. рис. 3). В январе в центральной части моря значения $p\text{CO}_2$ понижаются до 350 мкاتم, а в прибрежных и шельфовых областях севера и северо-востока моря – до 250–300 мкاتم (см. рис. 5). Зимой площадь речных плюмов сокращается вследствие уменьшения стока рек, но по-прежнему поверхностный опресненный слой остается источником CO_2 для моря со значениями $p\text{CO}_2$ до 800 мкاتم (см. рис. 5).

В летний период поток CO_2 направлен из моря в атмосферу, в июле он достигает максимума $F\text{CO}_2$, по данным реанализа, – до $4 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ в центральной части моря и свыше $10 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ в областях речных плюмов на северо-западном шельфе (см. рис. 6). Минимальные значения – до $2 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ – были локализованы в прибрежных областях Крыма (см. рис. 6) и совпадали с районами понижения температуры во время сезонных апвеллингов, статистические данные о которых приводятся в работе [15], а локальные минимумы потока $F\text{CO}_2$ наблюдались в восточном и южном районах Крымского п-ова, по данным измерений [10]. На рис. 8 области апвеллингов в районе Крыма оконтурены изолинией СКО $F\text{CO}_2$ $0.6 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. На северо-западном шельфе изменчивость, обусловленная суммарным воздействием стока рек и апвеллингов, достигает максимальных для всей акватории моря значений – $2\text{--}4 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, а в глубоководной части моря – не превышает $1 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (рис. 8).

В зимний период поток CO_2 направлен из атмосферы в море. В январе $F\text{CO}_2$ достигает максимума (по абсолютной величине) – до $-4 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ – на северо-западном шельфе и в прикерченском районе, минимума – до $-1 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ – в центральной части моря (см. рис. 7). Зимой области речных плюмов на северо-западном шельфе по-прежнему остаются источником CO_2 для моря, поток CO_2 положителен и направлен из моря в атмосферу со значениями $F\text{CO}_2$ в январе свыше $10 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (см. рис. 7). Речные плюмы рек Южный Буг, Днепр и Днестр характеризуются максимальными значениями $p\text{CO}_2$ (до 800 мкاتم) на северо-западном шельфе и служат источником CO_2 для моря (см. рис. 5). Поток CO_2 положителен и направлен из моря в атмосферу со средними значениями $F\text{CO}_2$ свыше $10 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (см. рис. 3–8). Роль Дуная как основного источника CO_2 на северо-западном шельфе моря проявляется в сезонном ходе CO_2 : максимум концентрации CO_2 в дельте и рукавах Дуная отмечается в мае и октябре [20]. Поскольку максимальный сток рек на северо-западном шельфе приходится на конец апреля – май, площади речных плюмов и, соответственно, потока $F\text{CO}_2$ в атмосферу достигают максимума в мае – июне [13].

Выводы

Сопоставление данных инструментальных наблюдений равновесного парциального давления $p\text{CO}_2$ в приповерхностном слое моря и потока $F\text{CO}_2$ на границе раздела море – атмосфера в 19 экспедициях за 2015–2024 гг. на контрольном полигоне А в северо-северо-восточной части Черного моря с биогеохимическим реанализом показало, что данные реанализа статистически

значимо описывают сезонную и межгодовую пространственно-временную изменчивость парциального давления и потока CO_2 в поверхностном слое моря. Получены следующие результаты:

- Определены значимые регрессионные зависимости и взаимные корреляции для параметров $p\text{CO}_2^{\text{re}}$, $p\text{CO}_2^{\text{atm-re}}$, $F\text{CO}_2^{\text{re}}$, T^{re} по данным реанализа и результатам измерений $p\text{CO}_2$, $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$, $F\text{CO}_2$, T *in situ* при уровне значимости $p < 0.001$.

- Сезонный ход осредненного по району *A* равновесного парциального давления $p\text{CO}_2$ в приповерхностном слое моря по данным инструментальных наблюдений и биогеохимического реанализа совпадает в пределах 95%-ных доверительных интервалов, за исключением летнего сезона, что объясняется расположением гидрохимических станций у побережья Крыма в летние экспедиции.

- Сезонный ход осредненного по району *A* потока $F\text{CO}_2$ на границе раздела море – атмосфера по данным инструментальных наблюдений и биогеохимического реанализа совпадает в пределах 95%-ных доверительных интервалов.

- Впервые получены количественные оценки пространственной изменчивости сезонных потоков CO_2 для всей акватории Черного моря: в холодный период (октябрь – апрель) преобладает сток ($F\text{CO}_2 < 0$), в теплый (май – сентябрь) – эмиссия ($F\text{CO}_2 > 0$).

- Впервые для всей акватории Черного моря количественно определен сезонный ход парциального давления $p\text{CO}_2$ в приповерхностном слое вод: максимум 580 мкاتم в июне и минимум 365 мкاتم в январе.

- Для района *A* в северной части моря вокруг Крыма максимум $p\text{CO}_2$ (до 557 мкاتم) наблюдается уже в июле, а минимум в январе достигает 340 мкاتم. Это позволяет восстановить сезонные значения $p\text{CO}_2$ и $F\text{CO}_2$ в зимние месяцы (январь и февраль), когда экспедиции не проводились.

Впервые для всей акватории Черного моря получены для каждого месяца среднемноголетние пространственные оценки равновесного парциального давления $p\text{CO}_2$ в приповерхностном слое моря и потока $F\text{CO}_2$ на границе раздела море – атмосфера.

- Часть северо-западного шельфа и прикерченский район характеризуются максимальной инвазией CO_2 из атмосферы в море в зимний период (в январе $F\text{CO}_2$ достигает $-4 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), в то время как в глубоководной части моря инвазия слабая (около $-1 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$). Летом максимальная эвазия (в июле $F\text{CO}_2$ достигает $5 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) охватывает центральную и западную части моря, а в зонах речных плумов на северо-западном шельфе значения могут превышать $10 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

- Пространственное распределение потока CO_2 на северо-западном шельфе свидетельствует о влиянии речных плумов (особенно Дуная) на сезонную динамику $F\text{CO}_2$.

- Сопоставление распределения потока CO_2 и его СКО в прибрежной зоне Крыма со статистическими данными о сезонных апвеллингах позволяет сделать качественный вывод о значительном влиянии апвеллингов на $F\text{CO}_2$, особенно в летний период, когда повторяемость и интенсивность апвеллингов максимальны.

На основании полученных значимых регрессионных зависимостей и взаимных корреляций можно заключить, что среди рассмотренных факторов на $p\text{CO}_2$ основное влияние оказывает температура воды, а на $F\text{CO}_2$ – температура воды и разность парциальных давлений CO_2 между морем и атмосферой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Canadell J. G., Monteiro P. M. S., Costa M. H., Cotrim da Cunha L. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / edited by V. P. Masson-Delmotte [et al.].* New York, NY, USA ; Cambridge, United Kingdom : Cambridge University Press, 2023. P. 673–816. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>
2. Landschützer P., Laruelle G. G., Roobaert A., Regnier P. A uniform $p\text{CO}_2$ climatology combining open and coastal oceans // *Earth System Science Data*. 2020. Vol. 12, iss. 4. P. 2537–2553. EDN HZNUIS. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2537-2020>
3. Fay A. R., Gregor L., Landschützer P., McKinley G. A. et al. SeaFlux: harmonization of air–sea CO_2 fluxes from surface $p\text{CO}_2$ data products using a standardized approach // *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13, iss. 10. P. 4693–4710. EDN QYJKNR. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4693-2021>
4. Gregor L., Shutler J., Gruber N. High-resolution variability of the ocean carbon sink // *Global Biogeochemical Cycles*. 2024. Vol. 38, iss. 8. e2024GB008127. <https://doi.org/10.1029/2024GB008127>
5. Roobaert A., Laruelle G. G., Landschützer P., Gruber N. et al. The spatiotemporal dynamics of the sources and sinks of CO_2 in the global coastal ocean // *Global Biogeochemical Cycles*. 2019. Vol. 33, iss. 12. P. 1693–1714. <https://doi.org/10.1029/2019GB006239>
6. Хоружий Д. С. Изменчивость потока CO_2 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. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-434-445>
7. 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.
8. Коновалов С. К., Орехова Н. А. Новые представления о содержании CO_2 в поверхностном слое вод Черного моря по данным прямых измерений // *Доклады Российской академии наук. Науки о земле*. 2024. Т. 518, № 2. С. 335–342. EDN FFTINA. <https://doi.org/10.31857/S2686739724100155>
9. Сергеев Д. А., Троицкая Ю. И., Ермакова О. С., Орехова Н. А. Исследование связи между парциальным давлением углекислого газа и температурой морской поверхности в циклических сезонных вариациях в Черноморском регионе // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. Т. 40, № 6. С. 805–820. EDN NODXEW.
10. Орехова Н. А., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н., Гармашов А. В. Поток CO_2 на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2024. № 1. С. 57–67. EDN GNFAZA.
11. DeVries T. Atmospheric CO_2 and sea surface temperature variability cannot explain recent decadal variability of the ocean CO_2 sink // *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49, iss. 7. e2021GL096018. EDN CRFNHO. <https://doi.org/10.1029/2021GL096018>

12. Bai Y., Cai W.-J., He X., Zhai W. et al. A mechanistic semi-analytical method for remotely sensing sea surface pCO₂ in river-dominated coastal oceans: A case study from the East China Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015. Vol. 120, iss. 3. P. 2331–2349. <https://doi.org/10.1002/2014JC010632>
13. Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Фомин В. В., Рябцев Ю. Н. Моделирование распространения речного плюма в прибрежной зоне бесприливного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2025. Т. 41, № 5. С. 658–680. EDN ZJJJC.
14. Hales B., Takahashi T., Bandstra L. Atmospheric CO₂ uptake by a coastal upwelling system // *Global Biogeochemical Cycles*. 2005. Vol. 19, iss. 1. GB1009. EDN MHOPDX. <https://doi.org/10.1029/2004GB002295>
15. Станичная Р. Р., Станичный С. В. Апвеллинги Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 4. С. 95–207. EDN BNEFX. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207>
16. 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 WLBMXP.
17. Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И. Система сбора гидрометеорологической информации // *Системы контроля окружающей среды*. 2010. Вып. 13. С. 50–53.
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. <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>
19. Орехова Н. А., Корчёмкина Е. Н., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н. Изменчивость параметров карбонатной системы поверхностного слоя вод северной части Черного моря в период «цветения» кокколитофорид // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2025. № 3. С. 25–40. EDN VCOCEY.
20. Maier M.-S., Canning A. R., Brennwald M. S., Teodoru C. R. et al. Spatial mapping of dissolved gases in the Danube Delta reveals intense plant-mediated gas transfer // *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. 838126. EDN KLRIBT. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.838126>

Поступила 24.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 10.03.2026 г.; принята к публикации 30.06.2026 г.; опубликована 30.09.2026 г.

Об авторах:

Лемешко Евгений Михайлович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4676-1940**, **SPIN-код: 3836-5786**, **ResearcherID: S-7815-2018**, evgeny.lemeshko@mhi-ras.ru

Цыганова Марина Владимировна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-2398-1756**, **SPIN-код: 2256-0620**, **ResearcherID: S-5426-2018**, m.tsyganova@mhi-ras.ru

Лемешко Егор Евгеньевич, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5612-000X**, **SPIN-код: 7313-4819**, **ResearcherID: C-5691-2016**, **Scopus Author ID: 57205681264**, e.lemeshko@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Лемешко Евгений Михайлович – концептуализация, выбор методов анализа данных, анализ результатов исследования, написание оригинального черновика, редактирование текста

Цыганова Марина Владимировна – отбор и обработка гидрохимических данных, анализ и визуализация результатов расчетов, проведение исследования, написание оригинального черновика

Лемешко Егор Евгеньевич – обработка данных реанализа, визуализация результатов, статистический анализ данных, проведение исследования, написание оригинального черновика

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.