

О.Г. Моисеенко, Н.А. Орехова

## Исследование механизма многолетней эволюции цикла углерода в экосистеме Севастопольской бухты

Проведен анализ компонентов карбонатной системы вод Севастопольской бухты и соотношения основных осадкообразующих веществ по данным экспедиционных исследований 1998 – 2008 гг. Отмечены межгодовые изменения общего неорганического углерода и равновесного парциального давления углекислого газа в воде. Показан рост потока углекислого газа в бухту и содержания органического углерода в донных осадках, предложено объяснение этим явлениям. Установлено приоритетное накопление органического углерода в осадках бухты. Дана оценка межгодовых изменений соотношений органического и неорганического углерода как показателя устойчивости цикла углерода.

**Ключевые слова:** цикл углерода, компоненты карбонатной системы, Севастопольская бухта.

Прибрежные акватории представляют собой зону взаимодействия суши, моря и атмосферы. Именно здесь наиболее интенсивно протекают основные биогеохимические процессы: образование первичной продукции, дыхание, трансформация органического углерода в неорганический, осаждение и захоронение углерода, взаимодействие и обмен веществом с сушей и атмосферой.

Биогеохимические циклы прибрежных экосистем в первую очередь испытывают возрастающую антропогенную нагрузку, особенно от огромного количества органического углерода и биогенных элементов, поступающих с материка. В пять раз по сравнению с доиндустриальной эпохой увеличилось количество азота, попадающего в воду в результате деятельности человека [1]. В работах [2, 3] показано, что в настоящее время поступление фосфора в океан примерно в два раза выше, чем в доиндустриальную эпоху. Увеличение более чем на 20% концентрации атмосферного диоксида углерода за последние 200 лет [4] также привело к трансформации цикла углерода в прибрежных акваториях: в прибрежных районах было отмечено уменьшение величин рН, также наблюдался значительный рост содержания растворенного диоксида углерода [3, 5 – 8].

Севастопольская бухта, выбранная объектом исследования, является ярким примером прибрежной акватории, подверженной постоянно усиливающемуся антропогенному воздействию на протяжении двух последних веков. Она представляет собой полузамкнутую акваторию эстуарного типа. Длина от входа до вершины бухты составляет ~ 7 км при максимальной ширине ~ 1 км и средней глубине 12 м. Площадь поверхности бухты 7,96 км<sup>2</sup>. После постройки в 1977 – 1978 гг. защитного мола ширина входа в бухту сузилась с 940 до 550 м, что повлекло за собой существенное изменение характеристик водообмена: в среднем за год он уменьшился на 40 – 70%, время «полного» обмена воды в бухте увеличилось почти вдвое [9].

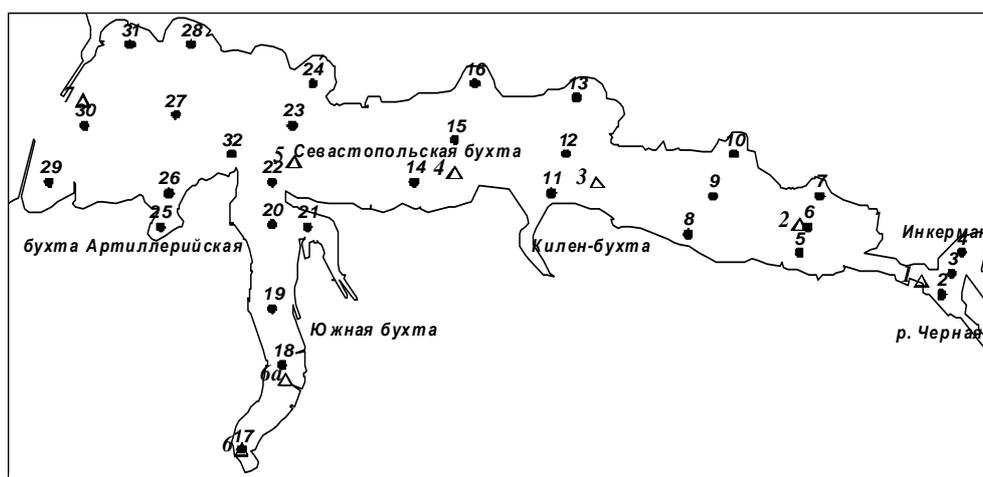
Состояние цикла углерода и его компонентов в Севастопольской бухте изучалось ранее рядом авторов [10 – 14], стоки и источники углекислого газа в ней обсуждались в наших собственных публикациях [15 – 17].

Цель данной работы – изучение многолетней динамики компонентов карбонатной системы вод, содержания органического и неорганического углерода в донных осадках Севастопольской бухты по данным исследований 1998 – 2008 гг., а также оценка возможности использования относительных показателей на основе данных об органическом и неорганическом углероде для прогноза устойчивости цикла углерода прибрежной зоны.

### Методы и материалы

В работе использованы и обобщены данные систематических натуральных измерений, проведенных в Севастопольской бухте в следующие периоды: июль 1998 г. – июль 2001 г., июль 2003 г. – январь 2005 г., октябрь 2006 г. – декабрь 2008 г.

Съемки проводились ежемесячно на разрезе вдоль оси бухты по единой схеме из 7 станций. Дополнительно в июле и октябре 2000 г., феврале, апреле и июле 2001 г., в апреле, июле, октябре 2004 г. и январе 2005 г. были выполнены квартальные съемки по более подробной схеме из 32 станций. С октября 2006 г. по декабрь 2008 г. проводились квартальные съемки по подробной схеме из 32 станций. Схемы ежемесячных и квартальных съемок приведены на рис. 1.



Р и с. 1. Схема станций в Севастопольской бухте в 1998 – 2008 гг.: ● – ежемесячные, Δ – ежеквартальные съемки

В пробах воды, отобранных с поверхности (0 – 1 м) и из придонного слоя, определяли температуру, соленость, величину рН, общую щелочность. Химический анализ проб проводили в соответствии с руководством [18].

Расчетным путем определены: двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ), ее парциальное давление ( $p\text{CO}_2$ ), концентрация карбонатных ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) и гидрокарбонатных

( $\text{HCO}_3^-$ ) ионов. Исходными данными для расчета элементов карбонатной системы служили общая щелочность и рН, которые измерялись в день отбора проб. Общая щелочность определялась методом прямого титрования 50 мл морской воды 0,02Н раствором соляной кислоты [18] с использованием высокоточной поршневой бюретки *Dosimat 765* (фирма *Metrohm*, Швейцария). Величину рН определяли с помощью иономера И-130М, применяя буферные растворы шкалы *NBS* [19]. Для расчета элементов карбонатной системы использовались константы угольной кислоты, рекомендованные ЮНЕСКО [20]. При этом предполагалось, что бор является консервативным элементом, а его содержание пропорционально солёности, в связи с чем оно рассчитывалось по солёности [21]. Зависимость констант диссоциации борной и угольной кислот от давления, а также влияние диссоциации воды, фосфорной, серной, плавиковой и других кислот, присутствующих в малых концентрациях в морской воде, на величину щелочности не учитывались.

Образцы донных осадков Севастопольской бухты были взяты в июле 2001 г. по ежеквартальной схеме станций, в октябре 2003 г., январе и апреле 2004 г. – по ежемесячной схеме, с июля 2004 г. – выборочно по ежеквартальной схеме станций, чтобы в течение года пробы были отобраны с каждой станции расширенной схемы. Пробы донных осадков были отобраны дночерпателем типа Петерсона с площадью захвата 0,025 м<sup>2</sup>. Исследованию подвергался верхний слой осадков (0 – 5 см). Органический углерод ( $C_{\text{орг}}$ ) определялся в воздушно-сухих осадках методом И.В. Тюрина в модификации Д.С. Орлова [22], содержание карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) – газометрическим методом [23].

### Результаты и обсуждение

Сумма молярных концентраций растворенных форм  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  представляет собой общий растворенный неорганический углерод:

$$T\text{CO}_2 = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}].$$

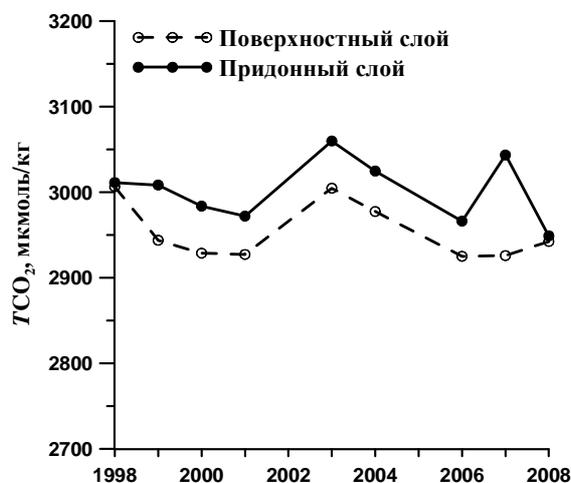
Поскольку этот параметр интегральный, его величина характеризует устойчивость карбонатных равновесий и соотношений между всеми компонентами карбонатной системы и является мерой происходящих в ней изменений.

На рис. 2 изображены изменения  $T\text{CO}_2$  в 1998 – 2008 гг. Очевидно, что концентрации  $T\text{CO}_2$  в придонном и поверхностном слоях довольно близки, и хотя в придонном слое значения  $T\text{CO}_2$ , как правило, были выше, чем в поверхностном, это превышение в среднем составило менее 2%. Устойчивой тенденции к росту или уменьшению концентрации  $T\text{CO}_2$  в водах бухты не выявлено.

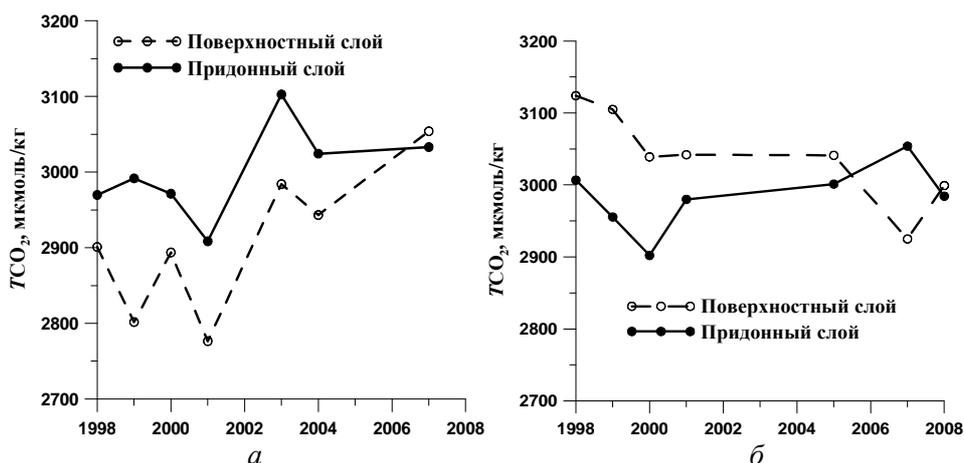
Несмотря на то что среднегодовая концентрация  $T\text{CO}_2$  не претерпела статистически значимых изменений в течение периода наблюдений, летом был отмечен ее рост как в придонном, так и в поверхностном слое (рис. 3, а). В придонном слое она была выше, чем в поверхностном, в течение почти всего периода наблюдений.

Что касается зимнего периода, концентрация  $T\text{CO}_2$  была, наоборот, преимущественно выше в поверхностном слое, чем в придонном, и за годы на-

блюдений она существенно не изменилась (рис. 3, б). Более того, если в летний период концентрация  $TCO_2$  в поверхностном слое за время наблюдений выросла с 2109 мкмоль/кг в 1998 г. до 3054 мкмоль/кг в 2008 г., то зимой она уменьшилась с 3124 мкмоль/кг в 1998 г. до 2999 мкмоль/кг в 2008 г.



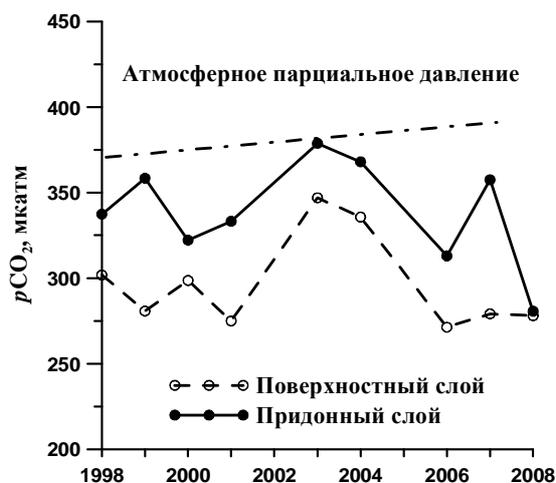
Р и с. 2. Многолетние изменения среднегодовых концентраций  $TCO_2$  в водах Севастопольской бухты



Р и с. 3. Многолетние изменения осредненных по сезонам концентраций  $TCO_2$  в водах Севастопольской бухты в летний (а) и зимний (б) период

Компонентом карбонатной системы, определяющим направление обмена углекислым газом между атмосферой и водой, является  $pCO_2$ , поэтому оно представляет собой самый репрезентативный параметр карбонатной системы вод, наиболее часто использующийся исследователями для иллюстрации состояния цикла углерода в водных бассейнах.

Проведенные исследования показали, что среднегодовые значения равновесного  $p\text{CO}_2$  в поверхностном и придонном слоях Севастопольской бухты, как правило, были ниже атмосферного парциального давления углекислого газа, значение которого в конце прошлого – начале настоящего столетия принято считать близким к 370 мкратм [4]; к 2009 г., по нашим данным, в районе Южного берега Крыма оно достигло 380 мкратм (рис. 4). До 2005 г. прослеживался устойчивый рост  $p\text{CO}_2$ , с 1998 г. по 2005 г. среднегодовое значение равновесного  $p\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод выросло на 50 мкратм. Однако в 2006 – 2008 гг. наблюдались колебания средних значений  $p\text{CO}_2$ , не позволяющие выявить тенденцию к росту (падению), что может быть связано не столько с объективной картиной изменения этого компонента карбонатной системы, сколько с переходом на более редкие, квартальные, экспедиционные исследования. Значения  $p\text{CO}_2$  в придонном слое были выше, чем в поверхностных водах, в среднем на 12% .

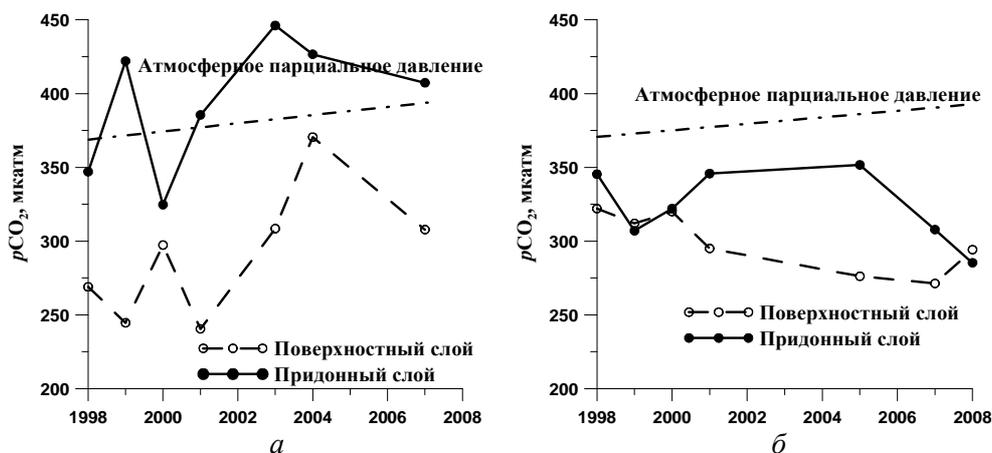


Р и с. 4. Многолетние изменения среднегодовых значений  $p\text{CO}_2$  в водах Севастопольской бухты

На рис. 5 приведены изменения равновесного  $p\text{CO}_2$  в летний и зимний сезоны. В летний период его значения в придонном слое в основном были выше атмосферного  $p\text{CO}_2$  (рис. 5, а) и равновесного  $p\text{CO}_2$  в поверхностном слое вод. Кроме того, для теплого времени года очевидна тенденция к росту равновесного  $p\text{CO}_2$  в поверхностном и придонном слоях бухты. В зимний период равновесное  $p\text{CO}_2$  было ниже, чем в атмосфере (рис. 5, б), как в поверхностном, так и в придонном слое. Аналогично летним значениям равновесное  $p\text{CO}_2$  в придонном слое зимой большей частью было выше, чем в поверхностном.

В поверхностном слое интенсивность фотосинтетической деятельности превышает интенсивность окисления органического углерода, что приводит к потреблению  $\text{CO}_2$  и уменьшению его концентрации. Повышенные значения  $p\text{CO}_2$  в придонном слое – результат интенсивного окисления органического вещества, как продуцированного в водах бухты, так и поступающего в нее

с коммунальными и ливневыми стоками. При этом фотосинтетическая активность фитобентоса либо отсутствует, либо существенно меньше интенсивности окисления органического углерода.



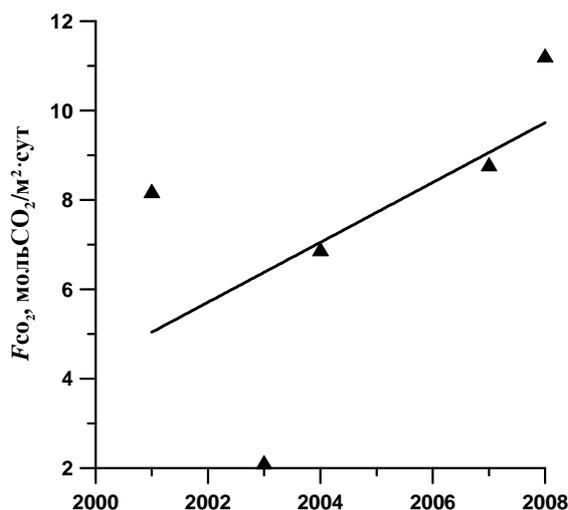
Р и с. 5. Многолетние изменения осредненных по сезонам значений  $p\text{CO}_2$  в водах Севастопольской бухты в летний (а) и зимний (б) период

Сезонные отличия значений равновесного  $p\text{CO}_2$  были гораздо ярче выражены в придонном слое, чем в поверхностном. Для придонного слоя эта разница составила в среднем более 160 мкатм, для поверхностного – всего 20 мкатм, что объясняется снижением образования органического вещества и соответственно – продукта его окисления в холодный период года.

Разница между парциальным давлением любого газа в атмосфере и его равновесным парциальным давлением в воде приводит к возникновению потоков газа между водой и атмосферой. Для количественной оценки интенсивности газового обмена через поверхность раздела вода – атмосфера использовалось полуэмпирическое уравнение, предложенное Ю.И. Ляхиным [24]:

$$F^{\text{CO}_2} = nv\alpha'^{m,\text{э}}\Delta p\text{CO}_2,$$

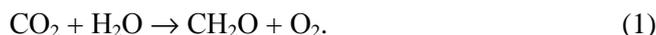
где  $\alpha'^m$  – коэффициент инвазии при  $\Delta p\text{CO}_2 = \Delta p\text{CO}_2 (\text{воздух}) - \Delta p\text{CO}_2 (\text{вода}) > 0$ ;  $\alpha'^{\text{э}}$  – коэффициент эвазии при  $\Delta p\text{CO}_2 = \Delta p\text{CO}_2 (\text{воздух}) - \Delta p\text{CO}_2 (\text{вода}) < 0$ ;  $nv$  – интегральный коэффициент, отражающий состояние поверхности моря (волны, пена, брызги) и показывающий, во сколько раз увеличивается скорость газового обмена при различных скоростях ветра над поверхностью моря по сравнению с идеальным штилем. Методика расчета  $\alpha'^{m,\text{э}}$  и  $nv$  приводится в работе [24]. Оценив направление и интенсивность потока  $\text{CO}_2$  по приведенной формуле, можно с уверенностью сказать, что в течение всего периода наблюдений бухта поглощала углекислый газ из атмосферы, за это время его значение существенно выросло: прирост потока  $\text{CO}_2$  к 2008 г. составил 37% от первоначального значения (рис. 6).



**Р и с. 6.** Изменение потока углекислого газа между водами Севастопольской бухты и атмосферой в 2001 – 2008 гг.

Таким образом, в отличие от большинства прибрежных акваторий Севастопольская бухта является стоком углекислого газа, причем потребление  $CO_2$  водами бухты имеет тенденцию к росту.

В биохимическом процессе углеродного цикла различают органическую и карбонатную составляющие цикла трансформации углекислого газа. Органическую составляющую можно отобразить следующей схемой реакции:



Такой процесс приводит к обогащению донных отложений органическим углеродом, а водная среда поглощает углекислый газ из атмосферы, являясь стоком для  $CO_2$ . Карбонатная составляющая описывается следующим уравнением:



В результате этой реакции продуцируются карбонат кальция и углекислый газ, что приводит к увеличению доли неорганического углерода в донных осадках и делает акваторию источником углекислого газа.

В зависимости от содержания в воде биогенных элементов, а также от освещенности водного бассейна преобладает одна из составляющих биогеохимического процесса цикла углерода морской среды, делая экосистему либо источником, либо стоком углекислого газа.

По данным работы [14] и результатам, полученным нами в 2003 – 2008 гг., было проанализировано изменение содержания органического углерода в донных осадках в 1991 – 2008 гг. Табл. 1 объективно отражает устойчивую тенденцию к росту концентрации  $C_{орг.}$ . Содержание  $CaCO_3$  в донных осадках исследовалось нами в 2003 – 2008 гг., результаты измерений приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

**Содержание органического углерода в поверхностном слое  
донных осадков Севастопольской бухты**

| Год  | Количество станций | C <sub>орг</sub> , % |                   |
|------|--------------------|----------------------|-------------------|
|      |                    | Среднее значение     | Пределы изменений |
| 1991 | 20                 | 3,06                 | 0,61 – 5,84       |
| 1994 | 22                 | 3,00                 | 1,56 – 6,64       |
| 2001 | 33                 | 4,38                 | 0,91 – 11,58      |
| 2003 | 7                  | 4,27                 | 0,20 – 10,2       |
| 2004 | 28                 | 3,36                 | 0,92 – 8,22       |
| 2006 | 23                 | 3,93                 | 0,75 – 6,03       |
| 2007 | 18                 | 4,13                 | 1,74 – 7,30       |
| 2008 | 24                 | 3,99                 | 0,31 – 7,09       |

Т а б л и ц а 2

**Содержание неорганического углерода в поверхностном слое  
донных осадков Севастопольской бухты**

| Год  | Количество станций | CaCO <sub>3</sub> , % |                   |
|------|--------------------|-----------------------|-------------------|
|      |                    | Среднее значение      | Пределы изменений |
| 2003 | 21                 | 29,2                  | 17,2 – 47,9       |
| 2004 | 12                 | 39,9                  | 18,9 – 49,7       |
| 2006 | 23                 | 34,8                  | 21,1 – 65,3       |
| 2007 | 13                 | 27,1                  | 15,9 – 38,4       |
| 2008 | 24                 | 26,9                  | 18,7 – 53,4       |

Учитывая непродолжительность наблюдений, по данным табл. 2 сложно однозначно сделать вывод, что увеличение концентрации C<sub>орг</sub> приводит к уменьшению содержания CaCO<sub>3</sub> в донных осадках, однако очевидно, что параллельного роста концентраций основных осадкообразующих веществ не происходит. То есть в системе взаимосвязанных процессов цикла углерода не увеличивается интенсивность производства конечных продуктов C<sub>орг</sub> и CaCO<sub>3</sub>, а, скорее всего, меняется их соотношение в результате преимущественного протекания реакций органической составляющей цикла углерода.

Для определения приоритета образования CaCO<sub>3</sub> или C<sub>орг</sub> нами использовалась относительная величина – «rain ratio parameter»  $\gamma$ , описанная в работе [4]:

$$\gamma = \text{CaCO}_3 / (\text{CaCO}_3 + \text{C}_{\text{орг}}).$$

Этот параметр изменяется от нуля до единицы. Если  $\gamma = 0$ , в донных осадках образуется только органическая форма углерода, а неорганическая не образуется вовсе. Если  $\gamma = 1$ , то образуется только CaCO<sub>3</sub>, а C<sub>орг</sub> не накапливается.

Рис. 7 иллюстрирует изменения параметра  $\gamma$  в 2003 – 2008 гг. Его значение, по результатам наших наблюдений, уменьшилось с 0,57 в 2003 г. до 0,46 в 2008 г., что свидетельствует о преимущественном образовании  $C_{\text{орг}}$  в донных осадках и его накоплении. Таким образом, в биохимическом процессе углеродного цикла преобладает органическая составляющая цикла трансформации углекислого газа (уравнение (1)), что делает бухту стоком  $\text{CO}_2$ .

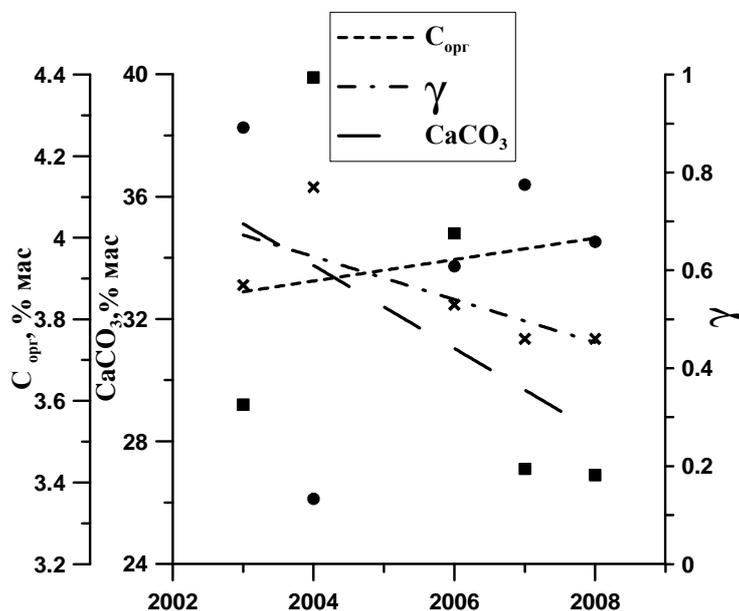
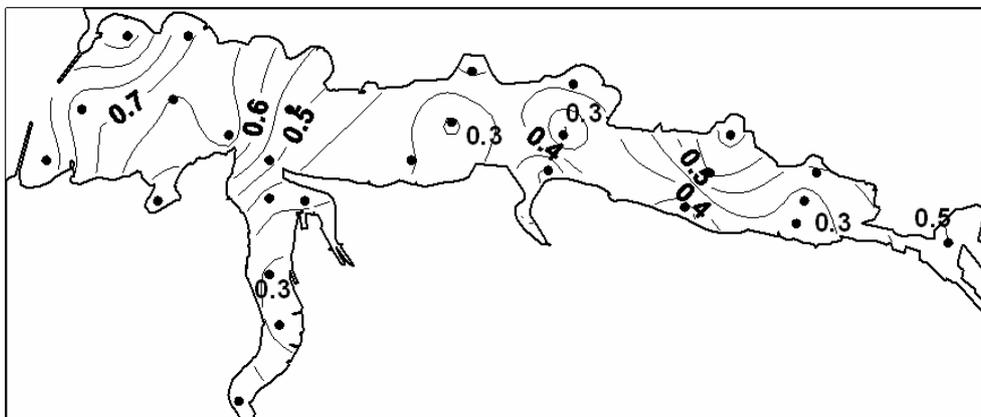
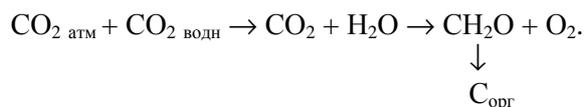


Рис. 7. Многолетние изменения параметра  $\gamma$ , среднегодовых концентраций  $C_{\text{орг}}$  и  $\text{CaCO}_3$  в донных осадках Севастопольской бухты

Среднее значение параметра  $\gamma$  для Севастопольской бухты равно 0,46, то есть в целом органический и неорганический углерод здесь накапливается в примерно равных долях. Однако анализ пространственного распределения параметра  $\gamma$  показал, что на большей части площади донных осадков бухты преобладает процесс накопления  $C_{\text{орг}}$  и только на выходе из нее идет процесс интенсивного накопления  $\text{CaCO}_3$ .

На рис. 8 приведено пространственное распределение параметра  $\gamma$  в донных осадках Севастопольской бухты. Отчетливо видно, что площади донных осадков, на которых преобладает накопление органического углерода, занимают большую часть бухты. Очевидно, углекислый газ, как продуцируемый в водах бухты, так и поступающий из атмосферы, при наличии значительного количества биогенных элементов расходуется на образование органического вещества при фотосинтезе. В условиях мелководности акватории и высокой скорости осадконакопления это приводит к отложению и накоплению органического вещества в донных осадках бухты.

Таким образом, концептуальную модель биохимической составляющей цикла углерода в Севастопольской бухте можно представить в виде следующей последовательности реакций:



**Р и с. 8.** Пространственное распределение параметра  $\gamma$  в верхнем слое донных осадков (0 – 5 см) Севастопольской бухты

Ранее в работе [25] для донных осадков Тихого океана было установлено, что между  $C_{\text{орг}}$  и интенсивностью сульфатредукции в большинстве случаев сохраняется прямая зависимость. Подобная закономерность, по мнению авторов, носит общий характер, она также присуща донным осадкам Севастопольской бухты. Отмеченные особенности состояния среды привели к формированию в поверхностном слое (0 – 5 см) обширной зоны восстановленных осадков (окислительно-восстановительный потенциал  $Eh$  равен +20 ... –130 мВ), что в свою очередь способствовало возникновению анаэробных условий и появлению восстановленных форм серы (сероводород, тиосульфаты и т. д.) в донных отложениях [26].

### Выводы

**1.** Придонный слой вод Севастопольской бухты по сравнению с поверхностным содержит более высокие концентрации общего растворенного неорганического углерода и характеризуется более высоким равновесным парциальным давлением углекислого газа, являясь его источником для поверхностного слоя.

**2.** В отличие от большинства бухт и эстуариев Севастопольская бухта поглощает  $\text{CO}_2$  из атмосферы, причем за годы наблюдений величина потока возросла.

**3.** Обогащение  $\text{CO}_2$  вод бухты в условиях поступления значительного количества биогенных элементов и хорошей освещенности бассейна способствует образованию органического вещества при фотосинтезе, что ведет к отложению и накоплению  $C_{\text{орг}}$  в донных осадках.

4. Большая часть площади поверхности дна занята осадками, в которых преобладает процесс накопления  $C_{орг}$ , и только на выходе из бухты идет процесс интенсивного накопления  $CaCO_3$ .

5. Одно из наиболее тревожных последствий установленной направленности процессов цикла углерода Севастопольской бухты – уменьшение водородного показателя и, как следствие, изменение окислительно-восстановительного потенциала донных осадков. Изменение  $Eh$  (переход окислительных условий среды в восстановительные) способствует протеканию процессов сульфатредукции, которые сопровождаются образованием сероводорода и анаэробных зон в придонном слое вод и верхнем слое донных отложений.

Авторы благодарят сотрудника отдела биогеохимии моря Д.С. Хоружего за предоставленные данные по атмосферному парциальному давлению  $CO_2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Катастрофическая ситуация в Мировом океане.* – <http://www.inopressa>.
2. *Савенко В.С.* Глобальный гидрологический цикл и геохимический баланс фосфора в океане // *Океанология.* – 2001. – 41, № 3. – С. 379 – 385.
3. *Волков И.И., Савенко В.С.* Обзор исследований по химии и геохимии океана, проводившихся по грантам РФФИ в 1999 г. – [www.rfbr.ru](http://www.rfbr.ru).
4. *Zeebe R.E., Wolf-Gladrow D.*  $CO_2$  in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes // *Elsev. Oceanogr. Ser.* – 2001. – 65. – 346 p.
5. *Bakker D.D.E., de Baar H.J.W., de Wilde Y.P.J.* Dissolved carbon dioxide in Dutch coastal waters // *Mar. Chem.* – 1996. – № 55. – P. 247 – 263.
6. *Frarkingouille M., Bourge I.* Atmospheric  $CO_2$  fluxes in a highly polluted estuary (the Scheldt) // *Limnol. and Oceanogr.* – 1996. – № 41. – P. 365 – 369.
7. *Kempe S.* Coastal seas: A net source or sink of atmospheric carbon dioxide? – Texel, Nederland: LOICZ, 1995. – 434 p.
8. *De Grandre M., Hammar T.R., Smith S.P. et al.* In situ measurements of seawater  $pCO_2$  // *Limnol. and Oceanogr.* – 1995. – № 40. – P. 969 – 975.
9. *Овсяный Е.И., Кемп Р.Б., Репетин Л.Н., Романов А.С.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998 – 1999 гг.) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – С. 79 – 103.
10. *Горбенко Ю.А.* Экология морских микроорганизмов перифитона. – Киев: Наук. думка, 1977. – 250 с.
11. *Куфтаркова Е.А.* Сезонный карбонатный цикл изменений компонентов карбонатной системы в Севастопольской бухте // *Экология моря.* – 1980. – Вып. 1. – С. 41 – 47.
12. *Мионов О.Г., Кирюхина Л.Н., Дивавин И.А.* Санитарно-биологические исследования в Черном море. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – С. 34 – 53.
13. *Мионов О.Г., Кирюхина Л.Н., Алёмов С.В.* Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – 185 с.
14. *Osadchaya T.S., Ovsyaniy E.I., Kemp R. et al.* Organic carbon and oil hydrocarbons in bottom sediments of the Sevastopol Bay (the Black Sea) // *Морской экологический журнал.* – 2003. – II, № 2. – С. 94 – 101.
15. *Игнатъева О.Г., Романов А.С., Овсяный Е.И. и др.* Сезонная динамика компонентов карбонатной системы в Севастопольской бухте // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 10. – С.130 – 140.

16. *Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н. и др.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. – Севастополь, 2006. – 90 с. (Препринт/НАН Украины. МГИ).
17. *Игнатъева О.Г., Овсяный Е.И., Романов А.С. и др.* Оценка состояния карбонатной системы вод и изменения содержания органического углерода в донных осадках Севастопольской бухты по данным наблюдений за 1998 – 2005 годы // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 2. – С. 57 – 68.
18. *Методы гидрохимических исследований океана.* – М.: Наука, 1978. – 271 с.
19. *Современные методы гидрохимических исследований океана.* – М.: ИО АН СССР, 1992. – 199 с.
20. *Unesco technical papers in marine science.* № 51. Thermodynamic of the carbon dioxide system in seawater. – Unesco, 1987. – P. 3 – 21.
21. *Millero F.J.* Chemical oceanography. – CRC Press, 1996. – 469 p.
22. *Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Практикум по химии гумуса. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 272 с.
23. *Соколов В.С., Соколова Е.Г.* Простой газометрический метод определения  $\text{CaCO}_3$  в экспедиционных условиях // Химический анализ морских осадков. – М.: Наука, 1980. – С. 42 – 46.
24. *Ляхин Ю.И., Александров В.П., Пальшин Н.И.* Расчет баланса обмена  $\text{CO}_2$  между океаном и атмосферой по акватории Атлантического, Индийского и Тихого океанов // Исследование и освоение Мирового океана. – Л.: Ленинградский гидрометеорологический институт, 1978. – Вып. 65. – С.48 – 60.
25. *Романкевич Е.А.* Органическое вещество донных осадков к востоку от Японии и его влияние на окислительно-восстановительные процессы // Биогеохимия диагенеза осадков океана. – М.: Наука, 1976. – С. 5 – 19.
26. *Орехова Н.А., Коновалов С.К.* Кислород и сероводород в донных осадках Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 18. – С. 48 – 56.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: stable2006@list.ru,  
naorekh-2004@mail.ru

Материал поступил  
в редакцию 25.01.10  
После доработки 04.03.10

**АНОТАЦІЯ** Проведено аналіз компонентів карбонатної системи вод Севастопольської бухти і співвідношення основних опадоутворювальних речовин за даними експедиційних досліджень 1998 – 2008 рр. Відмічені міжрічні зміни загального неорганічного вуглецю і рівноважного парціального тиску вуглекислого газу в бухті і вміст органічного вуглецю в донних осадах, дається пояснення цих явищ. Установлене пріоритетне накопичення органічного вуглецю в осадах бухти. Дана оцінка міжрічних змін співвідношень органічного і неорганічного вуглецю як показника стійкості циклу вуглецю.

**Ключові слова:** цикл вуглецю, компоненти карбонатної системи, Севастопольська бухта.

**ABSTRACT** Carbon system components of the Sevastopol bay and the balance between main sediment-forming substances are analyzed using the data of field investigations carried out in 1998 – 2008. Interannual variations of total inorganic carbon and equilibrium partial pressure of carbon dioxide in the bay water are noted. Increase of carbon dioxide flux in seawater and organic carbon content in bottom sediments is revealed. These phenomena are explained. Priority accumulation of organic carbon in the bottom sediments is revealed. Interannual variations of the relation between organic and inorganic carbon, as an index of carbon cycle stability, are estimated.

**Keywords:** carbon cycle, carbon system components, Sevastopol bay.

