

Д.С.Хоружий, Е.В.Медведев, О.Г.Моисеенко

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

**СООТНОШЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ
И НАПРАВЛЕНИЕ ПОТОКА CO_2 НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА
ВОДА-АТМОСФЕРА В ЗОНЕ АПВЕЛЛИНГА У БЕРЕГОВ КРЫМА
ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЕ (П. КАЦИВЕЛИ)**

На основании экспедиционных данных, полученных во время трех экспедиций 2012 г., рассматривается варьирование соотношения компонентов карбонатной системы в шельфовых водах Черного моря у берегов Крыма, а также направление потока углекислого газа на границе контакта моря с атмосферой. Анализируется зависимость этой величины от различных биогеохимических факторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *парциальное давление CO_2 , эвазия CO_2 , инвазия CO_2 , потоки CO_2 , прибрежные воды, шельфовая зона, апвеллинг.*

Изучение карбонатной системы морской воды и ее изменений на разных масштабах времени является одним из важных направлений исследований в современной океанологии. Значимость этого направления исследований морской среды обусловлена, в первую очередь, процессом газообмена, происходящего на границе контакта океана и атмосферы. Наблюдаемая в последние десятилетия устойчивая тенденция к повышению содержания углекислого газа в атмосфере Земли влечет за собой глобальные изменения планетарного масштаба. Для расчета последствий этих изменений необходимы количественные оценки вклада акваторий в процесс переноса CO_2 между атмосферой и гидросферой. Применительно к шельфовой зоне морей и океанов выполнение таких оценок является сложной задачей, что обусловлено разнородностью факторов, под действием которых происходит формирование гидрохимических характеристик прибрежных вод. Несмотря на сложность оценки и унификации гидрохимических характеристик вод шельфовой зоны, прибрежные воды являются важным элементом в системе глобального транспорта углерода, которым нельзя пренебрегать при выполнении глобальных расчетов. По существующим оценкам шельфовые воды составляют около 7 % от общей площади поверхности океанических бассейнов и лишь 0,5 % суммарного объема океанов. В то же время прибрежные воды отличаются высокой продуктивностью – на их долю приходится около 20 % первичной продукции океанического происхождения. [1].

Для открытых акваторий направление переноса CO_2 является относительно стабильным показателем, определяемым главным образом географической широтой рассматриваемой акватории, тогда как в случае прибрежных вод оно может существенно варьировать в пределах одного бассейна в течение сезона. Ключевая роль в поглощении CO_2 из атмосферы отводится шельфовым водам северной части Атлантического океана [2, 3].

Гидрохимические характеристики вод Черного моря отличаются от вод

океанов. В частности, соленость черноморских вод почти в 2 раза ниже, чем океанических вод, тогда как содержание растворенного неорганического углерода в водах Черного моря примерно в 1,5 раза превышает соответствующую величину для вод океанов [4].

В настоящей статье рассматривается динамика соотношений компонентов карбонатной системы в прибрежной зоне Черного моря и направление потоков углекислого газа на границе раздела вода – атмосфера, рассчитанных на основании экспериментальных данных, полученных в ходе трех экспедиций 2012 г. Методика измерений pCO_2 и TCO_2 детально описана в статье [5]. Измерение величины водородного показателя морской воды выполнялось потенциометрическим методом с использованием иономера И-160, оснащенного термокомпенсатором.

Результаты и их обсуждение. В ходе трех экспедиций, проводившихся в мае, октябре и ноябре 2012 г., выполнялись экспериментальные определения равновесного парциального давления углекислого газа в морской воде, общей щелочности (Alk), водородного показателя (рН), а также измерения концентрации растворенного неорганического углерода. На основании полученных экспериментальных данных был выполнен расчет компонентов карбонатной системы с использованием в качестве исходных данных результатов определений рН и общей щелочности. Расчет выполнялся с использованием констант, рекомендованных в работе [6]. Результаты расчета компонентов карбонатной системы представлены в табл.1.

Результаты, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что наибольшая амплитуда колебаний значений фугитивности CO_2 наблюдалась в мае на фоне интенсивного апвеллинга – подъема холодных вод более глубоких слоев к поверхности.

Явление апвеллингов достаточно широко освещено в научной литературе, что объясняется его значением для хозяйственной деятельности человека [7]. В результате подъема холодных вод происходит быстрое понижение температуры поверхностных вод на 5 – 12 °С. Продолжительность апвел-

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета компонентов карбонатной системы в поверхностном слое воды и парциальное давление углекислого газа в атмосфере.

		$[CO_2]$, мкмоль/кг	HCO_3^- , мкмоль/кг	CO_3^{2-} , мкмоль/кг	fCO_2 , мккк	pCO_2 , мккк (атмосфера)
май	минимум	12,4	2573,2	201,7	402,6	384,6
	максимум	18,2	2795,5	293,9	465,1	402,6
	среднее	15,5	2704,5	238,9	438,4	391,7
октябрь	минимум	8,8	2418,6	349,3	380,7	389,3
	максимум	10,1	2489,6	381,3	425,1	400,4
	среднее	9,4	2458,1	368,4	406,2	395,0
ноябрь	минимум	9,9	2541,4	304,0	336,0	383,2
	максимум	11,4	2612,4	335,9	350,1	393,9
	среднее	10,6	2573,9	320,1	341,2	390,2

лингов варьирует от нескольких суток до десятков суток. Наряду с понижением температуры воды, следствием апвеллинга является вынос в поверхностный слой больших количеств соединений биогенных элементов, что, в свою очередь, способствует повышению первичной продуктивности деятельного слоя моря. Увеличение фотосинтетической ассимиляции неорганического углерода приводит к смещению равновесия между компонентами карбонатной системы.

Поглощение углекислого газа океаном происходит благодаря существованию градиента (ΔpCO_2) между атмосферой и поверхностным слоем морской воды. Повышение равновесного pCO_2 в морской воде приводит к уменьшению этого градиента, и, следовательно, к снижению скорости потока CO_2 из атмосферы в океан. В последнее время отмечается более быстрый рост величины равновесного парциального давления углекислого газа в поверхностных водах Атлантического океана по сравнению с повышением его содержания в атмосфере [1, 3].

Согласно результатам измерений, несмотря на вызванные апвеллингом существенные колебания равновесной fCO_2 в морской воде, эта величина оставалась выше, чем pCO_2 в атмосфере. Другой особенностью этой съемки стали более высокие концентрации растворенного неорганического углерода по сравнению с данными, полученными осенью.

Для количественной оценки потока CO_2 было использовано полуэмпирическое уравнение (1) предложенное Ю.И.Ляхиным [8]:

$$F^{CO_2} = n_v \cdot \alpha'_{и,э} \cdot \Delta pCO_2, \quad (1)$$

где $\alpha'_и$ – коэффициент инвазии при $\Delta P_{CO_2} = P_{CO_2}(\text{воздух}) - P_{CO_2}(\text{вода}) > 0$, $\alpha'_э$ – коэффициент эвазии при $\Delta P_{CO_2} = P_{CO_2}(\text{воздух}) - P_{CO_2}(\text{вода}) < 0$, n_v – 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 $\alpha'_{и,э}$ и n_v приводится в работе [8]. Осенью преобладал процесс инвазии весь период наблюдения, кроме последних суток и 6 октября 2012 г. в 7:46.

Таблица 2. Потоки CO_2 между морем и атмосферой.

величина потока CO_2 , моль CO_2/m^2 ×сутки	май	ок- тябрь
минимум	0,52	- 2,73
максимум	7,39	2,94
среднее	2,33	0,46

Суточных закономерностей в изменении величины и направлении потока отмечено не было. Весной в течение всей съемки наблюдалась эвазия CO_2 . Величина потока так же не имела ярко выраженной зависимости от времени суток.

Выводы. Очевидно, что компоненты карбонатной системы являются чувствительным индикатором изменений гидрологической и метеорологической обстановки. Выявление закономерностей таких изменений требуют более длительного и систематического мониторинга.

Результаты, полученные во время апвеллинга, свидетельствуют о том, что температура морской воды является одним из важных, но не единствен-

ным фактором, определяющим направление потоков CO_2 между морем и атмосферой.

Отмеченные сезонные изменения в направлении потоков CO_2 могут свидетельствовать о неоднозначности влияния биоты на формирование этих потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borges A.* Do We Have Enough Pieces of the Jigsaw to Integrate CO_2 Fluxes in the Coastal Ocean? // *Estuaries*.– 2005.– v.28, № 1.– P.3-27.
2. *Thomas H., et al.* Rapid decline of the CO_2 buffering capacity in the North Sea and implications for the North Atlantic Ocean // *Global Biogeochem. Cycles*.– 2006.– 21.– GB4001.– doi:10.1029/2006GB002825.
3. *Frankignoulle M., Borges A.* European continental shelf as significant sink for atmospherically carbon dioxide // *Global Biogeochem. Cycles*.– 2001.– v.15, issue 3.– P.569-576.
4. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– 212 с.
5. *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.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.23.– С.260-272.
6. *Millero F.J.* The Marine Inorganic Carbon Cycle // *Chemical Reviews*.– 2007.– V.107, № 2.– P.308-341.
7. *Alvarez M., Fernandez E., Perez F.F.* Air-sea CO_2 fluxes in a coastal embayment affected by upwelling: physical versus biological control // *Oceanologica Acta*.– 1999.– v.22, № 5.– P.499-515.
8. *Ляхин Ю.И., Александров В.П., Пальшин Н.И.* Расчет баланса обмена CO_2 между океаном и атмосферой по акватории Атлантического, Индийского и Тихого океанов // Исследование и освоение мирового океана.– 1978.– вып.65.– С.48-60.

Материал поступил в редакцию 09.06.2013 г.

АНОТАЦІЯ На підставі експедиційних даних, отриманих під час трьох експедицій 2012 р., розглядається варіювання співвідношення компонентів карбонатної системи в шельфових водах Чорного моря біля берегів Криму, а також напрям потоку вуглекислого газу на межі контакту моря з атмосферою. Аналізується залежність цієї величини від різних біогеохімічних чинників.

ABSTRACT On the basis of expeditionary data, got during three expeditions 2012, varying of correlation of components of the carbonate system in shelf waters of the Black sea at coast of Crimea, and also streamline of carbon dioxide on the border of contact of sea with an atmosphere is examined. Dependence of this size on different biogeochemical factors is analysed.