

УДК 543.37

КАРБОНАТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД АНАДЫРСКОГО ЗАЛИВА

И. И. Пипко^{1,*}, С. П. Пугач¹, Н. И. Савельева¹, В. А. Лучин¹, О. В. Дударев^{1,2},
академик РАН В. И. Сергиенко³, член-корреспондент РАН И. П. Семилетов^{1,2}

Поступило 01.03.2019 г.

Представлены первые натурные данные, характеризующие динамику карбонатной системы, уровень коррозионности вод по отношению к арагониту и потоки CO_2 в системе океан—атмосфера в Анадырском заливе в позднесенний сезон. Установлено, что в этот период воды залива поглощали углекислый газ из атмосферы со скоростью $-22,5 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, что определяло “классический” механизм подкисления вод за счёт абсорбции избыточного атмосферного CO_2 . В целом в водах залива степень насыщения поверхностных вод арагонитом существенно превышала равновесный уровень. Исключение составляла высокодинамичная область Анадырского пролива, где вертикальное распределение исследуемых параметров было однородным, поверхностные воды были близки к равновесному состоянию по отношению к арагониту, а поток CO_2 был направлен в атмосферу. Придонные воды залива, напротив, характеризовались значительной сезонной коррозионностью благодаря реминерализации органического вещества. Показано, что в позднесенний сезон с водами Наваринского течения в бассейн Чирикова и далее в Северный Ледовитый океан поступали относительно солёные и кислые, квазиравновесные по отношению к арагониту и обеднённые кислородом воды с высоким содержанием биогенных элементов и CO_2 .

Ключевые слова: карбонатная химия морской воды, углекислый газ, асидификация, арагонит, климат, взаимодействие в системе океан—атмосфера, Арктика, Субарктика.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873328-332>

Происходящие в Арктике быстрые климатические изменения охватывают широкий спектр природных процессов [1]. Небольшие изменения в пуле морского углерода, в частности в содержании растворённого неорганического углерода, способны оказать значительное влияние на динамику карбонатной системы вод и потоков углекислого газа CO_2 между океаном и атмосферой, которые, в свою очередь, способны обусловить дальнейшие изменения климата. Знание региональных процессов, отвечающих за изменчивость карбонатных характеристик в районе тихоокеанской Арктики/Субарктики, позволит уточнить оценки и выполнить прогнозы динамики углеродного цикла в Северном Ледовитом океане (СЛО).

Берингово море (БМ) — окраинное море, отделяющее СЛО от открытых акваторий Тихого океана, своего рода “последний рубеж” транзита тихоокеанских вод в Арктику. На акватории БМ происходит трансформация этих вод, и наиболее интенсивно

они модифицируются на широком беринговоморском шельфе, динамичной и контрастной зоне, где на небольших глубинах взаимодействуют воды различного происхождения — от материковых до океанических и где ярко проявляется весь спектр природных процессов, формирующих их гидрологический и биогеохимический режим. Трансформированные тихоокеанские воды, поступая в СЛО через Берингов пролив, активно влияют на ледовитость, гидрохимическое состояние, термохалинную циркуляцию Чукотского моря и поддерживают на высочайшем в Мировом океане уровень его продуктивности [2–4].

Восточная (американская) часть БМ подробно изучена, достаточно полно описаны её гидрологический, биологический и гидрохимический режимы ([5] и др.), включая динамику карбонатной системы (КС) вод ([3, 4] и др.). Российская часть моря исследована в значительно меньшей степени. Широко известна работа В. Н. Иваненкова [6], обобщающая тридцатилетние гидрохимические исследования вод БМ. Среди современных публикаций только небольшая часть посвящена изучению карбонатных параметров западной части моря, и лишь в двух из них [7, 8] на основе экспедиционных данных анализируется динамика КС вод одного из крупнейших и высокопродуктивных заливов БМ — Анадырского залива (АЗ).

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет

³ Институт химии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

*E-mail: Irina@poi.dvo.ru

Основная цель исследования — определить современные карбонатные характеристики вод АЗ, где формируется наиболее солёная и продуктивная ветвь берингоморских вод, поступающих в Арктику, выявить главные процессы и факторы, контролирующие динамику КС, степень асидификации вод и потоки CO_2 в системе океан—атмосфера в этом малоизученном районе и оценить уровень коррозионности трансформированных тихоокеанских вод, поступающих на арктический шельф с западной части БМ.

Анадырский залив характеризуется сложным гидрологическим режимом, формирующимся под влиянием притока тёплых тихоокеанских вод, речного стока, а также интенсивного льдообразования в зимний сезон. Основным источником материковых вод — река Анадырь, чей среднегодовой сток превышает 60 км^3 , что составляет около 20% от всего речного стока в берингоморский бассейн. Относительно тёплые воды Наваринского течения, примерно по 50-метровой изобате огибающего залив [9], создают в заливе устойчивую антициклоническую циркуляцию. В зоне конвергенции Наваринского течения и стокового течения реки Анадырь в южной части залива образуется циклонический вихрь. Метеорологический режим изучаемого района формируется под влиянием нескольких центров действия атмосферы, и их сезонное положение определяет генеральную систему ветров [6, 10]. Из-за очень сильного охлаждающего воздействия материка

в зимний сезон в заливе формируются сложные ледовые условия; непосредственная близость суши определяет и более интенсивное ветровое воздействие на динамику границ льда, что обуславливает наиболее продолжительное наличие ледового покрова в заливе Креста, а также образование в АЗ крупнейшей и наиболее активной стационарной полыньи БМ [11].

Комплексные океанографические станции были выполнены в октябре 2011 г. на нис “Академик М. Лаврентьев” в водах Наваринского течения на разрезе от м. Наварин до м. Чукотский (рис. 1). На станциях определялись гидрологические и карбонатные (рН и общая щёлочность, A_T) параметры вод, а также содержание биогенных элементов (силикатов, фосфатов, неорганического азота), кислорода, окрашенного растворённого органического вещества (CDOM), хлорофилла-*a*, выполнялись попутные измерения метеорологических характеристик и содержания CO_2 в атмосфере, рассчитывались другие карбонатные параметры вод (парциальное давление CO_2 , $p\text{CO}_2$, содержание растворённого неорганического углерода, C_T , степень насыщения арагонитом, Ω_{Ar}), фракции смешивающихся вод и потоки CO_2 между океаном и атмосферой (используемые методы определения и расчётов приведены в [12]).

В период работ воды залива характеризовались двухслойной структурой — верхний квазиоднородный слой отделялся от придонных вод резким скач-

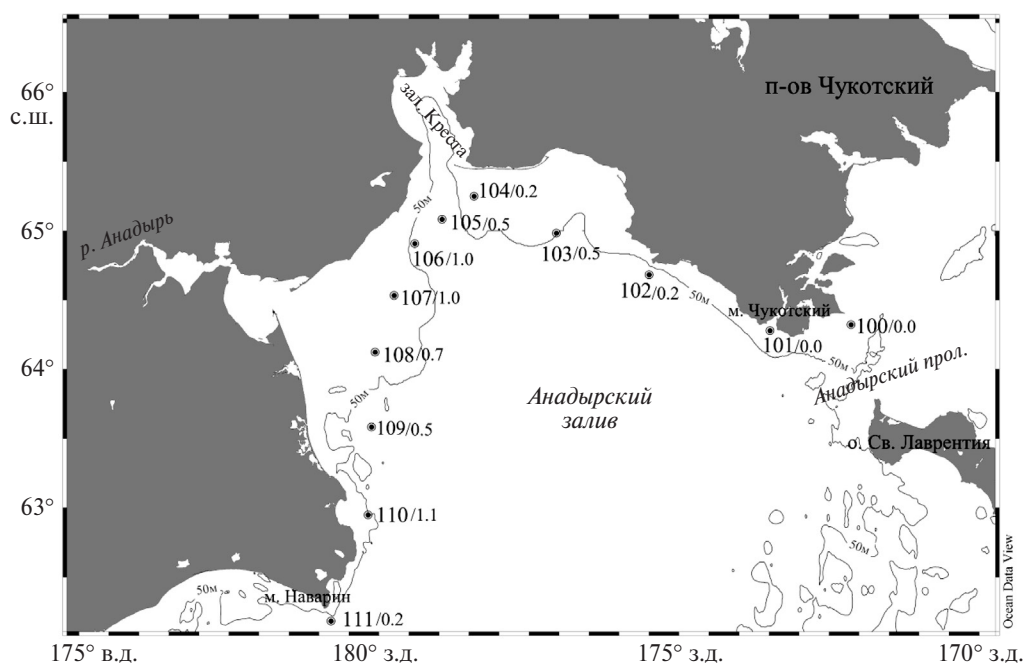


Рис. 1. Район работ, положение океанографических станций и градиент температуры в термоклине ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$) в октябре 2011 г.

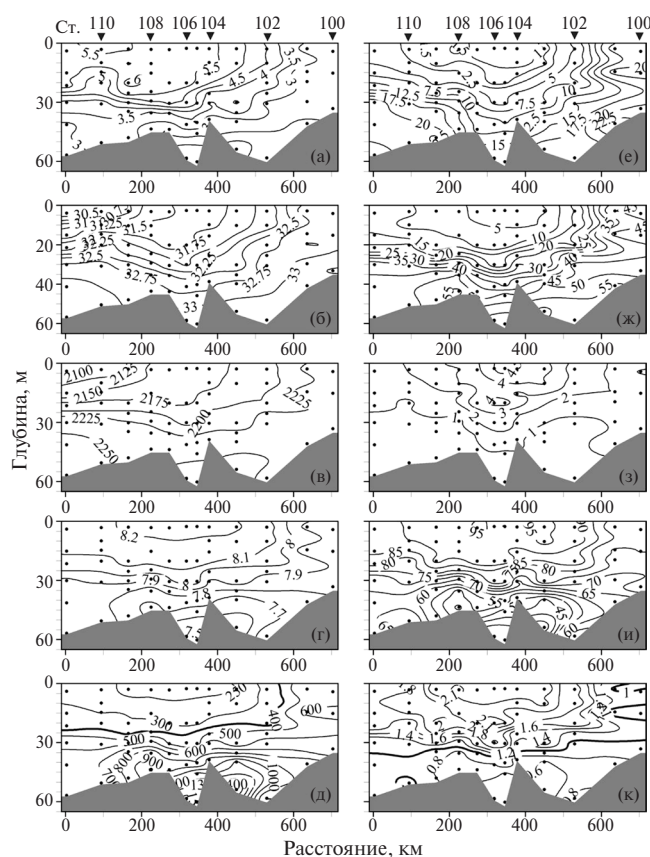


Рис. 2. Распределение температуры, °С (а), солёности, ‰ (б), общей щёлочности, мкмоль·кг⁻¹ (в), рН, ед. рН (г), парциального давления СО₂, мкатм (д), содержание нитратов, мкмоль·кг⁻¹ (е), силикатов, мкмоль·кг⁻¹ (ж), хлорофилла-а, мкг·кг⁻¹ (з), степени насыщения вод кислородом, % (и) и арагонитом (к) в водах Анадырского залива в октябре 2011 г. (положение станций показано на рис. 1).

ком термохалинных параметров (рис. 1, 2); на юге разреза дополнительно выделялся поверхностный слой вод пониженной солёности. На выходе из залива вблизи м. Чукотский и в Анадырском проливе за счёт интенсификации приливных и непериферических течений [9, 13] водный столб был квазигомогенным. Вертикальное распределение термохалинных характеристик свидетельствовало о начале развития процесса осенней конвекции в водах залива. Температура поверхностных вод на акватории залива изменялась от 4,7 до 6,1 °С со средним значением 5,5 °С; исключение составляли воды в Анадырском проливе, где в результате интенсивного перемешивания она снижалась до 2,4 °С (рис. 2). В целом 2011 г. для западной акватории моря можно отнести к тёплым [14]. Зимние воды залива Креста (с температурой, близкой к температуре заморозания морской воды), как и воды, формирующиеся в зимний сезон в районе Сирениковской полыньи на северо-востоке Анадырского залива, на разрезе по тер-

мохалинным характеристикам идентифицированы не были. Тем не менее на северо-западных станциях вблизи залива Креста в придонном слое были выявлены наиболее плотные для исследуемой зоны воды (с условной плотностью 26,5–26,9 кг·м⁻³, минимальной температурой 1,48 °С и максимальной солёностью 33,24‰).

Концентрации карбонатных параметров на разрезе изменялись в широком диапазоне (рис. 2). В распределении поверхностных величин A_T (как и солёности) обнаружена тенденция их увеличения с юга на север. Значения этих параметров тесно коррелировали между собой ($r = 1,00$, $n = 12$); величина A_T участвующих в смешении материковых вод, полученная из уравнения линейной регрессии, составила 495 мкмоль·кг⁻¹. Линза распреснённых вод на юге залива, определяемая стоковым течением из Анадырского лимана, была выделена также по распределению нормализованной A_T и CDOM; рассчитанный по уравнениям массового баланса вклад материковых вод в поверхностном слое составил 11% (при среднем значении 4%).

Распределение других карбонатных характеристик (рН, pCO_2 , Ω_{Ar}) в поверхностном слое было более сложным (рис. 2), а корреляционные связи с солёностью — более слабыми. Выявленная связь pCO_2 с температурой была обратна существующей термодинамической зависимости (коэффициент корреляции составил $-0,95$), что свидетельствовало о значимой роли биогеохимических процессов, протекающих в водном столбе. Как и в летний сезон [7, 8], поверхностные воды в целом были недосыщены СО₂ относительно его содержания в атмосфере (рис. 2) со средним значением pCO_2 , равным 251,4 мкатм (или 313 мкатм, включая воды Анадырского пролива). Низкие концентрации биогенных элементов в фотическом слое (не только кремния, скорости регенерации которого достаточно низки, но и нитратного/нитритного азота, а также неорганического фосфора) и распределение хлорофилла-а свидетельствовали о локально протекающих процессах фотосинтеза. Пересыщение поверхностных вод СО₂ было обнаружено только на северо-востоке района исследований (ст. 100, 101), где скорости течений были максимальны, а стратификация вод ослаблена, что определяло интенсивные обменные процессы в водном столбе. Дополнительным фактором пересыщения могло быть вовлечение в процесс перемешивания остаточных зимних вод, сохранившихся вблизи ст. 101 (в котловине с перепадами глубин до 30 м относительно прилегающих участков). Это подтверждалось увеличением сред-

невзвешенных концентраций карбонатных параметров (A_T , C_T) и биогенных элементов на ст. 101 по сравнению с ближайшей ст. 102, а также снижением степени насыщения поверхностных вод кислородом до 76% (рис. 2). Воды АЗ поглощали CO_2 со средней скоростью $-22,5 \pm 21,0$ ммоль·м⁻²·сут⁻¹ (без учёта перемешанных вод пролива); максимальные скорости абсорбции составляли $-68,0$ ммоль·м⁻²·сут⁻¹, что определялось как наибольшей разницей $p\text{CO}_2$ между водой и атмосферой, так и высокими скоростями ветра (рис. 2, 3).

Степень насыщения поверхностных вод залива арагонитом (Ω_{Ar}) существенно превышала равновесное ($\Omega_{Ar} = 1$) значение (рис. 2), что являлось фактором, благоприятным для формирования и осаждения карбонатов. Максимальные величины Ω_{Ar} (до 2,24) отмечались в хорошо стратифицированных продуктивных водах центральной части разреза, где содержание хлорофилла-*a* было повышенным, а значения $p\text{CO}_2$ — минимальными (рис. 2). Взаимодействие вод Наваринского течения со стоковым течением из Анадырского лимана определяло снижение Ω_{Ar} на юге разреза, но минимальные значения были обнаружены в районе Анадырского пролива (ст. 100, 101), где был значим вклад придонных вод, обогащённых CO_2 .

В придонном слое наблюдалась обратная картина — наиболее кислые и коррозионные воды были идентифицированы в зоне влияния вод залива Креста, а максимальные величины Ω_{Ar} и pH соответствовали водам Берингоморского склонового течения, поступающим в залив с юга и дающим начало Наваринскому течению. Компенсационный горизонт для величин Ω_{Ar} ($\Omega_{Ar} = 1$) располагался

на глубине 30–35 м, пересыщенные CO_2 коррозионные воды занимали почти треть водной толщи. Таким образом, основными факторами, модифицирующими карбонатные характеристики поверхностных вод Наваринского течения, являлись влияние речных вод (на юге района), происходящие в фотическом слое продукционные процессы (в центральной части разреза) и турбулентное перемешивание, интенсифицирующее обменные процессы, на севере залива. Последний фактор оказывал наиболее экстремальное воздействие, обуславливая как обогащение поверхностных вод CO_2 и результирующую перемену направления потока CO_2 в системе океан—атмосфера, так и слабое недосыщение поверхностных вод арагонитом (рис. 2, 3). В придонном слое основным контролирующим процессом было разложение органического вещества, как произведённого *in situ*, так и поступающего с относительно холодными, солёными и плотными водами из залива Креста, что определяло низкие величины pH, степени насыщения вод кислородом и арагонитом, а также высокие значения $p\text{CO}_2$ (рис. 2).

В результате исследований представлены первые натурные данные, характеризующие динамику КС, уровень коррозионности вод по отношению к арагониту и потоки CO_2 в системе океан—атмосфера в АЗ в позднесенний сезон. Установлено, что в этот период воды залива поглощали CO_2 из атмосферы со скоростью $-22,5$ ммоль·м⁻²·сут⁻¹, что определяло “классический” механизм подкисления вод за счёт абсорбции избыточного атмосферного CO_2 ; в целом в поверхностном слое Ω_{Ar} существенно превышала равновесный уровень. Но на выходе из залива (в районе Анадырского пролива), где водный столб был квазиоднородным, поверхностные величины Ω_{Ar} были близки к равновесным, а поток CO_2 был направлен в атмосферу. Придонные воды залива, напротив, характеризовались значительной коррозионностью — величины Ω_{Ar} опускались до значений 0,4; верхняя граница недосыщенного арагонитом слоя находилась на глубине 30–35 м. В результате в позднесенний сезон с водами Наваринского течения в арктический бассейн поступали относительно солёные, кислые, близкие к равновесию по отношению к арагониту и обеднённые кислородом воды с высоким содержанием биогенных элементов и углекислого газа (табл. 1). Полученные результаты существенно дополняют современное понимание динамики КС вод западной части БМ и могут быть полезны для верификации прогнозных моделей, построенных для всей акватории БМ, позволяя учесть как влияние различного вероятностного развития термических процессов в западной

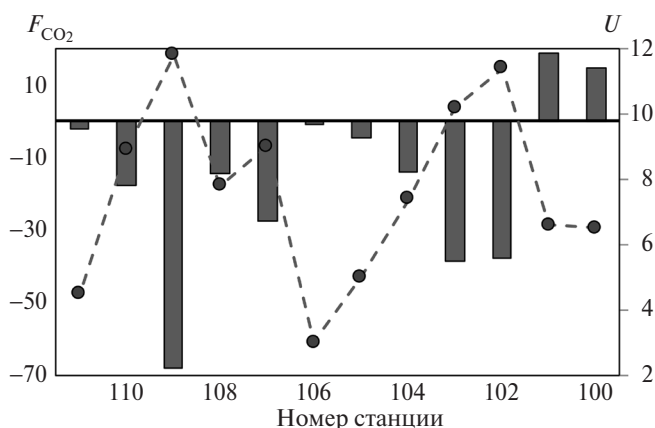


Рис. 3. Распределение среднечасовой скорости ветра U , м·с⁻¹ (пунктирная линия), и величин потоков CO_2 в системе океан—атмосфера F_{CO_2} , ммоль·м⁻²·сут⁻¹, отрицательные значения соответствуют потоку CO_2 в воду.

Таблица 1. Средние величины гидрохимических характеристик водного столба на станциях 100 и 101

A_T , мкмоль·кг ⁻¹	pH _T , ед. pH	pCO ₂ , мккатм	Ω_{Ar}	C_T , мкмоль·кг ⁻¹	O ₂ , %	NO ₃ ⁻ , мкмоль·кг ⁻¹	Si, мкмоль·кг ⁻¹
2237,8±6,0	7,83±0,1	666,4±102,1	0,92±0,1	2180,0±6,0	71,4±2,3	21,7±2,3	50,0±3,9

и восточной его частях [15], так и региональные особенности других факторов, формирующих динамику КС вод.

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 15–17–20032), аналитические исследования выполнялись на средства РФФИ (грант № 18–05–00559).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АМАР, 2018. АМАР Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (АМАР). Tromsø. 187 p.
2. Пипко И.И., Семилетов И.П., Пугач С.П. // ДАН. 2006. Т. 410. № 5. С. 679–683.
3. Bates N.R., Mathis J.T., Jeffries M.A. // Biogeoscience. 2011. V. 8. P. 1237–1253.
4. Mathis J.T., Cross J.N., Evans W., Doney S.C. // Oceanography. 2015. V. 28. № 2. P. 122–135.
5. Staben P.J., Danielson S.L., Kachel D.G., et al. // Deep-Sea Res. II. 2016. V. 134. P. 13–29.
6. Иваненков В.Н. Гидрохимия Берингова моря. М.: Наука, 1964. 139 с.
7. Андреев А.Г., Чен Ч.-Т.А., Середя Н.А. // Океанология. 2010. Т. 50. № 1. С. 43–55.
8. Аникиев В.В., Варлатый Е.П., Дударев О.В. и др. // Геохимия. 1996. № 12. С. 1220–1229.
9. Clement Kinney J., Maslowski W., Okkonen S. // Deep-Sea Res. II. 2009. V. 56. P. 1351–1362.
10. Khen G.V., Basyuk E.O., Vanin N.S., Matveev V.I. // Deep-Sea Res. II. 2013. V. 94. P. 106–120.
11. Stringer W.J., Groves J.E. // Arctic. 1991. V. 44. P. 164–171.
12. Pipko I.I., Pugach S.P., Semiletov I.P., et al. // Ocean Sci. 2017. V. 13. P. 997–1016.
13. Hu H., Wang J. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. C01006. DOI: 10.1029/2008JC005175.
14. Кузнецов М.Ю., Басюк Е.О., Чульчков Д.Н., Сыроваткин Е.В. // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 174. С. 104–124.
15. Luchin V.A., Semiletov I.P., Weller G.E. // Progress Oceanogr. 2002. V. 55. № 1/2. P. 23–44.

CARBONATE CHARACTERISTICS OF THE GULF OF ANADYR WATERS

I. I. Pipko¹, S. P. Pugach¹, N. I. Savelieva¹, V. A. Luchin¹, O. V. Dudarev^{1,2},
Academician or the RAS V. I. Sergienko³, Corresponding Member of the RAS I. P. Semiletov^{1,2}

¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation

²Tomsk Politechnic University, Tomsk, Russian Federation

³Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation

Received March 1, 2019

The first field data describing the dynamics of the carbonate system, aragonite saturation state, and CO₂ fluxes between the ocean and the atmosphere in the Gulf of Anadyr in the late autumn season are presented. It was established that during this period the gulf waters absorbed carbon dioxide from the atmosphere at a rate of $-22,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, which determined the “classical” mechanism of seawater acidification due to uptake of excess atmospheric CO₂. In general, surface waters of the gulf were supersaturated with respect to aragonite. The exception was the highly dynamic region of Anadyr Strait, where the vertical distribution of the investigated parameters was homogeneous, the surface waters were close to equilibrium with respect to aragonite, and CO₂ flux was directed to the atmosphere. Bottom waters of the gulf, in contrast, were characterized by significant seasonal corrosivity with respect to aragonite due primarily to remineralization of organic matter to CO₂. It was shown that during the late fall relatively salty and acidic, quasi-equilibrium with respect to aragonite, and oxygen-depleted waters with high concentrations of nutrients and CO₂ have been entered the Chirkov Basin and further the Arctic Ocean with the Navarin current.

Keywords: seawater carbonate chemistry, carbon dioxide, acidification, aragonite, climate, interaction in the ocean-atmosphere system, Arctic, Subarctic.