

УДК 551.465

**ПОТОК УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА ГРАНИЦЕ ВОДА–АТМОСФЕРА
В РАЙОНЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА В КАРСКОМ МОРЕ**

© 2021 г. А. А. Полухин¹*, М. В. Флинт¹, И. Б. Беликов², Г. В. Гусак³, У. А. Казакова⁴,
В. О. Муравья¹, Н. В. Панкратова², Ю. О. Пронина¹, А. И. Скороход²,
А. Л. Чульцова¹, А. С. Щука¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: polukhin@ocean.ru

Поступила в редакцию 28.05.2021 г.

После доработки 31.05.2021 г.

Принята к публикации 04.06.2021 г.

По результатам экспедиционных исследований 2020 г. в рамках программы “Экосистемы морей Сибирской Арктики” рассчитаны величины и направление потоков углекислого газа в области континентального склона на севере Карского моря (желоб Святой Анны). Подтверждено существование в этой области устойчивой фронтальной зоны, формируемой вдольсклоновым течением, которая ограничивает распространение опресненных речным стоком поверхностных вод на север. Синхронный анализ карбонатной системы в верхнем слое моря и концентрации CO_2 в приводной атмосфере позволил установить, что в области внешнего шельфа, находящегося под воздействием речного стока, и районе континентального склона, лежащем вне этого воздействия, поток углекислого газа направлен из атмосферы в воду со скоростью от 0.2 до 22 ммоль/ м^2 сут. Наибольшие скорости поглощения CO_2 поверхностным слоем моря отмечены над континентальным склоном. Локальные процессы в области склоновой фронтальной зоны определяют эмиссию углекислого газа в атмосферу со скоростью 0.34 ммоль/ м^2 сут.

Ключевые слова: Арктика, Карское море, континентальный склон, экосистема, баланс углекислого газа
DOI: 10.31857/S0030157421050117

ВВЕДЕНИЕ

Влияние двуокиси углерода на формирование климата Земли и на условия жизнедеятельности морских организмов вызывает повышенный интерес к изучению карбонатной системы вод океанов. Особое значение приобретают эти вопросы в связи с возрастающей эмиссией CO_2 в атмосферу в результате деятельности человека. Данные последних лет говорят о том, что рост содержания CO_2 в атмосфере начинает изменять карбонатное равновесие вод Мирового океана [17]. Большинство исследователей считает, что увеличение содержания атмосферной CO_2 в верхнем слое океана может привести и в некоторых районах уже приводит к изменениям химического состава вод, их закислению, что будет неблагоприятным или даже губительным для некоторых видов морских животных. С другой стороны, океан может играть существенную роль в цикле углекислого газа, по-

глощая его из атмосферы снижая последствия антропогенной эмиссии.

Для прогноза глобальной реакции атмосферы и гидросферы на увеличение содержания CO_2 в воздухе большое значение имеет вопрос о направлении и интенсивности обмена углекислым газом между океаном и атмосферой. В одних и тех же районах океана в зависимости от сезона, времени суток, гидрофизических и биологических процессов возможны разные по направлению потоки CO_2 в системе атмосфера–океан [22]. В настоящее время считается доказанным, что в целом поглощение углекислого газа океаном преобладает над его эмиссией [12]. Однако существуют большие расхождения в количественной оценке потоков CO_2 и в оценке вкладов отдельных океанов и крупных океанических регионов в общий глобальный баланс углекислотного обмена.

Текущие климатические изменения в наибольшей степени выражены в Арктике, и в Север-

ном Ледовитом океане (СЛО) можно ожидать наибольшую изменчивость карбонатной системы вод [10, 16, 21]. Чтобы понять сложное взаимодействие между основными факторами подкисления (ацидификации) океана в СЛО и его окраинных морях (рост атмосферного CO_2 , опреснение, терригенный сток) и их связь с текущими изменениями климата, необходимы представления о современном состоянии карбонатной системы вод арктических морей России и их различающихся по природным условиям акваторий.

Неорганические соединения углерода находятся в океане в виде угольной кислоты и ее производных. К ним относятся двуокись углерода CO_2 , угольная кислота H_2CO_3 , гидрокарбонатные HCO_3^- и карбонатные CO_3^{2-} ионы. Эти соединения тесно взаимосвязаны друг с другом и образуют карбонатную систему [1]. Вышедший в сентябре 2019 г. отчет Межгосударственной экспертной комиссии по изменению климата (МГЭИК, ИРСС) на основании 7000 научных публикаций показывает, какие последствия увеличения температуры воздуха и антропогенных выбросов диоксида углерода в атмосферу ожидают полярные регионы и их население [15]. Изменение показателей баланса CO_2 в системе атмосфера–океан имеет принципиальное значение для морских экосистем, так как их функционирование и, в первую очередь, состав фитопланктона и первичная продукция органического вещества напрямую связаны с содержанием разных форм углерода в воде.

Для Карского моря с помощью модельных расчетов [23] и анализа натуральных данных [20] показано, что изменчивость параметров карбонатной системы высокая, наблюдается понижение рН вод и их насыщение арагонитом, что является показателем процесса ацидификации. Установлено, что важным фактором этой изменчивости является динамика стока крупнейших Сибирских рек – Оби и Енисея [13, 20], однако направленность и интенсивность потока CO_2 на границе океан–атмосфера для разных по условиям районов Карского бассейна изучено недостаточно. Данное исследование представляется важным для понимания цикла неорганического углерода в арктических морях и его влияния на карбонатную систему вод и потоки на границе вода–атмосфера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные о гидрофизических и гидрохимических характеристиках вод получены в 81-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море по программе “Экосистемы морей Сибир-

ской Арктики”. В районе внешнего шельфа и континентального склона западного отрога желоба Святой Анны был выполнен (2–4 сентября 2020 г.) квазимеридиональный разрез из 9 гидрологических станций, на 6 из которых отобраны пробы для гидрохимического анализа (рис. 1). Температура и соленость измерены с помощью STD-зонда SBE19+. Параметры карбонатной системы морских вод (водородный показатель рН и общая щелочность, Та) определялись в пробах, отобранных с помощью комплекса Rosette на горизонтах, выбранных в зависимости от гидрологической структуры.

Показатели рН в пробах определялись потенциометрическим методом на приборе HANNA 2210 (США), Та – на полуавтоматическом титраторе TitroLine easy (Италия) с визуальным определением точки конца титрования по принятым в ИОРАН методикам [6], в соответствии с международной практикой [11]. Расчет содержания растворенной двуокиси углерода и производных (карбонат и бикарбонат-ионы), парциального давления углекислого газа, насыщенности кальцитом и арагонитом проводилось рН-Alk методом по термодинамическим уравнениям карбонатного равновесия в программе CO2sys [14]. Данные по содержанию углекислого газа в приводном слое атмосферы получены с помощью газоанализатора Picarro G2132-i (США); методика измерений описана в [19]. Расчет потока углекислого газа проводился по разнице парциального давления CO_2 ($p\text{CO}_2$) в воде и атмосфере с использованием измеренной в точке отбора проб скорости ветра по методике, описанной в [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный разрез охватывал область внешнего шельфа и континентального склона с глубинами от 200 до 500 м. Особенностью данной области является наличие мощной струи контурного течения, жестко привязанного к топографии склоновой области, ядро которого составляют теплые воды атлантического и баренцевоморского происхождения [3, 7]. Наличие течения определяло формирование склоновой фронтальной области, четко выраженной в полях температуры и солености [3, 7–9]. Полученные нами данные еще раз подтвердили эти особенностей циркуляции и структуры вод в области континентального склона желоба Св. Анны. Струя течения и склоновая фронтальная зона хорошо идентифицировались в полях температуры и солености в верхнем 50–100-метровом слое и были локализованы над верхней частью континентального склона (рис. 2, ст. 6885).

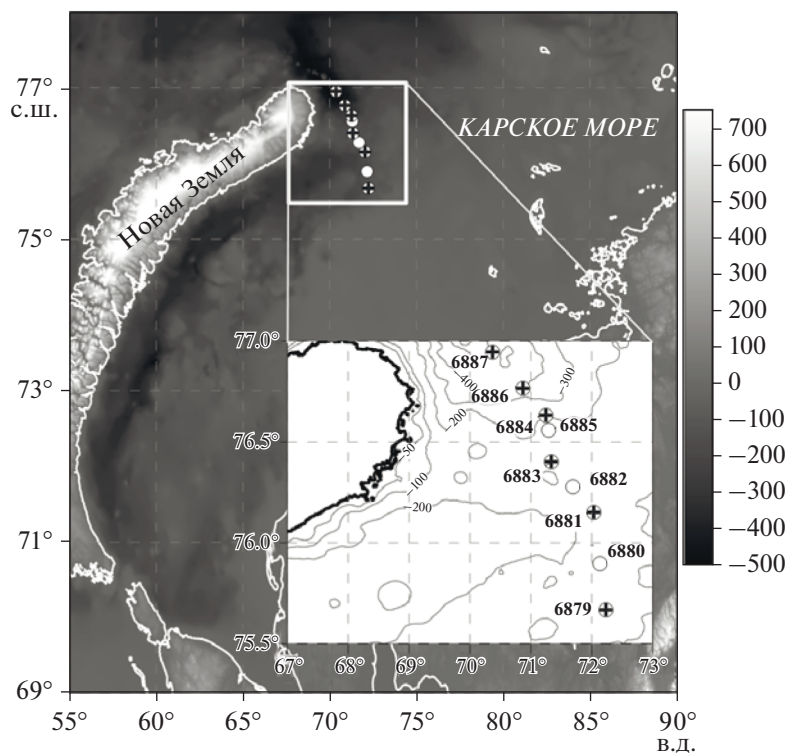


Рис. 1. Схема положения гидрологических станций (белые круги) и станций с отбором гидрохимических проб (кресты) в районе континентального склона в Карском море в ходе 81-го рейса "АМК".

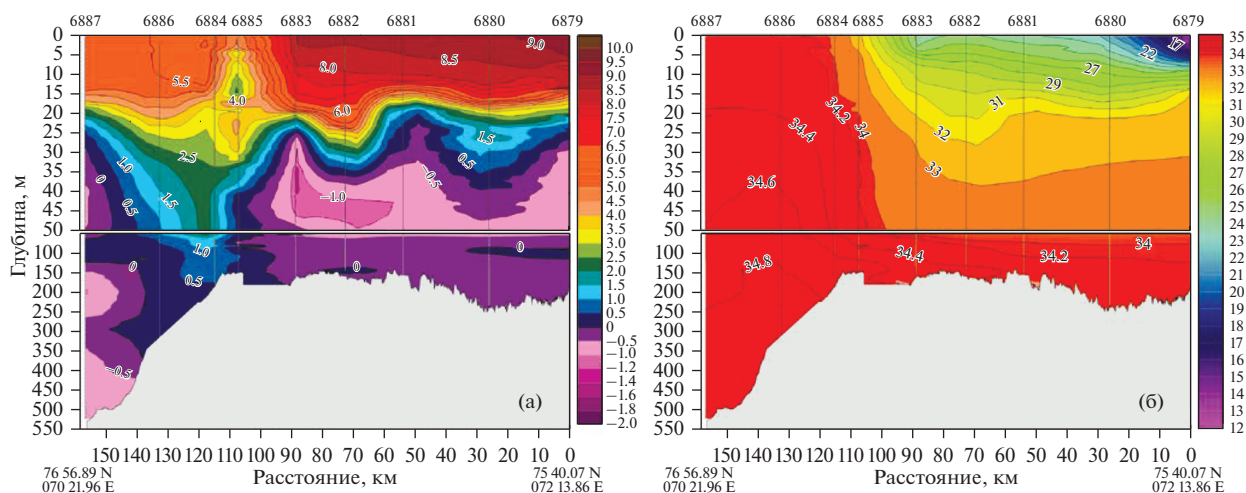


Рис. 2. Распределение температуры, °С (а), и солёности, епс (б), на разрезе в желобе Св. Анны в сентябре 2020 г.

Показатель удельной щёлочности (отношение общей щёлочности к солёности) является бесспорным маркером присутствия в водах Карского бассейна сигнала речного происхождения [5]. Изолиния показателя удельной щёлочности 0.07, указывающая на влияние речного стока в слое 0–20 м, прослеживается в южной части разреза

вплоть до северной периферии склоновой фронтальной зоны (ст. 6884, рис. 3).

Регрессионный анализ, проведенный по данным щёлочности и солёности в поверхностном слое разреза, показал следующую зависимость:

$$Y = 40.922350X + 854.79,$$

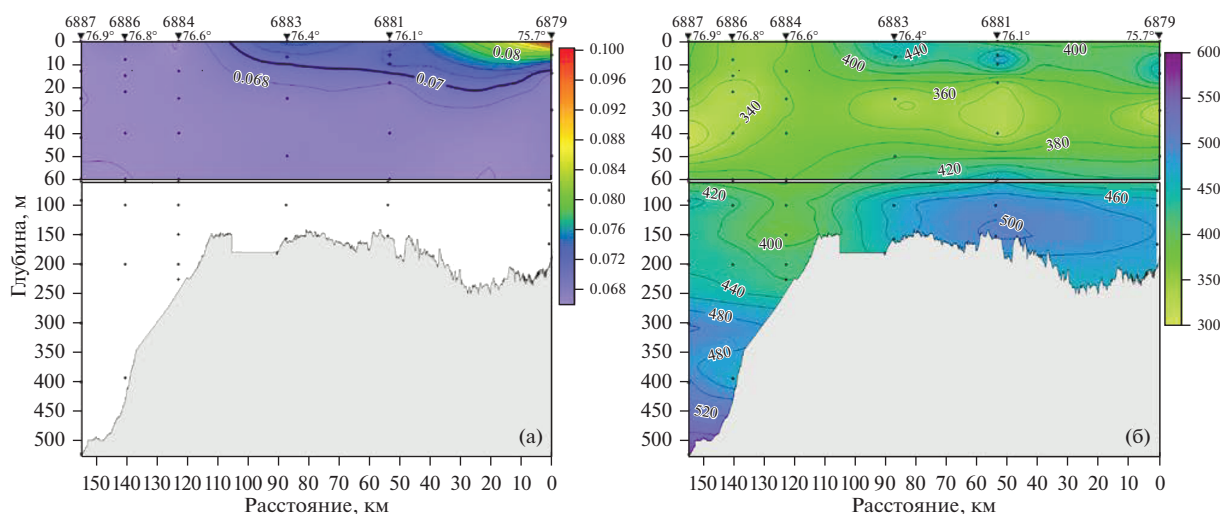


Рис. 3. Распределение удельной щелочности (а) и парциального давления CO_2 , ppm (б) на разрезе в желобе Св. Анны в сентябре 2020 г.

где Y – щелочность, X – соленость, свободный член в конце уравнения характеризует значение щелочности в начальной точке смешения, то есть в речной воде. Значение общей щелочности $854 \mu\text{M}$ характерно для вод р. Енисей в летний период [5]. Эти цифры и значение свободного члена в приведенном выше уравнении с высокой долей вероятности позволяют заключить, что опреснение исследованной акватории в период наших работ было результатом воздействия енисейского стока. Это не уникальная ситуация для Карского моря, воды енисейского происхождения ранее неоднократно наблюдались далеко к северу от источника [5]. Данный факт обусловлен мощным выбросом вод р. Енисей в период весеннего половодья и вкладом енисейских вод в формирование поверхностной опресненной “линзы” Карского моря, которая перемещается под воздействием преобладающих ветров, в том числе и в северном направлении [2, 18].

Распределение парциального давления CO_2 на разрезе связано с региональной гидрофизической структурой (рис. 2, 3б). В опресненном поверхностном слое на внешнем шельфе между станциями 6879 и 6883 $p\text{CO}_2$ было выше 400 ppm, что характерно для областей Карского моря, находящихся под воздействием речного стока [20]. На мористых станциях разреза (6884–6887) в верхнем деятельном слое 0–60 м $p\text{CO}_2$ составляло 252–353 ppm. Ниже 100 м и в придонном слое $p\text{CO}_2$ во всех районах, которые пересекал разрез, значительно превышало равновесное значение 400 ppm и достигало 500–600 ppm (рис. 3б). Эти высокие величины связаны с окислением поступающего из верхнего слоя органического вещества. Исключение представляла северная пери-

ферия фронтальной зоны над верхней частью континентального склона (ст. 6884, рис. 3б), где отмечено отсутствие выраженной вертикальной стратификации в распределении $p\text{CO}_2$ и заглубление изолинии 400 ppm практически до дна (180 м). Такой характер распределения $p\text{CO}_2$ подтверждает специфику локальных процессов, ассоциированных со склоновой фронтальной зоной.

Сезонный минимум концентрации CO_2 в Арктике отмечается в конце июня–начале августа, таким образом, период измерений над Карским морем практически совпал с годовым минимумом. Измеренные значения концентрации CO_2 менялись от 389 до 430 ppm при среднем 396 ppm. Повышенные значения CO_2 определялись выносом загрязненного воздуха с материка (долгосрочные максимумы) или влиянием дымовой трубы судна (короткопериодные, скачущие значения). На рис. 4 представлена ряды концентрации CO_2 с отфильтрованными эпизодами влияния дымовой трубы судна (~5% от общего числа измерений). Полученные в июле 2019 г. данные (76-й рейс АМК) показывают, что изменения $p\text{CO}_2$ имели минимум 380 ppm, что объясняется сезонностью изменчивости данной характеристики и общим ростом содержания углекислого газа в атмосфере. Кроме того, 2020 г. стал рекордно жарким в Арктике, в сибирской части температура превысила средние показатели за период 1981–2010 гг. на 4.3°C , в летний период отмечалась возросшая активность природных пожаров и, как следствие, увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере.

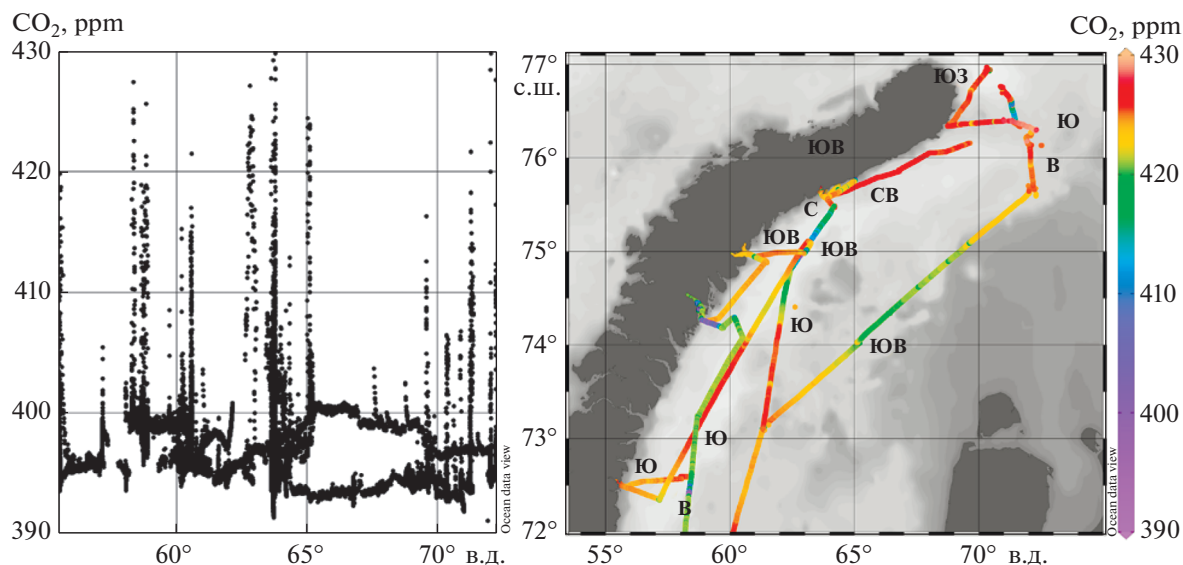


Рис. 4. Концентрация углекислого газа (ppm) в приводном слое атмосферы в исследованном районе Карского моря в сентябре 2020 г.

Для области континентального склона желоба Св. Анны, где наблюдался целый ряд специфических гидрофизических, гидрохимических и биологических явлений, и области внешнего шельфа были рассчитаны направление и скорость потока CO_2 на границе вода–атмосфера (рис. 5). Эти расчеты показали, что на 5 станциях разреза из 6 поток CO_2 был направлен из воздуха в воду, и его скорость составила 1 до 22 ммоль/м² сут. Наибольшие скорости поглощения CO_2 поверхностным слоем моря отмечены на северной периферии склоновой фронтальной зоны и над континентальным склоном (станции 6884, 6886 и 6887). В этой области отсутствовало влияние материкового стока и, как следствие, отсутствовала жесткая стратификация, ограничивающая вертикальное перемешивание. На фоне общей картины выделяется ст. 6883, где поток CO_2 (0.34 ммоль/м² сут) имел обратную направленность – из воды в атмосферу. Эта станция была выполнена у южной шельфовой периферии склоновой фронтальной зоны, ограничивающей распространение опресненных речным стоком вод на север (рис. 2, 3).

Рис. 6 иллюстрирует совместную пространственную изменчивость $p\text{CO}_2$ в атмосфере и верхнем слое моря на разрезе. В области внешнего шельфа, находящейся под воздействием речного опреснения (станции 6879–6883), при температуре поверхностного слоя моря 9–9.5°C, $p\text{CO}_2$ в воде изменялось от 340 до 415 ppm. Максимальные величины отмечены у южной периферии склоновой фронтальной зоны (ст. 6883), которая выделяется по относительно резкому снижению тем-

пературы верхнего слоя моря с 9 до 5–6°C (0.18°C/км). При этом $p\text{CO}_2$ в приводной атмосфере в этой части разреза незначительно варьировало около величины 395 ppm. В области фронтальной зоны (ст. 6884 и непосредственно прилегающая с юга акватория; рис. 2) наблюдалось увеличение $p\text{CO}_2$ в атмосфере до уровня 433 ppm. Севернее фронтальной зоны в области континен-

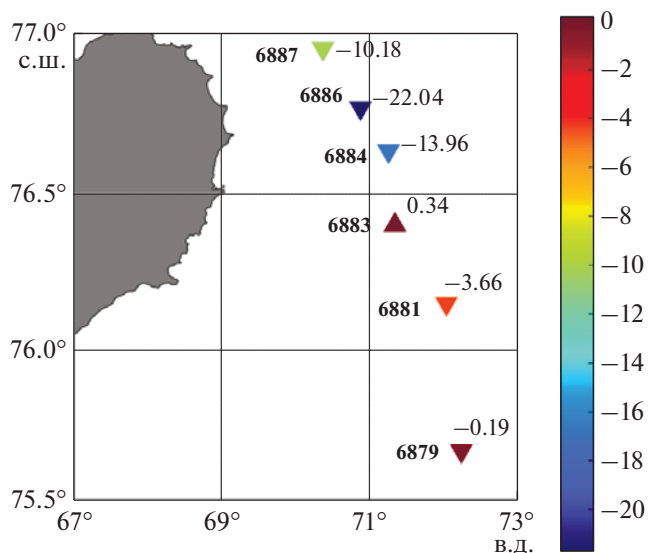


Рис. 5. Рассчитанный поток углекислого газа (ммоль/м² сут) на станциях разреза (цифры слева). Стрелки иллюстрируют направление, цифры справа – скорость потока; отрицательные значения указывают на направленность потока газа из атмосферы в воду.

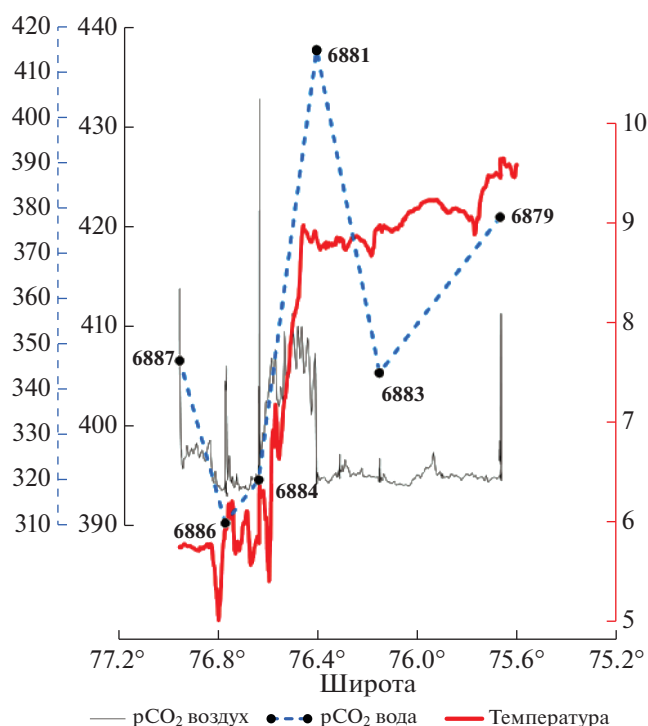


Рис. 6. Изменчивость температуры ($^{\circ}\text{C}$), парциального давления CO_2 (ppm) в поверхностном слое моря и в приводном слое атмосферы на разрезе через желоб Св. Анны.

тального склона при относительно низкой температуре поверхностного слоя моря pCO_2 в воде и в атмосфере понижается до величин 312–347 и 395 ppm соответственно.

Полученные результаты позволяют судить о происходящих в районе континентального склона процессах обмена углекислым газом в системе море–атмосфера и их связи с гидрофизической и гидрохимической структурой. Фронтальная зона над континентальным склоном желоба Св. Анны формируется в результате взаимодействия поверхностных шельфовых вод с пониженной (28–29 eps), благодаря воздействию материкового стока, соленостью с зимними водами Карского моря с отрицательной температурой, лежащими под пикногалоклином, и поступающими с севера трансформированными атлантическими водами с более высокой, чем в Карском море, поверхностной соленостью и более высокой температурой в ядре. Склоновая фронтальная зона желоба Св. Анны хорошо маркируется по распределению гидрохимических характеристик, например, нитратного и аммонийного азота [4], хлорофилла, фито- и зоопланктона [8, 9]. В наших исследованиях она выделяется по парциальному давлению CO_2 в водной толще и приводной атмосфере. Невысокие значения pCO_2 (относительно принятой

за равновесное 400 ppm) в верхнем слое моря над континентальным склоном (станции 6884, 6886 и 6887), вероятно, связаны с фотосинтетической активностью фитопланктона, на что указывают высокий уровень насыщения вод растворенным кислородом – выше 100% в слое 0–20 м. В этой области поток углекислого газа направлен из воздуха, где pCO_2 варьирует в пределах 395–430 ppm, в воду, где pCO_2 существенно ниже 311–346 ppm. В области внешнего шельфа, где поверхностный слой опреснен в результате действия речного стока (станции 6879 и 6881), pCO_2 в воде также ниже, чем в атмосфере: соответственно 378 и 344 и 394–396 ppm, что определяет поглощение углекислого газа поверхностным слоем моря. Ст. 6883 у южной периферии склоновой фронтальной выделяется по соотношению pCO_2 в поверхностном слое моря и приводной атмосфере. Соответствующие величины pCO_2 составляют 415 ppm в воде и 394 ppm в воздухе, что определяет направленность потока CO_2 из моря в атмосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы, происходящие в областях внешнего шельфа и континентального склона сибирских эпиконтинентальных морей, играют огромную роль в регулировании биогеохимического режима и потоков вещества, формировании биологической продукции. Эти процессы связаны с текущими климатическими трендами, поскольку именно в области арктического континентального склона в наибольшей степени проявляется современная тенденция уменьшения ледовитости и увеличения продолжительности безледного периода в Арктике.

Одной из важнейших характеристик потоков вещества в арктических природных системах является процессы обмена углекислым газом на границе атмосфера–море. В результате настоящих исследований стало очевидно, что на значительной по широтной протяженности акватории в области внешнего шельфа и континентального склона Карского моря в летний сезон происходит поступление CO_2 из атмосферы в поверхностный слой моря со скоростью от 0.2 до 22 ммоль/ m^2 сут. Далее происходит его перераспределение в толще воды благодаря вертикальной динамике и химико-биологическим процессам. Проведенные исследования показали, что природные системы отдельных районов арктических морей могут функционировать как активные акцепторы CO_2 из атмосферы. Увеличение поступления CO_2 в морскую воду ведет к смещению карбонатного равновесия в сторону увеличения содержания ионов

водорода, то есть к понижению рН морских вод с соответствующими последствиями для ряда компонентов морских экосистем, прежде всего фитопланктона [16]. Это медленный процесс, который в зависимости от комплекса внешних и внутренних факторов, может продолжаться десятки лет. Однако существенные климатические изменения в Арктическом регионе могут увеличить его скорость и обострить соответствующий отклик арктических экосистем. Совместные исследования содержания CO₂ в приводной атмосфере и карбонатной системы вод позволяют оценить потоки углекислого газа на границе атмосфера–море, роль арктических экосистем в поглощении CO₂ из атмосферы, пространственную и климатическую изменчивость этого процесса.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания ИОРАН (тема № 0128-2021-0007), при поддержке РФФИ (проект № 20-35-70039), РНФ (проект № 20-17-00200) и Гранта Президента РФ МК-860.2020.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алевкин О.А., Ляхин Ю.И. Химия океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 343 с.
2. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
3. Зацепин А.Г., Поярко С.Г., Кременецкий В.В. и др. Гидрофизические характеристики глубоководных желобов западной части Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 526–539.
4. Маккавеев П.Н., Мельникова З.Г., Полухин А.А. и др. Гидрохимическая характеристика вод западной части Карского моря (по материалам 59-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”) // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 1. С. 113–119.
5. Полухин А.А., Маккавеев П.Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–37.
6. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Под ред. Сапожникова В.В. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
7. Сергеева В.М., Суханова И.Н., Флинт М.В. и др. Фитопланктон желоба св. Анны: влияние абиотических факторов // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 4. С. 528–544.
8. Суханова И.Н., Флинт М.Ф., Дружкова Е.И. и др. Фитопланктон северо-западной части Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 605–619.
9. Флинт М.В., Поярко С.Г., Тимонин А.Г., Соловьев К.А. Структура мезопланктонного сообщества в области континентального склона желоба Святой Анны (Карское море) // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 643–655.
10. Bellerby R.G.J., Silyakova A., Nondal G. et al. Marine carbonate system evolution during the EPOCA Arctic pelagic ecosystem experiment in the context of simulated Arctic ocean acidification // *Biogeosciences Discussions*. 2012. V. 9. № 11. P. 15541–15565.
11. Dickson A.G., Afghan J.D., Anderson G.C. Reference materials for oceanic CO₂ analysis: a method for the certification of total alkalinity // *Mar. Chem.* 2003. V. 80. № 2–3. P. 185–197.
12. Doney S.C. The dangers of ocean acidification // *Sci. Am.* 2006. V. 294. № 3. P. 58–65.
13. Drake T.W., Tank S.E., Zhulidov A.V et al. Increasing Alkalinity Export from Large Russian Arctic Rivers // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52. № 15. P. 8302–8308. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01051>
14. Lewis E.R., Wallace D.W.R. Program developed for CO₂ system calculations. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem, 1998. №. cdiac: CDIAC-105.
15. Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S. et al. Polar Regions // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / Pörtner H.-O. et al. (eds.). 2019. In press.
16. Orr J.C., Fabry V.J., Aumont O. et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms // *Nature*. 2005. V. 437. № 7059. P. 681–686.
17. Orr J.C. Recent and future changes in ocean carbonate chemistry // *Ocean Acidif.* 2011. V. 1. P. 41–66.
18. Osadchiv A.A., Frey D.I., Shchuka S.A. et al. Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2021. Article e2020JC016486.
19. Pankratova, N.V., Belikov, I.B., Belousov, V.A. et al. Concentration and Isotopic Composition of Methane, Associated Gases, and Black Carbon over Russian Arctic Seas (Shipborne Measurements) // *Oceanology*. 2020. V. 60. № 5. P. 593–602.
20. Polukhin A. The role of river runoff in the Kara Sea surface layer acidification and carbonate system changes // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. № 10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab421e>
21. Steinacher M., Joos F., Frölicher T.L. et al. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model // *Biogeosciences*. 2009. V. 6. № 4. P. 515–533.
22. Takahashi T., Sutherland S.C., Sweeney C. et al. Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects // *Deep Sea Res., Part II*. 2002. V. 49. № 9–10. P. 1601–1622.
23. Wallhead, P.J., Bellerby, R.G.J., Silyakova, A. et al. Bottom water acidification and warming on the western Eurasian Arctic shelves: Dynamical downscaling projections // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2017. V. 122. № 10. P. 8126–8144.
24. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // *Limnol. Oceanogr.: Methods*. 2014. V. 12. № 6. P. 351–362. <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>

Carbon Dioxide Flux at the Water–Atmosphere Boundary at the Continental Slope in the Kara Sea

A. A. Polukhin^{a, #}, M. V. Flint^a, I. B. Belikov^b, G. V. Gusak^c, U. A. Kazakova^d, V. O. Muravya^a,
N. V. Pankratova^b, Yu. O. Pronina^a, A. I. Skorokhod^b, A. L. Chultsova^a, and A. S. Shchuka^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia*

^b*Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia*

^c*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

^d*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: polukhin@ocean.ru*

The values and direction of carbon dioxide flux in the area of the continental slope in the north of the Kara Sea (St. Anna Trough) were calculated based on the field studies in 2020 within the framework of the program “Ecosystems of the Siberian Arctic Seas”. The existence of a stable frontal zone in this area has been confirmed, which is formed by an alongslope current. It limits the spread of surface waters freshened by continental runoff to the north. Simultaneous analysis of the carbonate system in the upper sea layer and the CO₂ concentration in the near-water atmosphere made it possible to establish that in the area of the outer shelf, which is under the influence of river runoff, and the area of the continental slope, lying outside, the flow of carbon dioxide is directed from the atmosphere into the water at a speed of 0.2 to 22 mmol / m² day. The highest rates of CO₂ absorption by the sea surface layer are localized above the continental slope. Local processes in the area of the slope frontal zone determine the emission of carbon dioxide into the atmosphere at a rate of 0.34 mmol/m² day.

Keywords: Arctic, Kara Sea, continental slope, ecosystem, carbon dioxide balance