

УДК 551.465

СТРУКТУРА ВОД И ПОТОК УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НАД КОНТИНЕНТАЛЬНЫМ СКЛОНОМ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И В ПРОЛИВЕ ВИЛЬКИЦКОГО В ОСЕННИЙ СЕЗОН

© 2023 г. А. А. Полухин¹, *, У. А. Казакова^{1, 2}, Г. В. Гусак³, В. О. Муравья¹, И. Б. Беликов⁴,
Н. В. Панкратова⁴, А. И. Скороход⁴, Г. В. Борисенко¹, М. В. Флинт¹, А. С. Щука¹

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

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Гамбургский университет, Гамбург, Германия

⁴Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

*e-mail: polukhin@ocean.ru

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

После доработки 14.03.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

В рамках фундаментальной научной программы “Экосистемы морей Сибирской Арктики”, выполняемой Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН с 2007 г., проведены исследования структуры вод, пространственной изменчивости параметров карбонатной системы, а также рассчитана интенсивность и направление потока углекислого газа над континентальным склоном моря Лаптевых и в проливе Вилькицкого в сентябре 2018 г. Показано присутствие нескольких основных водных масс, определяющих структуру вод в исследованном районе. Выявлена сильная пространственная изменчивость параметров карбонатной системы морских вод, определяемая комплексом физических и химико-биологических процессов. Поток углекислого газа на границе вода–атмосфера, составил от -12 до $+4$ ммоль м^{-2} сут^{-1} . Выявлено, что исследованная область внешнего шельфа моря и континентального склона моря Лаптевых является эмитентом углекислого газа в атмосферу по состоянию на сентябрь 2018 г. Район пролива Вилькицкого, наоборот, является областью поглощения CO_2 .

Ключевые слова: Арктика, море Лаптевых, континентальный склон, структура вод, карбонатная система, баланс углекислого газа

DOI: 10.31857/S0030157423050143, EDN: PXWXVX

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние и текущие изменения Арктического бассейна как естественной, так и антропогенной природы, во многом определяются процессами, происходящими в областях континентального склона арктических морей [28, 42, 50]. Экосистемы области континентального склона, где в наибольшей степени проявилось изменение ледовых условий последних декад [34, 55], крайне мало исследованы. В море Лаптевых, более ледовитом, чем Карское море [2], современные климатические тренды выражены достаточно явно. Среднегодовая температура воздуха в этом районе за первое десятилетие настоящего века возросла на 2.3°C , а уменьшение площади льдов в летний период превысило 20% от среднемесячной нормы [16]. Многие факторы, связанные с пониманием структуры и функционирования экосистем Арктического шельфа и континентального склона [3, 12, 17, 24, 51], механизмов поступления

“континентального сигнала” в глубоководный Арктический бассейн [22, 33] в полной мере относятся к морю Лаптевых. 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. Текущие климатические изменения в наибольшей степени выражены в Арктике, и в Северном Ледовитом океане (СЛО) можно ожидать наибольшую для океана изменчивость карбонатной системы вод [26, 47] и такие последствия, как увеличение коррозионности морских вод по отношению к организмам-кальцификаторам [19, 52].

Одной из первых обобщающих работ о важности исследований потоков углекислого газа в Арктике стала статья ученых Тихоокеанского океанологического института им. Ильичева ДВО РАН (ТОИ) о динамике карбонатных параметров и по-

токе углекислого газа на границе океан–атмосфера в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях [47]. Натурные исследования выявили пространственно-временную неоднородность интенсивности и направленности потока углекислого газа на границе океан–атмосфера, а также принципиальные различия между процессами, меняющими карбонатное равновесие шельфовой и глубоководной областей арктических морей. Дальнейшие исследования этих авторов дали более глубокое понимание изменений в карбонатном равновесии шельфа восточной части моря Лаптевых, находящегося под воздействием стока р. Лены и являющимся эмитентом CO_2 в атмосферу в осенний сезон [6, 7], а также непосредственно в русле этой крупнейшей сибирской реки [8]. Был сделан ряд важных выводов об усилении коррозионности морских вод Восточно-Сибирского шельфа [6, 48] по отношению к арагониту – полиморфу карбоната кальция – наиболее характерному индикатору процесса ацидификации [52]. В рамках проекта NABOS (Nansen and Amundsen Basins Observational Systems) проводились исследования карбонатной системы морских вод, в том числе, в западной части моря Лаптевых [41]. Кроме того, исследования особенностей и динамики параметров карбонатной системы, проведенные коллегами из ТОИ, согласуются с полученными в экспедиционных исследованиях данными о гидрофизике и динамике водных масс на континентальном склоне моря Лаптевых [21, 22, 28]. Одной из причин быстрого снижения уровня насыщения арагонитом вод шельфа моря Лаптевых является увеличение поступления органического вещества (ОВ) в течение последних десятилетий [48].

В Карском море первые подобные исследования были проведены сотрудниками ТОИ [41], а в 2020 г. [11] сотрудниками ИОРАН получены первые реальные оценки потока углекислого газа на границе океан–атмосфера в условиях протекающих динамических процессов над склоном отрога желоба Св. Анны. Представленные в [11] результаты исследований потока углекислого газа для осеннего сезона в Карском море были подтверждены и дополнены сотрудниками ТОИ в 2021 г. [9].

Цель данной работы – оценка потока углекислого газа на границе вода–атмосфера в районе континентального склона в западной части моря Лаптевых в осенний сезон, а также выявление пространственной изменчивости параметров карбонатной системы и их отклик на гидрофизические особенности района исследований. Полученные оценки и результаты помогут в дальнейшем дать прогноз изменений в карбонатном равновесии для Арктики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках 72 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, организованного Институтом океанологии РАН по программе “Экосистемы морей российской Арктики” в период с 16 августа по 20 сентября 2018 г. [18], проводились исследования в западном районе континентального склона моря Лаптевых (рис. 1).

Было выполнено 4 разреза: 2 поперек континентального склона в западной (11 станций) и центральной (9 станций) частях моря, один вдоль канала (для понимания, в рамках этой работы назовем его “канал Вилькицкого”), соединяющего пролив Вилькицкого со склоном (6 станций) и один поперек пролива Вилькицкого (5 станций). Для исследования гидрофизической структуры вод использовались данные по температуре, солености, полученные с использованием прецизионных зондирующих комплексов SBE (США). Отбор проб производился комплексом Rosette в пятилитровые пластиковые батометры (General Oceanic, США).

Определение рН проводилось потенциометрически с помощью рН-метра Hanna HI 2215 после предварительного термостатирования проб до 20°C [27]. Анализ общей щелочности проводился титрованием 0.02 М соляной кислотой с визуальным определением точки эквивалентности по методу Бруевича [39] с применением раствора Na_2CO_3 , приготовленного по стандартной методике [14].

Расчет параметров карбонатной системы (содержание растворенного CO_2 , гидрокарбонат- и карбонат-ионов, парциальное давление CO_2 ($p\text{CO}_2$), насыщение кальцитом и арагонитом) проводился по данным измеренных в пробах рН и общей щелочности в программе CO_2sys , разработанной [35]. В расчете применялись константы диссоциации угольной кислоты по Рою [46], константа диссоциации иона HSO_4^- – по Диксону [27].

Измерение $p\text{CO}_2$ в приводном слое атмосферы проводилось с помощью газоанализатора G2132-i производства компании Picarro Inc. (США). Комплекс и проведение его периодических калибровок непосредственно до и после морских экспедиций подробно описаны в [5, 13, 38]. Забор воздуха проводился по борту судна на высоте 18.5 м над уровнем моря. Воздух подавался в прибор трубопроводом длиной 10 м при расходе воздуха 1.5 л/мин. В результате наблюдений были сформированы практически непрерывные ряды данных о концентрации CO_2 с временным разрешением в 1 минуту.

Расчет интенсивности потока CO_2 проводился по [56],

$$F = 7.7 \times 10^{-4} U^2 \Delta p\text{CO}_2,$$

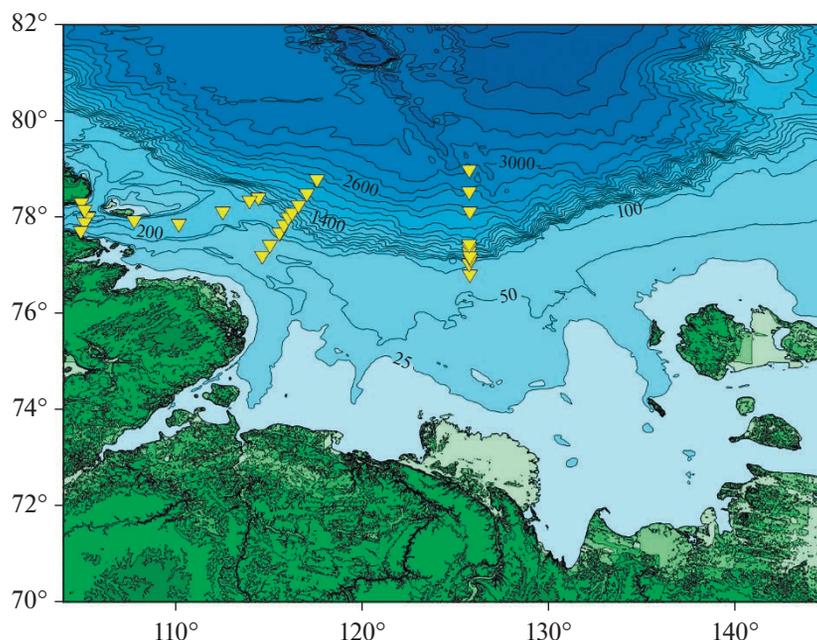


Рис. 1. Схема расположения станций в море Лаптевых в ходе 72 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш».

где F — поток CO_2 в моль $\text{м}^{-2} \text{год}^{-1}$, U — скорость ветра в приводном 10 метровом слое атмосферы (м/с), $\Delta p\text{CO}_2$ — разница $p\text{CO}_2$ между водой и атмосферой (ppm).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрологическая структура вод моря Лаптевых, характеризующаяся пространственным распределением температуры и солености, отражает взаимодействие нескольких водных масс (летние распресненные, зимние промежуточные, атлантические), а также происходящие процессы в районе континентального склона западной части моря (рис. 2, 3). Например, в поверхностном слое отчетливо видно летнюю воду моря Лаптевых с положительной температурой от 1 до 4°C, занимающую слой до 15 м и опресненную (соленость варьирует от 27.5 до 31) материковым стоком предположительно р. Лена. Отдельно, в поверхностном слое пролива Вилькицкого, выделяется слой мощностью 25–30 м теплой (до 4°C) и распресненной (до 25 солености) воды. Как было показано в работе [4], это заток опресненных вод из Карского моря, который существует не всегда [25] и проявляется в зависимости от внешних факторов, например, ветрового воздействия [37].

Под сезонным пикноклином, образованным в результате опреснения морских вод материковыми и тальми водами, а также летнего прогрева вод, обнаружен слой зимних промежуточных вод, сформированный в результате конвективного перемешивания во время осенних штормов и про-

цесса ледообразования. Этот слой достигал толщины 60–80 м по нашим данным, температура в этом слое отмечена в пределах $-1.50 \dots -1.75^\circ\text{C}$.

Наиболее низкие температуры приурочены к северным частям разрезов, прилегающих к району Центрального арктического бассейна (ЦАБ). В районе склона температура промежуточного слоя повышается до $-1.0 \dots -0.5^\circ\text{C}$, что связано с взаимодействием с более теплыми водами шельфа. Соленость этого слоя составляет 34.0–34.5. В проливе Вилькицкого структура вод двухслойная, ниже пикноклина водная масса однородна по температуре, соленость монотонно увеличивается с глубиной.

На глубинах ниже 90 и до 1000–1200 м температура увеличивается ввиду присутствия здесь модифицированных атлантических вод. Температура в ядре атлантических вод составляла 2°C, что особенно отчетливо видно на разрезе поперек склона в западной части моря (рис. 26). Соленость вод наиболее высокая в этом районе и составляет 34.6–34.9 (рис. 36).

По щелочно-соленостному отношению [10] район работ выделяется влиянием материкового стока, обнаруженным над бровкой шельфа в исследованной части моря. На разрезе через западную область склона влияние стока меньше в пространстве, на центральном — значительно больше (рис. 4). Регрессионный анализ данных показал, что при солености 0 щелочность составляет 680 μM . Можно предположить, что опреснение в исследованном районе происходит водами р. Лены [40], так как воды второй по величине стока в море

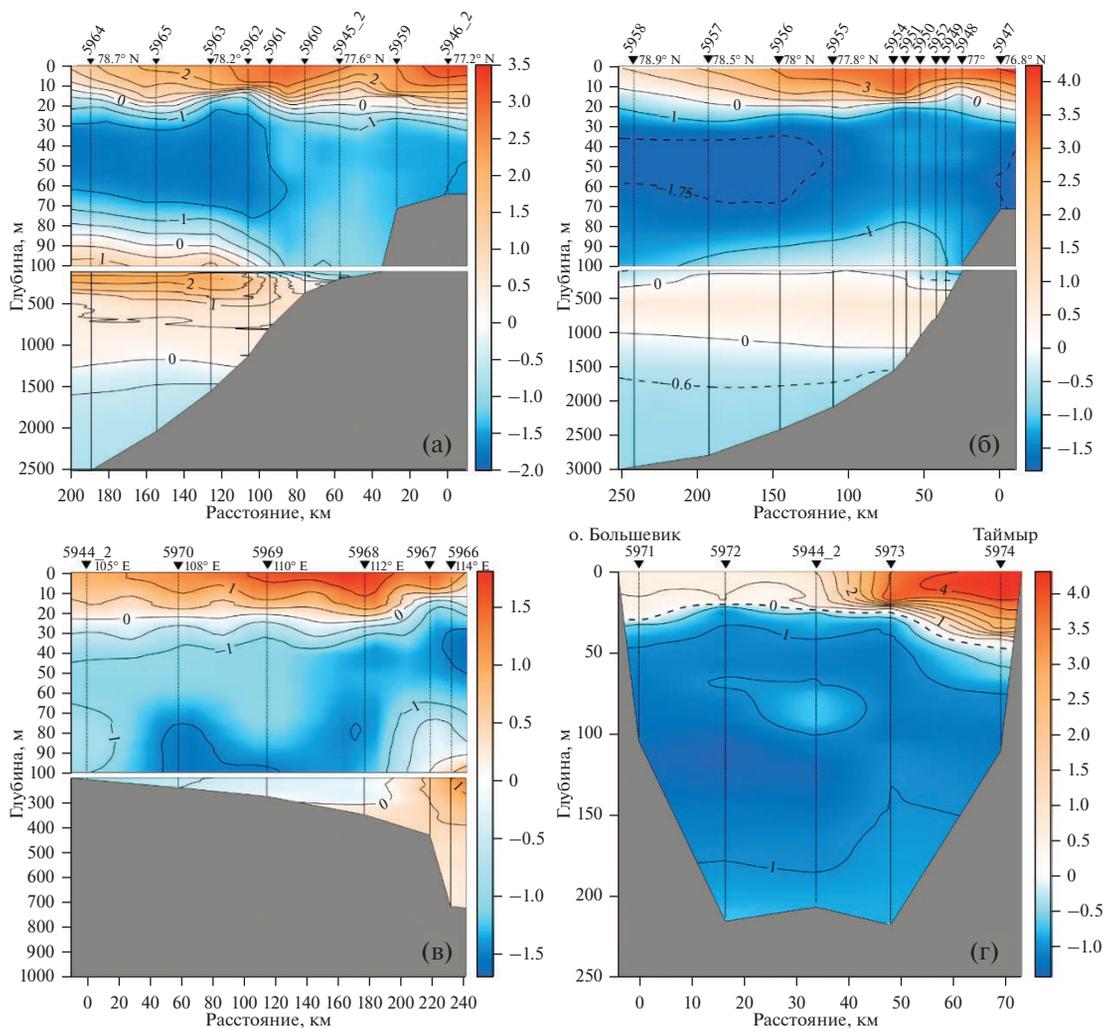


Рис. 2. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) на разрезах поперек склона в западной (а) и центральной (б) частях моря Лаптевых; вдоль “канала Вилькицкого” (в), поперек пролива Вилькицкого (г).

Лаптевых р. Хатанги не распространяются так далеко [1]. Также по данным расчета щелочно-соленостного отношения видно, что на расстоянии порядка 400 км от дельты р. Лены, ее влияние на вертикальную структуру вод еще очень велико. Исследования 2015 г. показали, что влияние стока р. Лены обнаружено на расстоянии до 800 км от дельты в слое до 10 м [15]. Более значительное влияние материковых вод на поверхностный слой на западном разрезе (рис. 4а) может быть комбинацией влияния стока р. Лены и выноса опресненных вод из Карского моря через пролив Вилькицкого, которое мы зафиксировали в 2018 г. [4].

Пространственное распределение pCO_2 в воде отражает как гидрологические особенности вод района, так и продукционно-деструкционные процессы в толще вод моря. На разрезах рис. 5 видно, что в районе центральной части склона вся толща вод пересыщена CO_2 , а положение изо-

линий в слое 10–100 м характеризует динамический процесс перемешивания насыщенных CO_2 вод в толще над склоном. Пространственное распределение CO_2 на разрезе в западной части склона (рис. 5а) отражает, предположительно, процесс каскадинга шельфовых вод по склону, известный в Арктике [31, 49]. Высокое значение pCO_2 вблизи бровки шельфа при подтвержденной здесь границе влияния речного стока отражает процесс окисления выносимого со стоком р. Лены ОВ, интенсивно окисляемого у дна, а также деструкции терригенного ОВ, поступающего в море в результате эрозии берегового ледового комплекса с высоким содержанием органики [48, 54]. Далее эти воды, ввиду их высокой плотности, скатываются по склону до глубин 1500 м, где располагается нижняя граница модифицированных атлантических вод. Поверхностные воды наиболее западной части моря Лаптевых, прилегающие к проливу Вилькицкого (рис. 5в), сильно

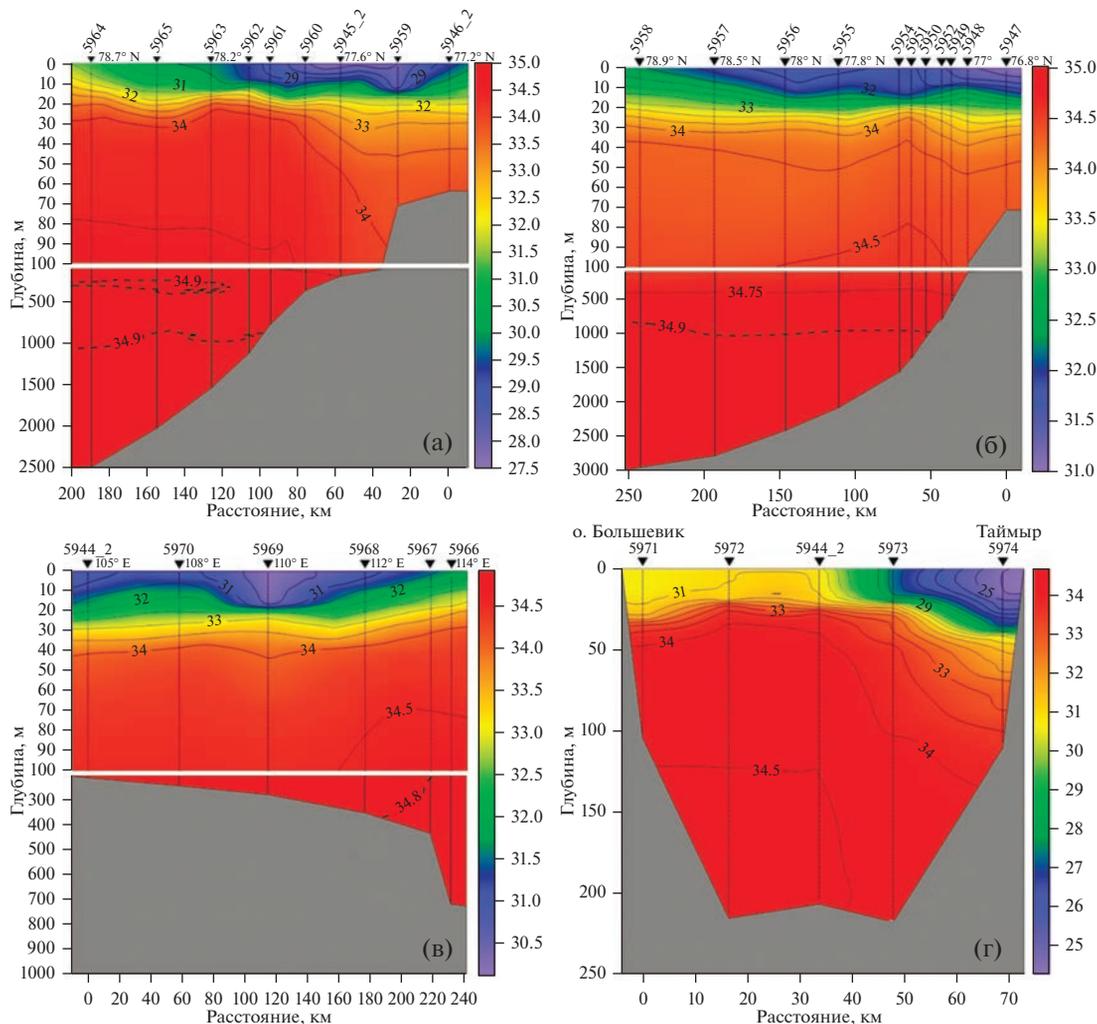


Рис. 3. Распределение солёности на разрезах поперек склона в западной (а) и центральной (б) частях моря Лаптевых, вдоль “канала Вилькицкого” (в), поперек пролива Вилькицкого (г).

недонасыщены CO_2 (до 250 ppm) ввиду взаимодействия с водами ЦАБ, поэтому могут являться областью поступления CO_2 в воду. В проливе Вилькицкого четко видно границу опресненных вод с высоким $p\text{CO}_2$ (рис. 5г, до 420–440 ppm), движущихся из Карского моря вдоль берега п-ова Таймыр [4].

Были построены диаграммы распределения рН и насыщения арагонитом (Ω_{Ar}) в поле температуры и солёности для отражения распределения этих характеристик в структуре вод (рис. 6). Во всех исследованных районах, кроме пролива Вилькицкого, можно отчетливо выделить три водных массы: наиболее теплые и опресненные (с солёностью до 27) воды, характеризующие модифицированную поверхностную воду; холодные и наиболее солёные воды придонного слоя; теплые и солёные модифицированные атлантические воды. На разрезах в области континентального

склона также наблюдаются промежуточные водные массы. В проливе Вилькицкого структура вод — двухслойная в области влияния речного стока, и более однородные морские воды в северной части пролива.

Достаточно высокие значения рН (в пределах 8.00–8.10 NBS) при низкой температуре, характеризующей глубокие слои в толще моря, указывают на взаимодействие вод исследованной акватории с водами ЦАБ. Высокие значения рН (8.11–8.22 NBS) при положительной температуре и пониженной солёности, характерной для поверхностных вод, указывают на процесс продукционной активности и обмен кислородом с атмосферой. В модифицированных атлантических водах рН варьировал в пределах от 8.05 NBS в западной части склона до 8.14 NBS в центральной части склона. Наиболее высокие значения рН (8.20–8.28 NBS) зафиксированы в слое наибольшего градиента

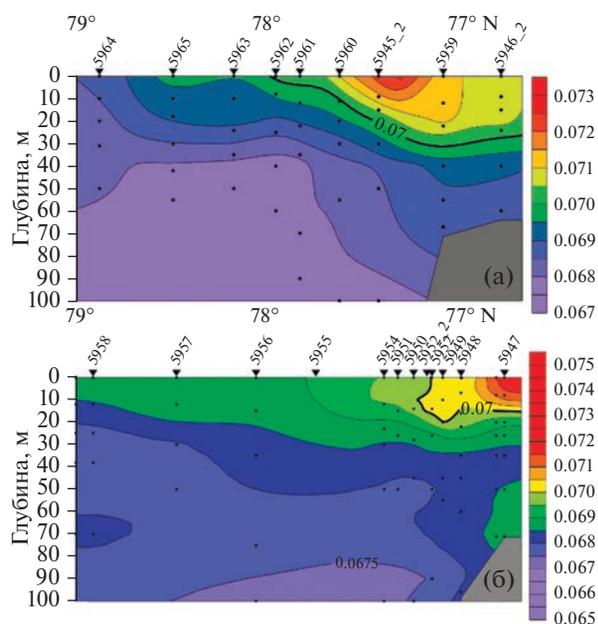


Рис. 4. Распределение отношения щелочность—соленость, отражающего влияние материкового стока, на разрезах поперек континентального склона в западной (а) и центральной (б) частях моря Лаптевых. Изолиния 0.07 показывает границу воздействия речного стока.

солености (20–28 м), что скорее всего определяется активностью сообществ фитопланктона [3].

В проливе Вилькицкого насыщение арагонитом имеет меньшую амплитуду изменчивости (1.0–1.7), также характеризую воздействие пресных вод в этом районе. Насыщение вод арагонитом в исследованной акватории континентального склона варьирует в широких пределах от 0.9 до 3.2. В области влияния материкового стока параметр изменяется от 1.2 до 2.6, в глубоких слоях (включая и атлантические воды) — до 3.2. Воды, не подверженные влиянию материкового стока, перенасыщены арагонитом и не являются корро-

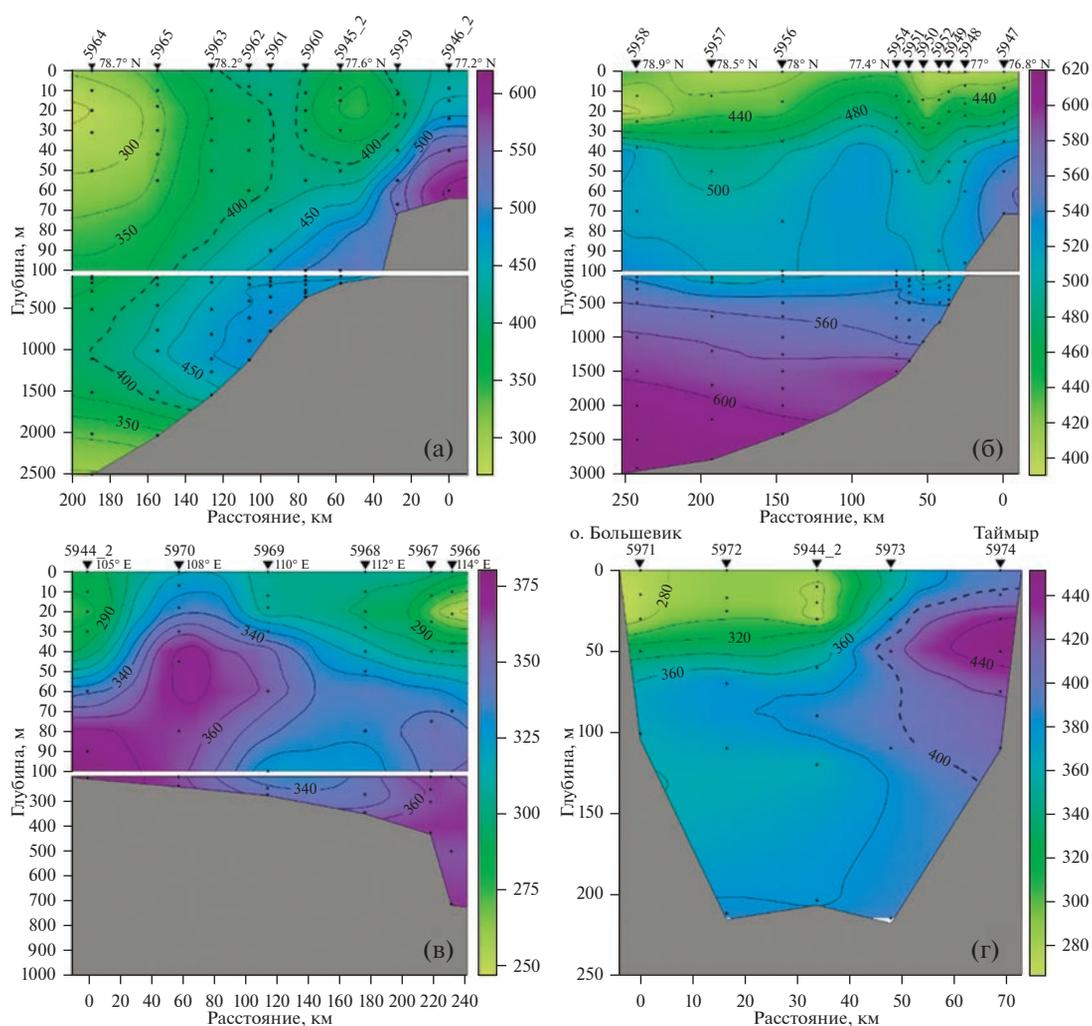


Рис. 5. Распределение $p\text{CO}_2$ (ppm) на разрезах поперек склона в западной (а) и центральной (б) частях моря Лаптевых; вдоль “канала Вилькицкого” (в) и поперек пролива Вилькицкого (г).

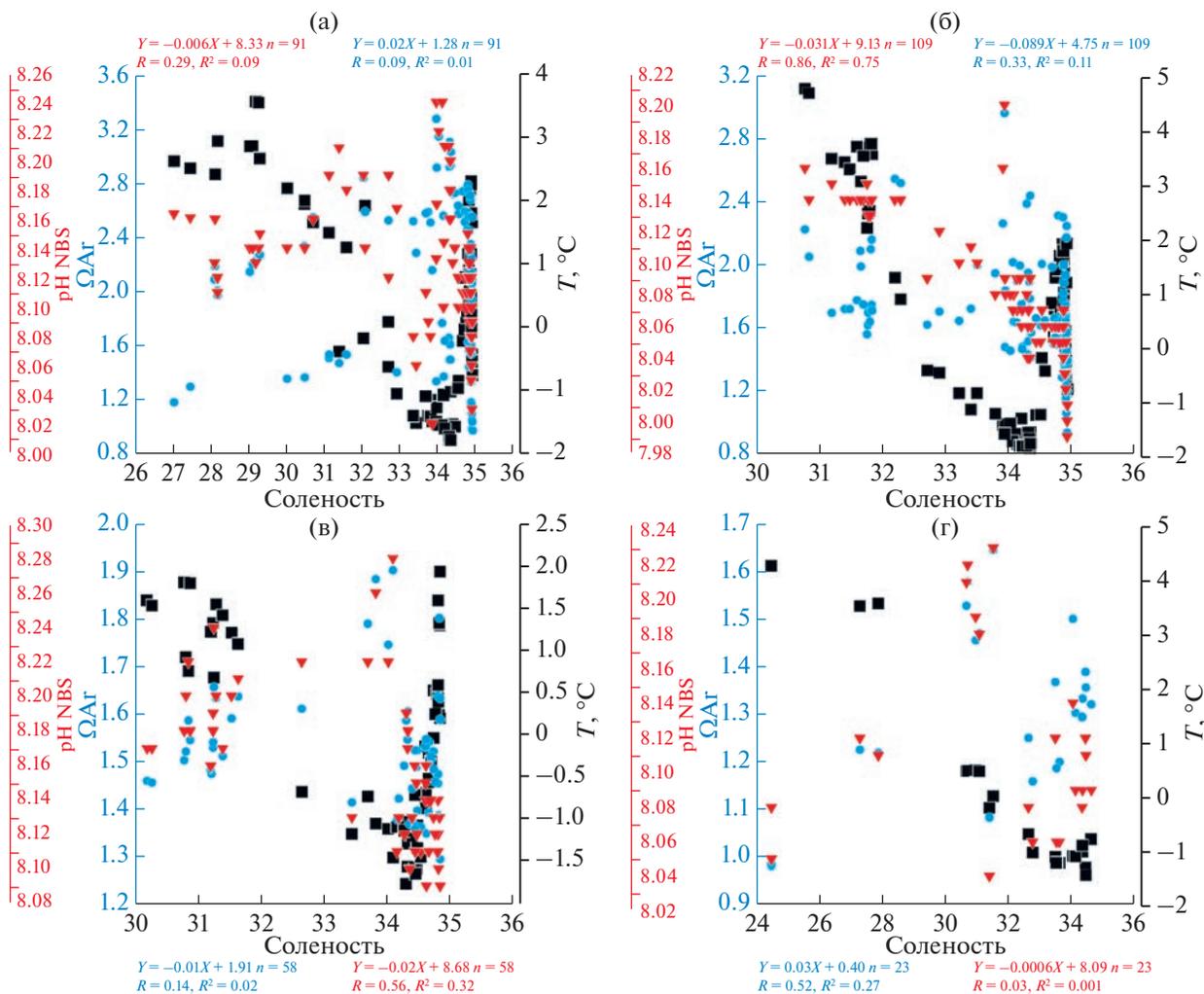


Рис. 6. Величины pH (красным), насыщения арагонитом (Ω_{Ar} , синим) и температуры ($^{\circ}C$, черным) относительно солености по разрезам в западной (а) и центральной (б) частях моря Лаптевых; вдоль “канала Вилькицкого” (в), в проливе Вилькицкого (г).

зионными по отношению к организмам-кальцификаторам.

Судя по разбросу значений pH и Ω_{Ar} , наибольшей пространственной изменчивостью исследованной акватории моря Лаптевых характеризуется район континентального склона центральной части моря, где проявляется существенное взаимодействие с материковым стоком из р. Лены [6, 15], а также пролив Вилькицкого, находящийся под влиянием речного стока из Карского моря [4, 37].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Амплитуда изменчивости и пространственное распределение pCO_2 в атмосфере представлено на рис. 7. Диапазон изменений параметра pCO_2 в воздухе составлял от 380 до 430 ppb при среднем значении 397 ppb, что согласуется со средними значениями, характерными для других окраин-

ных морей сибирской Арктики [20, 32, 44]. В период измерений повышенные значения концентрации CO_2 как правило отмечаются при адвекции воздушных масс с материка, пониженным же значениям соответствует заток воздуха с северных районов. Кроме крупномасштабных процессов на концентрацию углекислого газа могут влиять и локальные факторы.

В поверхностном слое исследованной акватории pCO_2 изменялось от 250 до 450 ppb. Ниже равновесного значения (397 ppb) отмечена область мористой части западного разреза (станции 5963–5965, рис 5а). Превышение 397 ppb в поверхностном слое связано с фотосинтетической активностью фитопланктона и речным стоком, ниже 100 м – с окислением органического вещества, как аллохтонного, так и автохтонного происхождения.

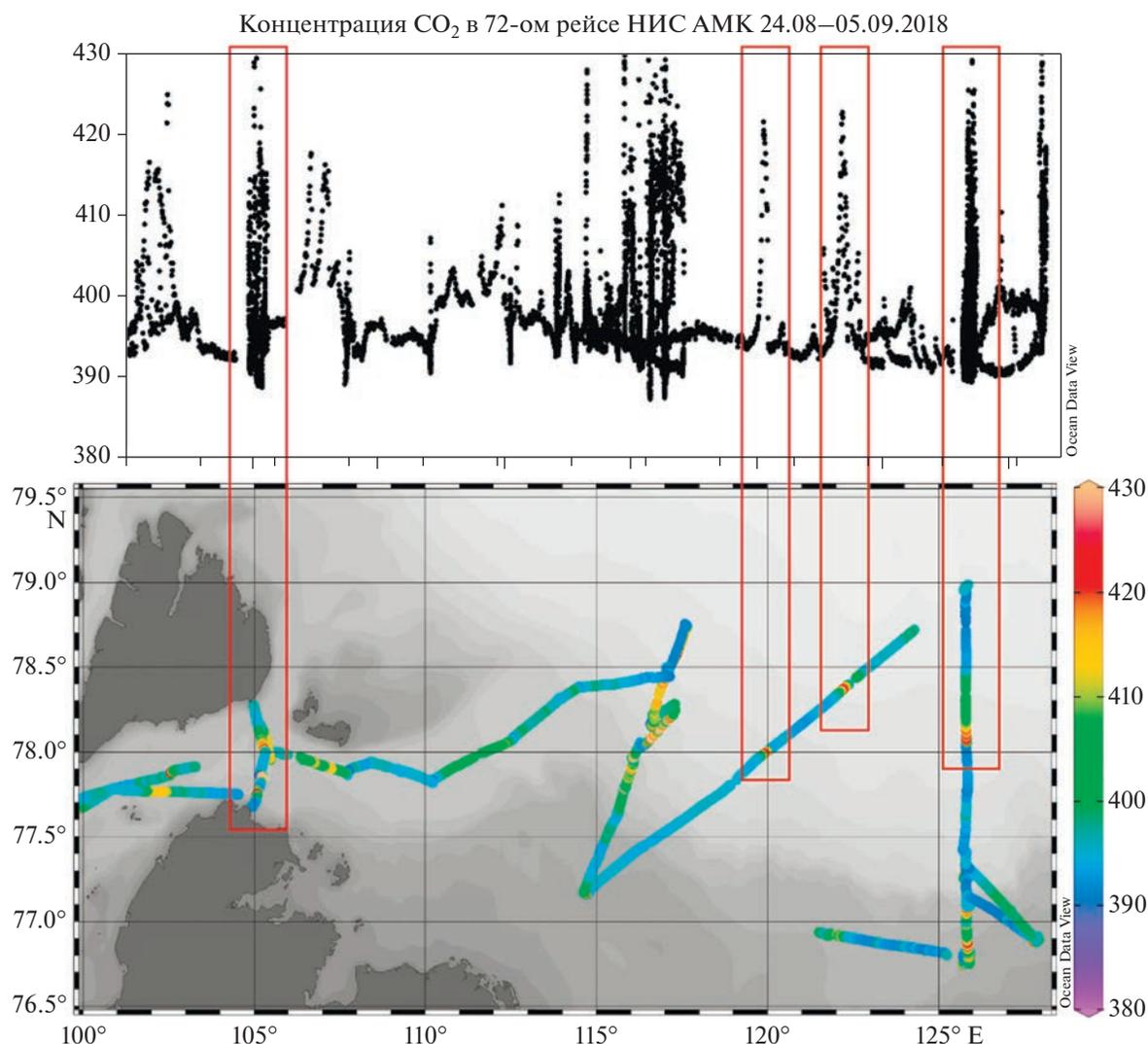


Рис. 7. Парциальное давление CO₂ в атмосфере (pCO₂, ppm), измеренное по ходу движения судна в период 24 августа–5 сентября 2018 г. Вверху – амплитуда изменчивости в выделенных районах, внизу – пространственная изменчивость.

Результаты расчета интенсивности потока углекислого газа между поверхностным слоем моря Лаптевых и атмосферой показали, что над континентальным склоном поток диоксида углерода направлен в атмосферу со скоростью до 4 ммоль м⁻² сут⁻¹. В проливе Вилькицкого и на шельфе к востоку от пролива диоксида углерода направлен из атмосферы в воду с интенсивностью до 12 ммоль м⁻² сут⁻¹ (рис. 8).

Выявлено, что по состоянию на сентябрь 2018 г. исследованная область внешнего шельфа моря и континентального склона моря Лаптевых является эмитентом углекислого газа в атмосферу со средней интенсивностью 2 ммоль м⁻² сут⁻¹. В работе [7] даны оценки эмиссии в атмосферу CO₂ с интенсивностью 7.9 ммоль м⁻² сут⁻¹ для восточной части шельфа моря за несколько лет наблюдений в сентябре. Ближе к проливу Вилькицкого и в са-

мом проливе средняя интенсивность поглощения атмосферного CO₂ составила –7.2 ммоль м⁻² сут⁻¹. По данным реанализа ветра NCEP/NCAR, работы проводились в основном в зоне действия циклонов со скоростями ветра от 5 до 12 м/с. По данным судовой метеостанции, скорость ветра часто не превышала 2 м/с во время проведения наблюдений. Этим фактором объясняется невысокая интенсивность обмена.

Полученные оценки потока CO₂ для западной части континентального склона моря Лаптевых являются противоположными полученным нами результатам оценки потока CO₂ над континентальным склоном Карского моря в сентябре 2020 г., где поток CO₂ преимущественно был направлен в море с интенсивностью до 22 ммоль м⁻² сут⁻¹ [11]. Исследования коллег из ТОИ осенью 2021 г. в

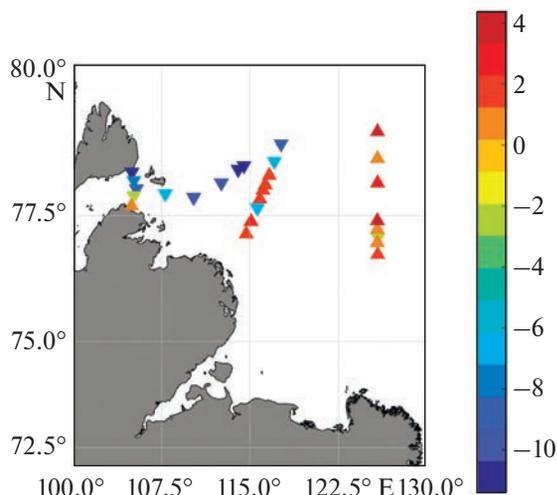


Рис. 8. Рассчитанный поток CO_2 ($\text{ммоль м}^{-2} \text{сут}^{-1}$) на границе вода–атмосфера в сентябре 2018 г. в западной части моря Лаптевых.

Карском море [9] показали, что район центрального отрога желоба Св. Анны является областью стока CO_2 с интенсивностью до $50 \text{ ммоль м}^{-2} \text{сут}^{-1}$. Таким образом, области склона эпиконтинентальных арктических морей характеризуются высокой пространственной изменчивостью параметров карбонатной системы и интенсивностью потока CO_2 , поэтому необходимо более детальное изучение этих важнейших районов Мирового океана. Полученные результаты могут быть применены для средне- и долговременной оценки потока CO_2 в Арктике.

Проведенный анализ результатов показал, что на пространственную изменчивость параметров карбонатной системы в районе континентального склона моря Лаптевых и пролива Вилькицкого влияют, в первую очередь, взаимодействие водных масс исследованного района, а также комплекс взаимосвязанных процессов выноса материкового стока и аллохтонных веществ с продукционно-деструкционными процессами в верхнем деятельном слое моря. В области контакта материковых и морских вод (в первую очередь эстуарии и прилегающий шельф) возможны наибольшие колебания пространственно-временной изменчивости параметров карбонатной системы [9]. Так, в Арктике поступление большего количества биогенных веществ в область шельфа способно смягчать критические изменения в карбонатном равновесии, такие как процесс асидификации [29], вызванные увеличением поступления ОБ арктических рек [23, 45] и продуктов эрозии ледового комплекса побережья [48]. Однако в районах Арктики, свободных от опресняющего воздействия стока (мы не принимаем здесь во внимание талые воды морского льда, способные локально суще-

ственно влиять на параметры карбонатной системы [30, 43, 57]), поверхностный слой моря становится областью стока атмосферного CO_2 , способного склонить карбонатное равновесие в сторону уменьшения pH и увеличения коррозионности вод по отношению к кальциту/арагониту. В настоящее время насыщение арагонитом вод западной части моря Лаптевых достаточно высокое. Процесс асидификации в Арктике протекает довольно быстро [44, 57], поэтому происходящие вслед за ним изменения могут быть необратимы и губительны для арктических экосистем [36, 53].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили оценить современное состояние карбонатной системы вод над континентальным склоном моря Лаптевых, выделить основные факторы, которые влияют на изменчивость карбонатной системы в исследованном районе, а также рассчитать интенсивность и направление потока CO_2 .

Процессы, происходящие в областях внешнего континентального шельфа и континентального склона краевых арктических Российских морей, влияют на Центральный Арктический Бассейн через систему кросс-шельфового и кросс-склонового переноса. Эти процессы играют важнейшую роль в формировании гидрофизических и гидрохимических свойств водных масс, регулировании гидрохимического и биогеохимического режимов, создании биологической продукции и регулировании потоков вещества, включая загрязнение антропогенного происхождения в современной арктической экосистеме. Комплексная оценка этих процессов и факторов, которые ими управляют – основа для понимания Арктики как системы и ее современной эволюции под воздействием изменений климата и антропогенных факторов, а также обратимости происходящих в Арктике изменений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОРАН (Соглашение о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий № 169-15-2023-002) при поддержке Российского научного фонда (проект 20-17-00200), а также гранта Президента РФ МК–3506.2022.1.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беззубова Е.М., Селиверстова А.М., Замятин И.А. и др. Гетеротрофный бактериопланктон шельфа моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в области влияния пресноводного стока // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 1. С. 74–86. <https://doi.org/10.31857/S0030157420010025>
2. Бородачев В.Е., Бородачев И.В. Ледовитость моря Лаптевых в условиях колебаний климата Арктики //

- Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 3. С. 60–73.
3. Демидов А.Б., Гагарин В.И., Артемьев В.А. и др. Вертикальная изменчивость первичной продукции и характеристики подповерхностного хлорофильного максимума в море Лаптевых в августе–сентябре 2015, 2017 и 2018 гг. // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 2. С. 216–232. <https://doi.org/10.31857/S0030157420010062>
 4. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Шука С.А. и др. Перенос материковых вод через пролив Вилькицкого в сентябре 2017 и 2018 гг. // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 3. С. 355–363. <https://doi.org/10.31857/S0030157420030053>
 5. Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А. и др. Наблюдения концентраций метана, озона, черного углерода, оксидов азота, углерода и содержания $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ над морями российской Арктики с борта научно-исследовательского судна летом и осенью 2018 года // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 5. С. 685–695.
 6. Пипко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П. Характерные особенности динамики карбонатных параметров вод восточной части моря Лаптевых // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 1. С. 78–78. <https://doi.org/10.7868/S0030157415010141>
 7. Пипко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П. Оценка потоков CO_2 между океаном и атмосферой в восточной части моря Лаптевых в безледный период // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 467. № 5. С. 594–594. <https://doi.org/10.7868/S0869565216110207>
 8. Пипко И.И., Пугач С.П., Моисеева Ю.А. и др. О динамике растворенного углерода в главном русле реки Лены в июле 2017 г. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 208–215. <https://doi.org/10.31857/S2686739721100133>
 9. Пипко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П. Динамика карбонатных характеристик вод Карского моря в позднеосенний сезон 2021 г. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 1. С. 86–91. <https://doi.org/10.31857/S2686739722600606>
 10. Полухин А.А., Маккавеев П.Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–37.
 11. Полухин А.А., Флинт М.В., Беликов И.Б. и др. Поток углекислого газа на границе вода–атмосфера в районе континентального склона в Карском море // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 5. С. 716–723. <https://doi.org/10.31857/S0030157421050117>
 12. 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. <https://doi.org/10.31857/S0030157420040218>
 13. Скорород А.И., Панкратова Н.В., Беликов И.Б. и др. Атмосферный метан и его изотопный состав над морями российской Арктики по результатам судовых измерений летом и осенью 2015 года // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 470. № 5. С. 1–5. <https://doi.org/10.7868/S0869565216290247>
 14. Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. Бордовского О.К. и др. М.: ИОАН СССР, 1992. 200 с.
 15. Степанова С.В., Полухин А.А., Костылева А.В. Гидрохимическая структура вод в восточной части моря Лаптевых осенью 2015 г. // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 57–66.
 16. Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Гусев Е.А. и др. Четвертичные отложения, подземные льды и динамика берегов Западного Таймыра // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. Под ред. Х. Кассенс и др. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. С. 357–372.
 17. Флинт М.В., Поярко С.Г., Тимонин А.Г. и др. Структура мезопланктонного сообщества в области континентального склона желоба Святой Анны (Карское море) // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 643–643. <https://doi.org/10.7868/S0030157415040061>
 18. Флинт М.В., Поярко С.Г., Римский-Корсаков Н.А. и др. Экосистемы морей сибирской Арктики–2018 (72-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 3. С. 506–509. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574593506-509>
 19. AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). AMAP Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification. Tromsø, Norway, 2018. vi+187pp
 20. Antonov K.L., Poddubny V.A., Markelov Y.I. et al. Dynamics of surface carbon dioxide and methane concentrations on the Arctic Belyy Island in 2015–2017 summertime // Proceedings of 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. SPIE, 2018. V. 10833. P. 1379–1384. <https://doi.org/10.1117/12.2504770>
 21. Bauch D., Torres-Valdes S., Polyakov I. et al. Halocline water modification and along-slope advection at the Laptev Sea continental margin // *Ocean Science*. 2014. V. 10. № 1. P. 141–154. <https://doi.org/10.5194/os-10-141-2014>
 22. Bauch D., Cherniavskaia E., Timokhov L. Shelf basin exchange along the Siberian continental margin: Modification of Atlantic Water and Lower Halocline Water // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2016. V. 115. P. 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2016.06.008>
 23. Behnke M.I., McClelland J.W., Tank S.E. et al. Pan-Arctic Riverine Dissolved Organic Matter: Synchronous Molecular Stability, Shifting Sources and Subsides // *Global Biogeochemical Cycles*. 2021. V. 35(4). <https://doi.org/10.1029/2020gb006871>
 24. Belevich T.A., Demidov A.B., Shchuka S.A. et al. Pico-phytoplankton distribution along Khatanga Bay-shelf-continental slope environment gradients in the western Laptev Sea // *Heliyon*. 2021. V. 7. № 2. P. e06224. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06224>
 25. Carmack E., Winsor P., Williams W. The contiguous panarctic Riverine Coastal Domain: A unifying concept // *Progress in Oceanography*. 2015. V. 139. P. 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.07.014>

26. *Chierici M., Fransson A.* Calcium carbonate saturation in the surface water of the Arctic Ocean: undersaturation in freshwater influenced shelves // *Biogeosciences*. 2009. V. 6. № 11. P. 2421–2431. <https://doi.org/10.5194/bg-6-2421-2009>
27. *Dickson A. G.* The measurement of sea water pH // *Marine Chem.* 1993. V. 44. № 2–4. P. 131–142.
28. *Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Ivanov V.V. et al.* Mesoscale Atlantic water eddy off the Laptev Sea continental slope carries the signature of upstream interaction // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2008. V. 113. № C7. <https://doi.org/10.1029/2007JC004491>
29. *Fransson A., Chierici M., Nomura D. et al.* Effect of glacial drainage water on the CO₂ system and ocean acidification state in an Arctic tidewater-glacier fjord during two contrasting years // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. V. 120. № 4. P. 2413–2429. <https://doi.org/10.1002/2014JC010320>
30. *Fransson A., Chierici M., Nomura D. et al.* Influence of glacial water and carbonate minerals on wintertime sea-ice biogeochemistry and the CO₂ system in an Arctic fjord in Svalbard // *Annals of Glaciology*. 2020. V. 61(83). P. 320–340. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.52>
31. *Ivanov V.V., Golovin P.N.* Observations and modeling of dense water cascading from the northwestern Laptev Sea shelf // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C09003. <https://doi.org/10.1029/2006JC003882>
32. *Jeong S.J., Bloom A.A., Schimel D. et al.* Accelerating rates of Arctic carbon cycling revealed by long-term atmospheric CO₂ measurements // *Science advances*. 2018. V. 4. № 7. C. eaao1167. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao1167>
33. *Kremenetskiy V.V., Nedospasov A.A., Shchuka S.A. et al.* On the Structure of Water Exchange Between the Deep Northern and Shelf Southwestern Part of the Kara Sea over the Brusilov Sill // *Oceanology*. 2021. V. 61. № 6. P. 786–790. <https://doi.org/10.1134/S0001437021060266>
34. *Lalande C., Bélanger S., Fortier L.* Impact of a decreasing sea ice cover on the vertical export of particulate organic carbon in the northern Laptev Sea, Siberian Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № 21. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.08.009>
35. *Lewis E.R., Wallace D.W.R.* Program developed for CO₂ system calculations. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem (ESS-DIVE)(United States), 1998. CDIAC-105.
36. *Oostdijk M., Sturludóttir E., Santos M.J.* Risk Assessment for Key Socio-Economic and Ecological Species in a Sub-Arctic Marine Ecosystem Under Combined Ocean Acidification and Warming // *Ecosystems*. 2022. V. 25. P. 1117–1134. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00705-w>
37. *Osadchiv A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A. et al.* Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East-Siberian seas // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. 13041. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70096-w>
38. *Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I. et al.* Evidence of atmospheric response to methane emissions from the East Siberian Arctic shelf // *Geography, Environment, sustainability*. 2018. V. 11. P. 85–92. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-85-92>
39. *Pavlova G.Y., Tishchenko P.Y., Volkova T.I. et al.* Inter-calibration of Bruevich's Method to Determine the Total Alkalinity in Seawater // *Oceanology*. 2008. V. 48. P. 438–443. <https://doi.org/10.1134/S0001437008030168>
40. *Pipko I.I., Pugach S.P., Dudarev O.V. et al.* Carbonate parameters of the Lena River: Characteristics and distribution // *Geochem. Intl.* 2010. V. 48. № 11. P. 1131.
41. *Pipko I. I., Pugach S. P., Semiletov I. P. et al.* The spatial and interannual dynamics of the surface water carbonate system and air–sea CO₂ fluxes in the outer shelf and slope of the Eurasian Arctic Ocean // *Ocean Science*. 2017. V. 13. P. 997–1016. <https://doi.org/10.5194/os-13-997-2017>
42. *Pnyushkov A., Polyakov I. V., Padma L. et al.* Structure and dynamics of mesoscale eddies over the Laptev Sea continental slope in the Arctic Ocean // *Ocean Science*. 2018. V. 14. № 5. P. 1329–1347. <https://doi.org/10.5194/os-14-1329-2018>
43. *Pogojeva M., Polukhin A., Makkaveev P. et al.* Arctic In-shore Biogeochemical Regime Influenced by Coastal Runoff and Glacial Melting (Case Study for the Templefjord, Spitsbergen) // *Geosciences*. 2022. V. 12. P. 44. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010044>
44. *Qi D., Ouyang Z., Chen L. et al.* Climate change drives rapid decadal acidification in the Arctic Ocean from 1994 to 2020 // *Science*. 2022. V. 377. № 6614. P. 1544–1550. <https://doi.org/10.1126/science.abo0383>
45. *Rawlins M.A., Connolly C.T., McClelland J.W.* Modeling Terrestrial Dissolved Organic Carbon Loading to Western Arctic Rivers // *J. Geophys. Res. Biogeosciences*. 2021. V. 126. Iss. 10. <https://doi.org/10.1029/2021jg006420>
46. *Roy R.N., Roy L.N., Vogel K.M. et al.* The dissociation constants of carbonic acid in seawater at salinities 5 to 45 and temperatures 0 to 45 C // *Marine Chem.* 1993. V. 44. № 2–4. P. 249–267.
47. *Semiletov I.P., Pipko I.I., Repina I.A. et al.* Carbonate chemistry dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere–ice–water interfaces in the Arctic Ocean: Pacific sector of the Arctic // *J. Marine Sys.* 2007. V. 66. № 1–4. P. 204–226. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.05.012>
48. *Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö. et al.* Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nature Geosci.* 2016. V. 9. P. 361–365. <https://doi.org/10.1038/ngeo2695>
49. *Shapiro G.I., Huthnance J.M., Ivanov V.V.* Dense water cascading off the continental shelf // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2003. V. 108(C12). <https://doi.org/10.1029/2002JC001610>
50. *Stein R., Fahl K.* Holocene accumulation of organic carbon at the Laptev Sea continental margin (Arctic Ocean): sources, pathways, and sinks // *Geo-Marine Letters*. 2000. V. 20. № 1. P. 27–36.
51. *Sukhanova I.N., Flint M.V., Fedorov A.V. et al.* Phytoplankton of the Khatanga Bay, shelf and continental slope of the western Laptev Sea // *Oceanology*. 2019.

- V. 59. № 5. P. 648–657.
<https://doi.org/10.1134/S0001437019050205>
52. *Terhaar J., Kwiatkowski L., Bopp L.* Emergent constraint on Arctic Ocean acidification in the twenty-first century // *Nature*. 2020. V. 582. P. 379–383.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2360-3>
53. *Thor P., Bailey A., Dupont S. et al.* Contrasting physiological responses to future ocean acidification among Arctic copepod populations // *Glob. Change Biol.* 2018. V. 24. P. 365–377.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13870>
54. *Vonk J., Sánchez-García L., van Dongen B. et al.* Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia // *Nature*. 2012. V. 489. P. 137–140.
<https://doi.org/10.1038/nature11392>
55. *Wang S., Nath D., Chen W.* Nonstationary relationship between sea ice over Kara–Laptev seas during August–September and Ural blocking in the following winter // *Intl. J. Climatol.* 2021. V. 41. P. E1608–E1622.
<https://doi.org/10.1002/joc.6794>
56. *Wanninkhof R.* Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // *Limnol. Oceanogr. Methods*. 2014. V. 12. № 6. P. 351–362.
57. *Zhang Y., Yamamoto-Kawai M., Williams W.J.* Two decades of ocean acidification in the surface waters of the Beaufort Gyre, Arctic Ocean: Effects of sea ice melt and retreat from 1997–2016 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. e60119.
<https://doi.org/10.1029/2019GL086421>

Water Structure and Carbon Dioxide Flux Over the Laptev Sea Continental Slope and in the Vilkitsky Strait in the Autumn Season

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

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

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

^c*University of Hamburg, Hamburg, Germany*

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

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

In the frameworks of the program “Ecosystems of the Siberian Arctic seas”, carried out by Shirshov Institute of Oceanology RAS since 2007, studies of the structure of waters, spatial variability of the carbonate system parameters have been performed, and the intensity and direction of the carbon dioxide flux over the continental slope of the Laptev Sea and in the Vilkitsky Strait in September 2018 have been calculated. The presence of several main water masses that determine the structure of waters in the study area is shown. A strong spatial variability of the parameters of the carbonate system of sea waters, determined by the complexes of physical and chemical–biological processes, has been revealed. The intensity and direction of the carbon dioxide flux at the water–atmosphere boundary were calculated, ranging from -12 to $+4$ mmol m⁻² day⁻¹. It was revealed that the investigated area of the outer shelf of the sea and the continental slope of the Laptev Sea is an emitter of carbon dioxide into the atmosphere as of September 2018. The area of the Vilkitsky Strait, on the contrary, is an area of absorption of CO₂.

Keywords: Arctic, Laptev Sea, continental slope, water structure, carbonate system, carbon dioxide balance