

УДК 551.465

## СТРУКТУРА ВОД ПРОЛИВА БРАНСФИЛДА (АНТАРКТИКА) В ЯНВАРЕ 2020 г.: ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

© 2021 г. А. А. Полухин<sup>1</sup>\*, Е. Г. Морозов<sup>1</sup>, П. П. Тищенко<sup>2</sup>, Д. И. Фрей<sup>1</sup>, В. А. Артемьев<sup>1</sup>,  
Г. В. Борисенко<sup>1</sup>, А. В. Видничук<sup>3</sup>, Е. Н. Марьина<sup>2</sup>, Е. В. Медведев<sup>3</sup>, О. С. Попов<sup>2</sup>,  
А. М. Селиверстова<sup>1</sup>, А. Л. Чульцова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр “Морской гидрофизический институт РАН”, Севастополь, Крым

\*e-mail: polukhin@ocean.ru

Поступила в редакцию 20.10.2020 г.

После доработки 26.02.2021 г.

Принята к публикации 08.04.2021 г.

Проведены исследования абиотических характеристик вод в проливе Брансфилда на разрезе от Южных Шетландских островов до Антарктического полуострова. Зарегистрировано течение вдоль архипелага, направленное на северо-восток со скоростью течения 20–47 см/с. Оно отличается по температуре и солёности в ядре (2.7°C и 34.18‰). Глубина залегания нижней границы эвфотического слоя изменяется от 40 м вблизи Южных Шетландских островов до 80 м на шельфе Антарктического п-ова. Содержание кислорода и параметры карбонатной системы указывают на преобладание продукционных процессов над деструкционными в поверхностном слое центральной части пролива в исследуемый период. На шельфе Антарктического полуострова зафиксировано противотечение из моря Уэдделла, выделяющееся по насыщению кислородом (90%) и содержанию кремния (74 мМ). Всего в исследованном районе выделено четыре водных массы: антарктическая поверхностная вода, циркумполярная глубинная вода, модифицированная шельфовая вода северо-западной части моря Уэдделла, придонная вода пролива Брансфилда.

**Ключевые слова:** Южный океан, пролив Брансфилда, термохалинная структура, течение, биооптические параметры, гидрохимическая структура, биогенные элементы

DOI: 10.31857/S0030157421050105

### ВВЕДЕНИЕ

Пролив Брансфилда расположен между Антарктическим полуостровом и Южно-Шетландскими островами на границе моря Уэдделла и пролива Дрейка. Пролив ориентирован по линии юго-запад–северо-восток, его характерная ширина составляет 50 морских миль, длина – около 200 миль. Прибрежные пограничные течения пролива Брансфилда совместно с Антарктическим Циркумполярным течением (АЦТ) в проливе Дрейка являются важным фактором, влияющим на продукционные характеристики местной экосистемы [8]. Воды основных струй АЦТ в пролив Брансфилд не заходят, однако ответвление самой южной из его струй все-таки проникает в пролив и движется вдоль Южных Шетландских островов [16].

Воды пролива сформированы под воздействием пресноводного стока с островов, локального

прогрева в районе островного шельфа, затоков более теплых вод АЦТ, а также холодных вод моря Уэдделла. Циркумполярные воды проникают между островами Смита, Лоу, Бранта, на юго-западе смешиваются с проникающими через Антарктический пролив водами моря Уэдделла и затем формируют пограничное течение вдоль островов пролива. Течение распространяется на северо-восток, заглубляется до 400 м и достигает скорости 50 см/с [10]. Общая схема циркуляции в проливе достаточно хорошо изучена [23, 41]. В западной части пролива происходит заток относительно теплых вод с пониженной относительно окружающих вод солёностью из моря Беллинсгаузена, проливов Жерлаш и Дрейка. Эти воды формируют узкое струйное течение вдоль северной границы пролива [10, 31]. Совместно с южной ветвью АЦТ в проливе Дрейка это течение играет существенную роль в переносе вод на восток. Отдельный заток относительно холодных и солёных

вод происходит из моря Уэдделла вокруг о. Жуэн-виля и через Антарктический пролив; в дальнейшем эти воды распространяются вдоль Антарктического полуострова на юго-запад.

Пролив можно разделить на три основных бассейна — западный, центральный и восточный, разделенных подводными хребтами с глубинами менее 1000 м [31]. Бассейны, входящие в состав пролива, углубляются на северо-восток, средняя глубина “западного” бассейна 1100 м, для “восточного” эта величина достигает 2000 м. Воды восточного бассейна более распресненные и прогретые, чем воды центрального: средняя потенциальная температура на разрезе вдоль пролива на поверхности [31] изменяется в пределах от 0.5 до  $-1.0^{\circ}\text{C}$ , а поверхностная соленость достигает 33.8 епс, в то время как в центральной части пролива температура составляет менее  $-1.8^{\circ}\text{C}$ , а соленость на поверхности составляет 34.2 и более епс. В целом акватория пролива Брансфилда расположена в районе взаимодействия нескольких фронтов (Южная граница АЦТ и Антарктический пришельфовый фронт [5, 30, 36]), где происходит взаимодействие вод АЦТ и шельфовых вод северо-западной части моря Уэдделла [4, 39], что ведет к активизации биологических процессов [3, 21].

Подобные особенности термохалинных условий в различных частях пролива находят свое отражение в распределении биогидрохимических показателей. Особенно отличаются прибрежные воды заливов некоторых островов архипелага от вод пролива. В работах [27, 35] сообщается о высоких концентрациях биогенных элементов (в 2–10 раз выше) в стоках вод в заливах о. Десепшен и о. Кинг Джордж (бухта Адмиралти) по сравнению с западной и центральной частями поверхностного слоя пр. Брансфилда соответственно. Важно отметить, что такой эффект наблюдается и в Арктике, у побережья Новой Земли, где концентрации силикатов и минерального азота в ледниковых водотоках сильно превосходит концентрацию в поверхностных водах Карского моря. Там проявления стока по биогенным элементам прослеживаются на расстоянии до 40 км от источника, и от такого источника может возникать локальное цветение фитопланктона и увеличение первичной продукции [7]. Содержание кремния в поверхностных водах значительно выше, чем в водах АЦТ и, по литературным данным, может достигать 60–80  $\mu\text{M}$ , что связано с влиянием материка, а также с подъемом глубинных вод, богатых кремнием [8]. В гидрохимической структуре вод пролива стоит отметить глубинный минимум кислорода, приуроченный к изобатам 500–600 м и имеющий от 5 мл/л вблизи Юж. Шетландских о-вов до 6 мл/л на шельфе Антарктического п-ова [1]. Абсолютный минимум кислорода в проливе характеризует водную массу Циркум-

полярной глубинной воды (ЦГВ), которая также выделяется по температуре выше  $0^{\circ}\text{C}$ .

Известно, что в целом Южный океан характеризуется низкими значениями первичной продукции. В то же время в пр. Брансфилда этот параметр относительно высокий [24]. Например, первичная продукция по данным [25] в центральной части пролива не превышает  $1 \text{ гС/м}^2$ , а в восточном бассейне ее величина увеличивается до  $3 \text{ гС/м}^2$ . Между тем, район пролива Брансфилда имеет важное положение во всей антарктической экосистеме, так как в его акватории происходит размножение *Euphausia superba Dana* — антарктического криля, являющегося кормовой базой для всей ихтиофауны, пингвинов, китообразных и ластоногих Антарктиды [1, 19, 33].

Несмотря на достаточно подробную изученность термохалинных характеристик пролива и динамики его вод [10, 20, 26, 34, 38, 40, 41], публикаций по гидрохимическим исследованиям было немного, а биологические исследования охватывают либо верхний слой до 500 м, либо прибрежные зоны [29, 34].

В рамках экосистемных исследований Атлантического сектора Южного океана [11] задачей данной работы является продолжение мониторинга вод пролива Брансфилд по всей водной толще с исследованием гидрохимических характеристик вод, который был проведен в 79-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в январе 2020 г. Результаты исследований освещают современное состояние структуры и динамики вод в проливе Брансфилда.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе 79-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” (январь 2020 г.) в проливе Брансфилда был выполнен разрез из 9 гидрологических станций (6587–6595), на 7-ми из которых проводился отбор проб батометрами по вертикали (рис. 1). Расстояние между ними варьировало от 1.5 миль в северо-западной до 12 миль в центральной и юго-восточной частях пролива [12]. Протяженность разреза от о. Гринвич (Южные Шетландские о-ва) до шельфа Антарктического п-ова составила 93 км, максимальная глубина — 1436 м.

Измерение температуры и электропроводности (солености) проводилось STD-зондом SBE911, скорости течений — акустическим погружаемым профилографом LADCP Workhorse Sentinel.

Измеренные оптические параметры среды включали в себя показатель ослабления (ПО,  $\text{m}^{-1}$ ), характеризующий мутность вод, флуоресценцию (усл. ед., косвенно показывающую содержание хлорофилла “а” в воде) и фотосинтетически активную радиацию (ФАР). Показатель ослабления и флуоресценция измерялись разработанным со-

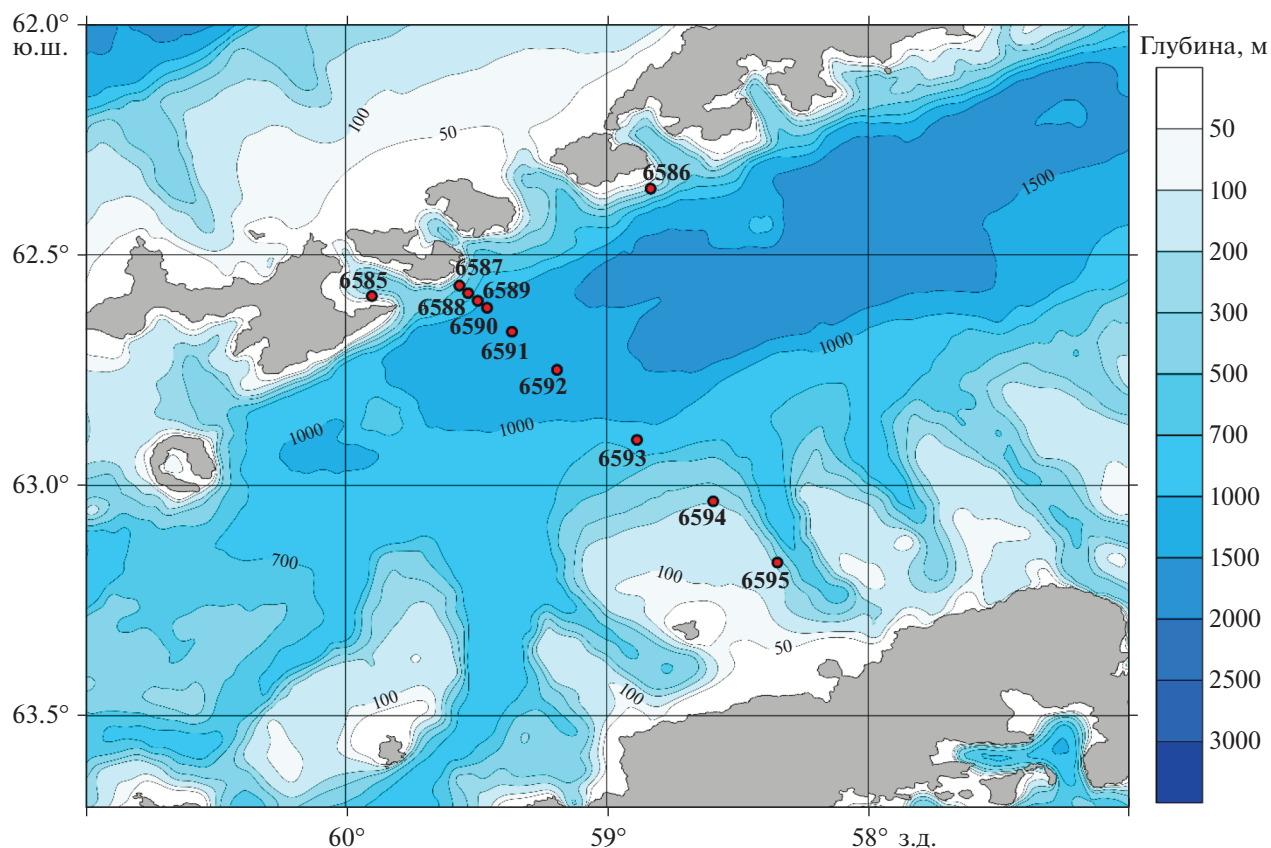


Рис. 1. Схема расположения гидрологических станций с отбором проб на разрезе в проливе Брансфилда.

трудниками Лаборатории оптики океана ИОРАН прибором ПУМ-200 с подключенным флуориметром Minitracka-II (Chelsey). Измерение ФАР проводилось погружаемым модулем “ALi-COR” с двумя фотодиодными датчиками LI-192. Подробная методика измерений оптических параметров водной среды представлена в [6].

Пробы воды отбирались пятилитровыми пластиковыми батометрами Нискина (General Oceanics) на заданных горизонтах исходя из гидрологической структуры. Пробы на определение биогенных элементов отбирали в полипропиленовые бутылки объемом 0.5 л. Пробы на определение pH и общей щелочности – в стеклянные бутылки с притертой пробкой объемом 0.7 л. Определяли следующие параметры: растворенный кислород, pH, щелочность, главные биогенные элементы (фосфаты, силикаты, нитраты, нитриты, аммонийный азот). Из данных pH и щелочности рассчитывались параметры карбонатной системы ( $pH_{in situ}$ , DIC – общий растворенный неорганический углерод,  $pCO_2$  – парциальное давление углекислого газа). На основе данных концентрации кислорода, температуры и солености рассчитывалось кажущееся потребление кислорода (AOU – apparent oxygen utilization).

Растворенный кислород в морской воде анализировали с помощью модифицированного метода Винклера с использованием микробюретки Brinkman/Dosimate-765. Расчет насыщения кислородом производили по формуле Вейсса [15], кажущегося потребления кислорода – в соответствии с [37].

Измерения pH (в шкале total) выполняли при температуре  $15 \pm 0.05^\circ C$  в проточной ячейке объемом  $\sim 80 \text{ cm}^3$ . Термостатирование проводили с помощью термостата фирмы Lauda Alpha RA 8. Для измерения pH использовалась ячейка безжидкостного соединения, со стеклянными pH- и  $-pNa$  электродами фирмы “Orion” [17]. Анализ на щелочность проводился прямым титрованием в открытой ячейке соляной кислотой (0.02 M) со смешанным индикатором (метилловый красный + метиловый голубой). В процессе титрования пробы воды продували потоком воздуха, освобожденным от углекислого газа и аммиака. Точку эквивалентности (pH около 5.4–5.5) определяли визуально до перехода зеленоватого окрашивания в слабо-розовое. Титр HCl устанавливали ежедневно по стандартному раствору  $Na_2CO_3$ , приготовленному весовым способом с учетом ва-

куумной поправки [15]. Титрование осуществляли бюреткой Brinkman/Dosimat-665.

Определение содержания растворенного неорганического фосфора ( $\text{PO}_4^-$ ) проводилось колориметрически по модифицированному методу Морфи и Райли. Определение растворенного неорганического кремния ( $\text{SiO}_3^-$ ) проводилось колориметрически по голубому кремнево-молибденовому комплексу (метод Королева). Определение нитритного азота ( $\text{N-NO}_2^-$ ) проводилось колориметрически с использованием единого цветного реактива. Определение нитратного азота ( $\text{N-NO}_3^-$ ) так же проводилось колориметрически, после его восстановления в кадмиевых колонках до нитритного азота. Аммонийный азот ( $\text{N-NH}_4^-$ ) определялся фенолят-гипохлоритной реакцией по методике Сэджи–Солорзано. Подробное описание методик приведено в [13, 15].

Измеряемое парциальное давление углекислого газа ( $\text{pCO}_2$ ) проводилось при отборе воды мембранным погружаемым насосом. Равновесное парциальное давление углекислого газа в воде определяли с помощью эквивалентатора, о наступлении равновесия судили по стабилизации показаний газоанализатора *LI-7000 DP*. Детальное описание метода дано в работе [18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Гидрофизическая структура вод*

Распределения температуры и солености вод на разрезе через пролив Брансфилда показаны на рис. 2 (а, б). Воды на шельфе Южных Шетландских островов характеризовались относительно высокими значениями температуры воды (до  $1.98^\circ\text{C}$ ) и низкой соленостью (34.13 епс). Южнее на 30 км на глубинах 0–10 м залегало ядро теплых вод со значениями температуры  $2.7^\circ\text{C}$  и соленостью 34.18 епс. Влияние этих вод распространялось до глубины 500 м на севере до 50 м на шельфе Антарктического полуострова (рис. 2а). Несоответствие расположения областей максимума температуры воды и минимума солености можно объяснить тем, что теплые шельфовые воды Южных Шетландских островов, характеризующиеся низкой соленостью, соединялись с водами АЦТ, также характеризующимися высокой температурой ( $1-2^\circ\text{C}$ ), но более высокой соленостью [26, 32]. Воды моря Уэдделла характеризуются отрицательными температурами воды и высокой соленостью (34.40–34.54 епс).

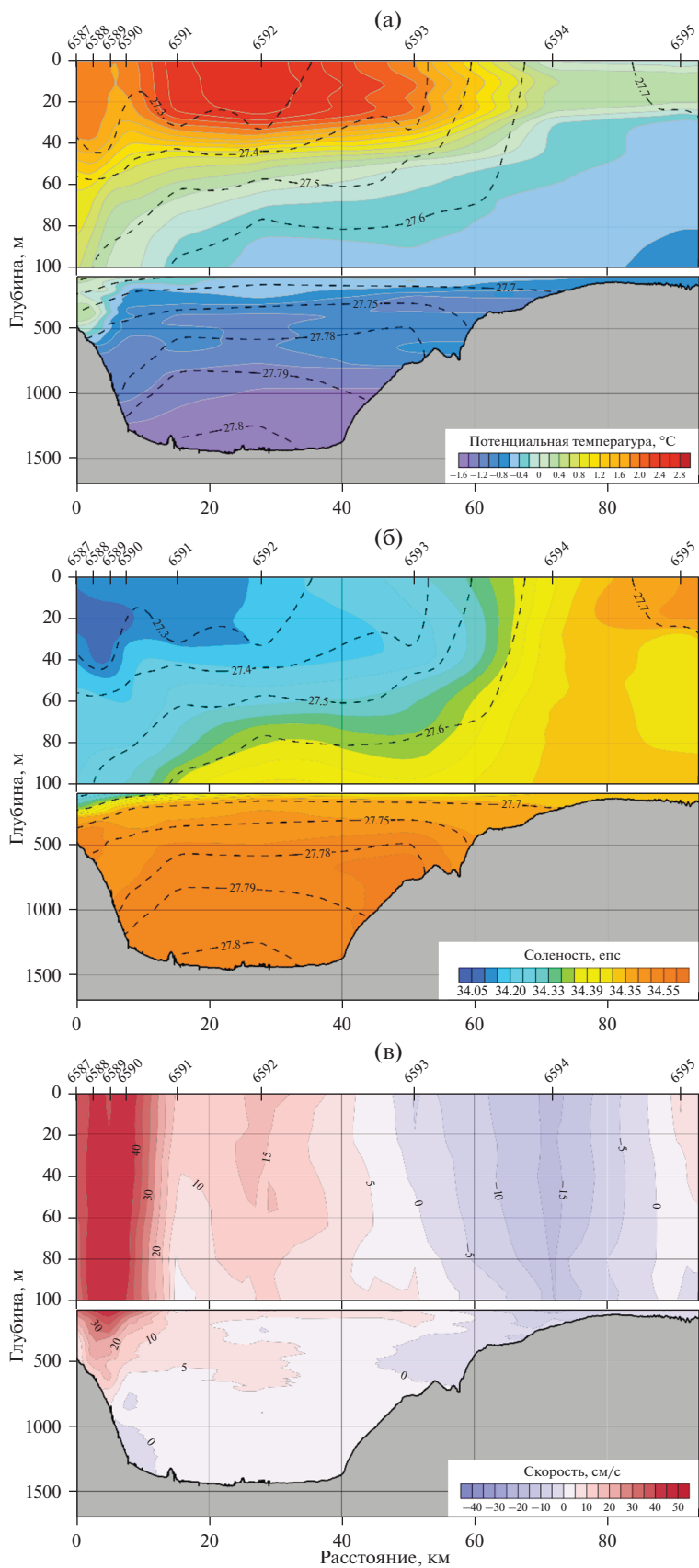
На разрезе, выполненном через пролив Брансфилда, зафиксировано сильное течение на северо-восток вдоль Южно-Шетландских островов и слабое течение на юго-запад вдоль Антарктического полуострова. Отмечаются различные ха-

рактеристики водных масс в этих двух течениях. Скорости течения в проекции на поперечное разрезе направление (в проекции на северо-восток) показаны на рис. 2в. Узкое струйное течение вдоль северной части пролива является основной особенностью циркуляции на этом разрезе. Скорости течения у поверхности достигают 47 см/с, ширина струи на поверхности со скоростями больше 30 см/с составляет 12 км. Скорость остается постоянной в верхнем слое глубиной 100 м; скорости на глубине 100 м достигают значений 45 см/с, т.е. столько же, сколько на поверхности. На большей глубине течение начинает ослабевать – скорость на глубине 500 м составляет 20 см/с. Максимум скорости течения на юго-запад у берега Антарктического полуострова наблюдается на станции 6594 и достигает 15 см/с в поверхностном слое. Скорость течения в глубоководной части пролива ожидаемо мала, в слоях глубже 700 м не превышает 5 см/с.

### *Оптические особенности вод*

Максимальные значения показателя ослабления и флуоресценции наблюдаются в северо-западной части пролива в приповерхностном слое толщиной ~90 м (рис. 3). Это связано с тем, что в северо-западную часть пролива, вдоль Южных Шетландских островов выделяются более продуктивные воды (судя по насыщению кислородом), в юго-восточную часть пролива поступают менее продуктивные модифицированные шельфовые воды из северо-западной части моря Уэдделла. Максимальные значения показателя ослабления и флуоресценции наблюдаются в приповерхностном слое ст. 6591:  $0.76 \text{ м}^{-1}$  и 0.5 у.е. соответственно. По данным лабораторных измерений максимальные значения концентрации хлорофилла “а” в поверхностном слое были на ст. 6591 (1.28 мкг/л), минимальные на прибрежной ст. 6595 (0.37 мкг/л). Такие значения биооптических характеристик в поверхностных водах разреза могут быть связаны как с “цветением” фитопланктона и синтезом первичной продукции [24], так и с влиянием талых вод на распределение биооптических параметров [22].

На станциях 6587–6590 измерения ФАР не проводились, потому что они выпали на темное время суток. Приведенное на рис. 3 положение границы 1% ФАР показывает глубину эвфотического слоя, где возможна фотосинтетическая активность фитопланктона. Глубина этого слоя варьирует от 42 м в северной части разреза, на границе максимума течения, до 80 м на станции 6594, в южной части разреза, где зафиксировано противотечение из моря Уэдделла. Если экстраполировать на станции, где ФАР не измерялась, получится глубина эвфотического слоя в северной части разреза порядка 40 м. Таким образом,



**Рис. 2.** Распределение на разрезе: (а) – потенциальной температуры, °C; (б) – солёности, епс; (в) – северной компоненты скорости течения, см/с.

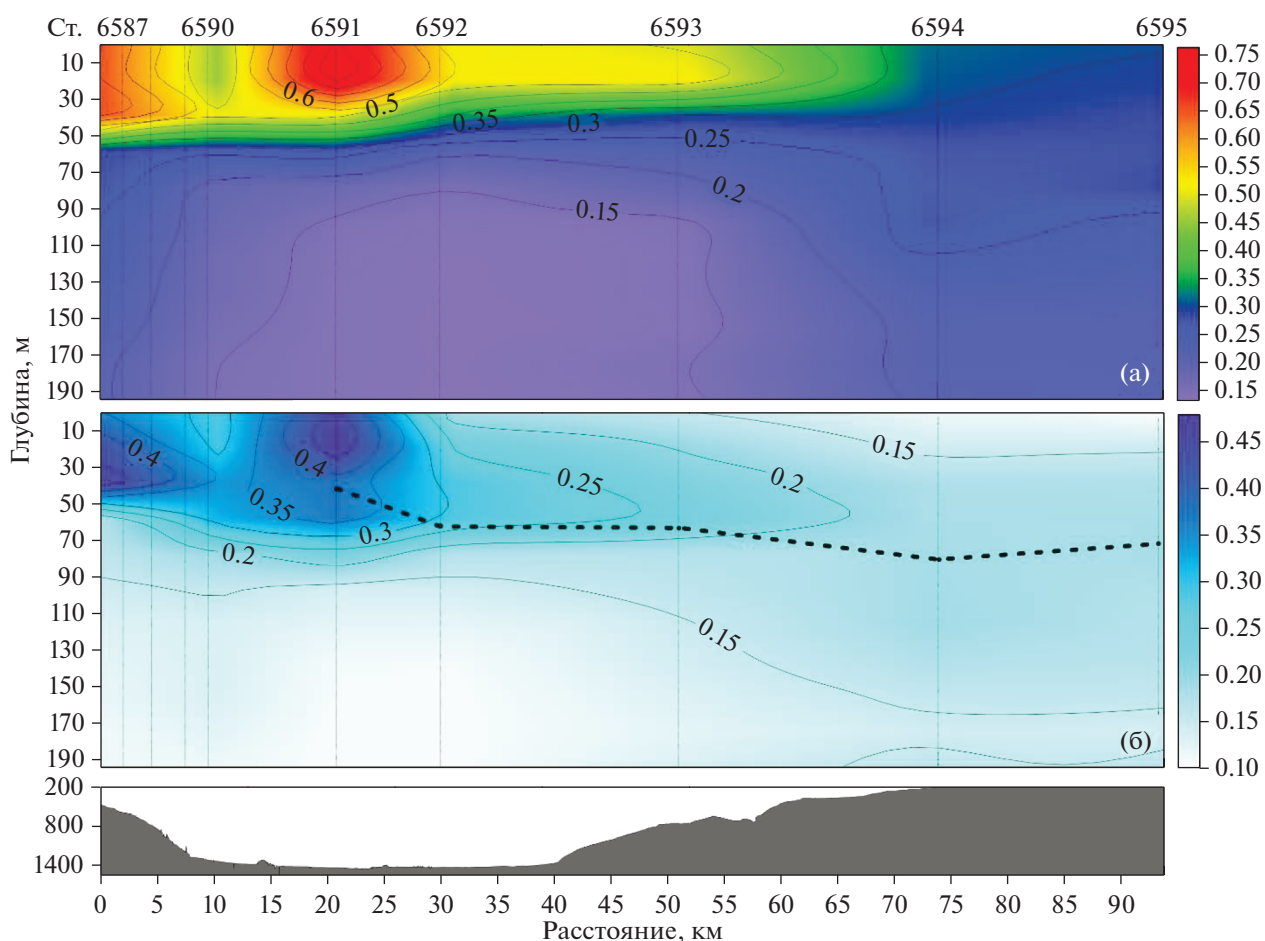


Рис. 3. Распределение на разрезе: (а) – показателя ослабления,  $\text{м}^{-1}$ ; (б) – флуоресценции. Черная штриховая линия на рис. 2б показывает глубину 1% ФАР

толщина деятельного слоя вод в проливе Брансфилда между северной частью, где локализована ветвь АЦТ в два раза меньше, чем в южной, где подтверждено противотечение из моря Уэдделла.

#### Гидрохимическая структура вод

Гидрохимическая структура вод пролива Брансфилд подчеркивает термохалинную структуру и основную схему динамики вод в этом районе. Вертикальное распределение содержания растворенного кислорода является хорошим маркером для выделения водных масс в Антарктике. Согласно [10, 14], в северо-западную часть пролива Брансфилда вторгается южная струя (АЦТ), теплые воды которой заглубляются на 400 м и распространяются на северо-восток. На вертикальном распределении кислорода (рис. 4а) на глубине 350–400 м в северной части разреза выделяется ядро пониженных концентраций кислорода – меньше 6 мл/л, что соответствует степени насыщения менее 75% (рис. 4б).

В юго-восточной части пролива Брансфилда происходит вторжение поверхностных высокосолёных модифицированных вод из моря Уэдделла через Антарктический пролив и вокруг Антарктического полуострова, которые распространяются вдоль южной части пролива на юго-запад, где поворачивают на северо-восток [10, 14]. Для поверхностных вод южной части разреза через пролив Брансфилд характерны концентрации кислорода от 7.3 до 7.8 мл/л (рис. 4 а), наблюдаемые также и в поверхностных водах на разрезе через Антарктический пролив. Степень насыщения кислородом этих вод немногим менее 100% и составляет порядка 95% вследствие их повышенной солёности (рис. 4 б). Шельфовые воды Южных Шетландских островов, ограничивающих пролив Брансфилда с северо-запада, подвержены локальному прогреву и пресноводному стоку [10], что также отражается на распределении кислорода в северной части разреза через пролив Брансфилда. Здесь концентрация кислорода в приповерхностных и поверхностных слоях вод достигает 7.8–8.0 мл/л (рис. 4а),

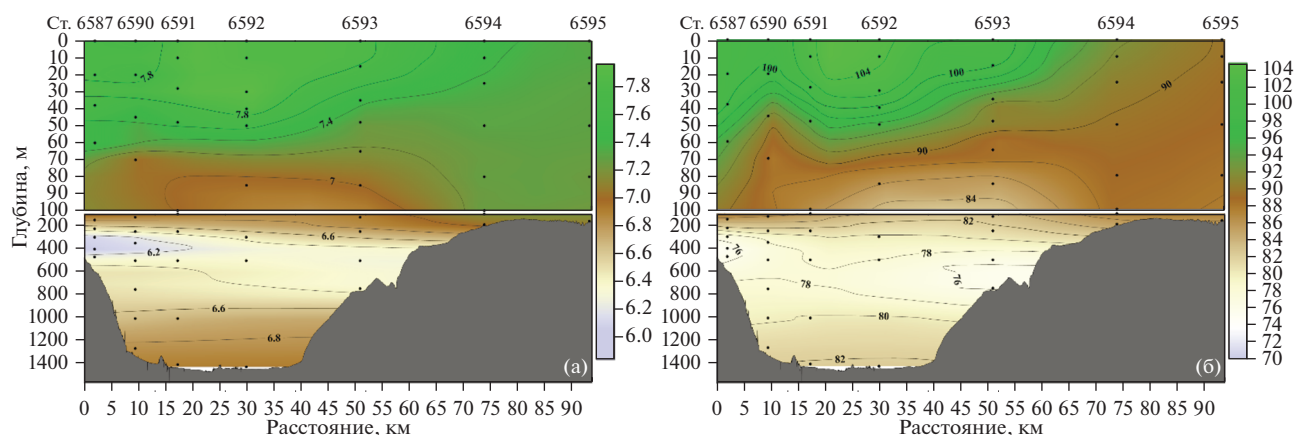


Рис. 4. Распределение на разрезе: (а) — растворенного кислорода, мл/л; (б) — насыщения вод растворенным кислородом, %.

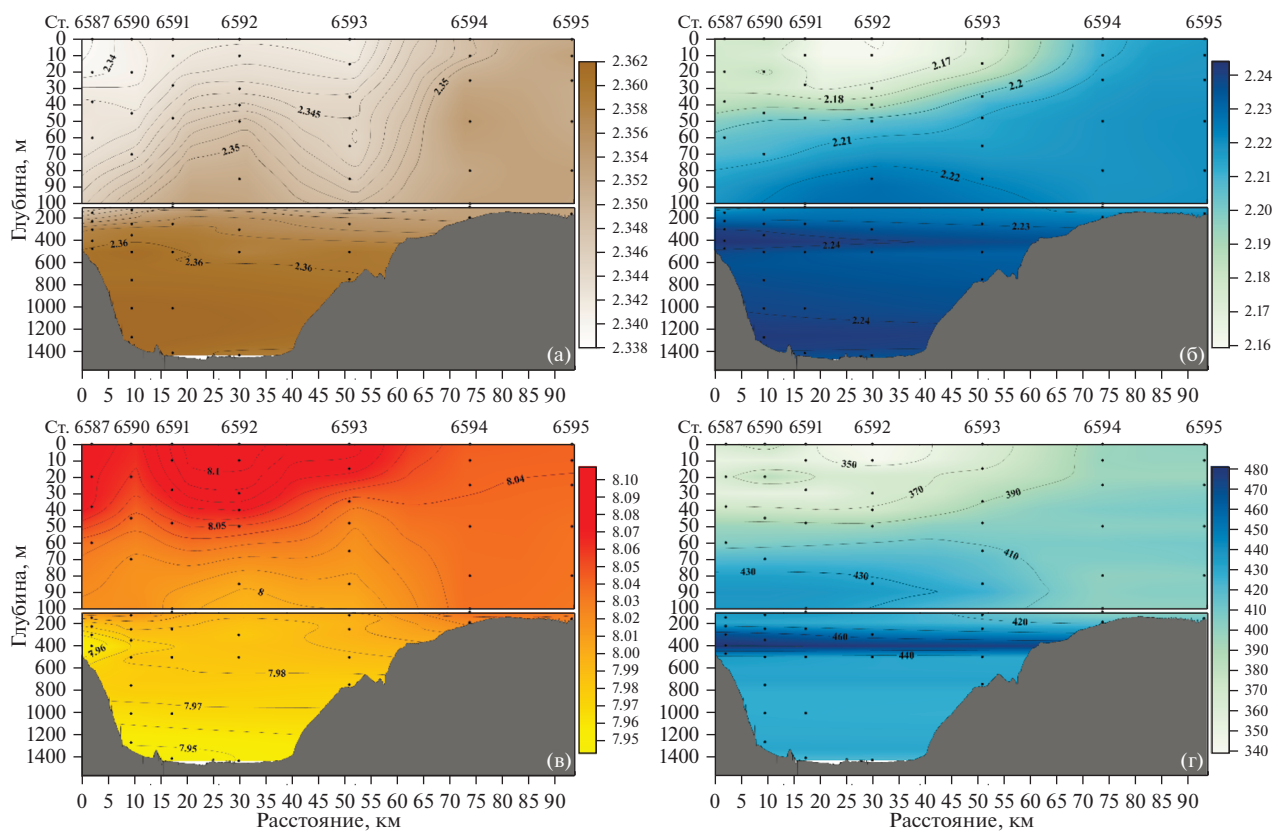


Рис. 5. Распределение на разрезе: (а) — нормированной щелочности, ммоль/кг; (б) — растворенного неорганического углерода, ммоль/кг; (в) — pH и (г) — рассчитанного парциального давления  $pCO_2$ , атм.

и степень насыщения вод кислородом составляет 100–104% (рис. 4 б).

Диапазон изменения общей щелочности (ТА) составлял для каждого из районов соответственно 2.316–2.342 ммоль/кг. Нормированная щелочность ( $NTA = TA \times 35/S$ ) вод, находящихся в северной части разреза, принимала наибольшие значения (рис. 5а). Эти воды следует относить к шельфовым водам Юж. Шетландских островов.

Воды, пришедшие из моря Уэдделла, характеризовались высокой соленостью и, как следствие, низкими значениями нормированной щелочности. Диапазон изменчивости NTA составлял 2.365–2.377 ммоль/кг.

Величины DIC в проливе Брансфилда изменялись от 2.159 до 2.247 ммоль/кг. Распределение DIC до глубины 200 м совпадало с распределением температуры воды (рис. 5б). Минимум DIC со-

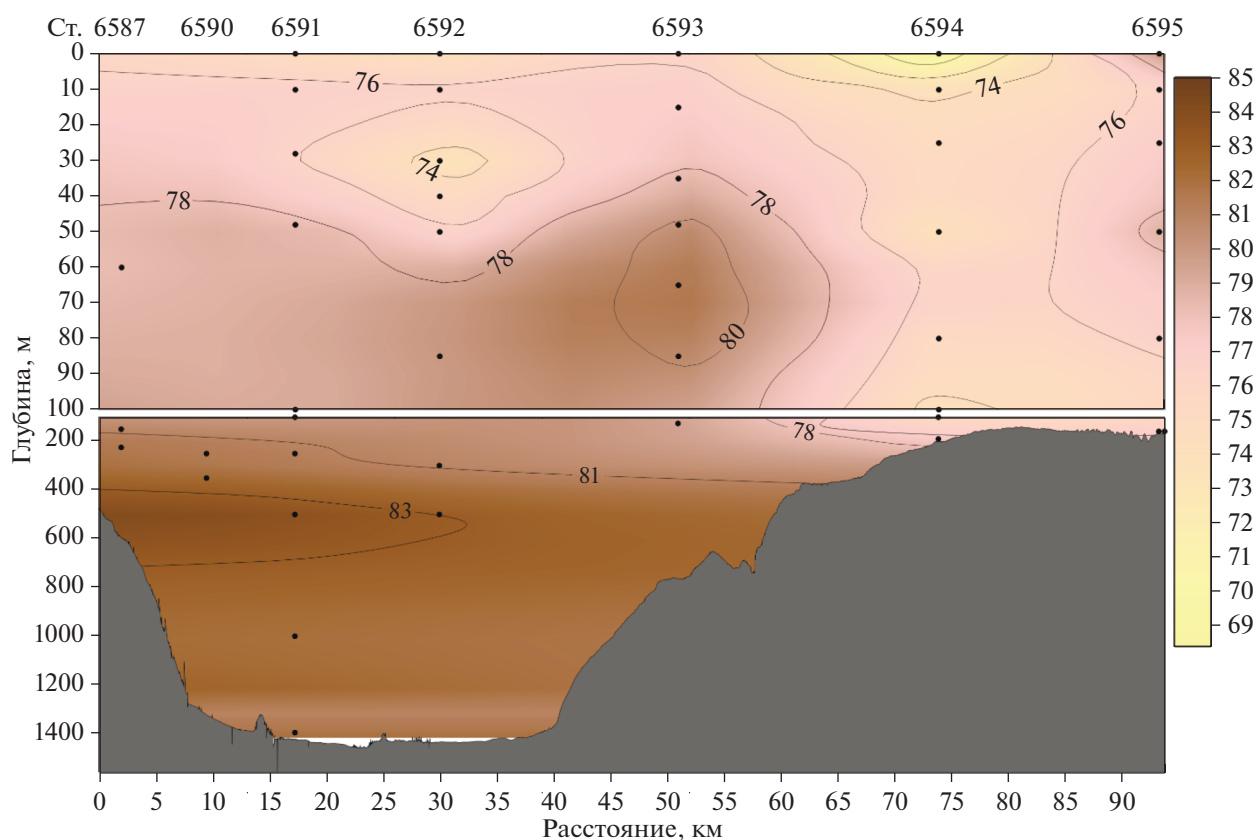


Рис. 6. Распределение силикатов,  $\mu\text{M}$  на разрезе.

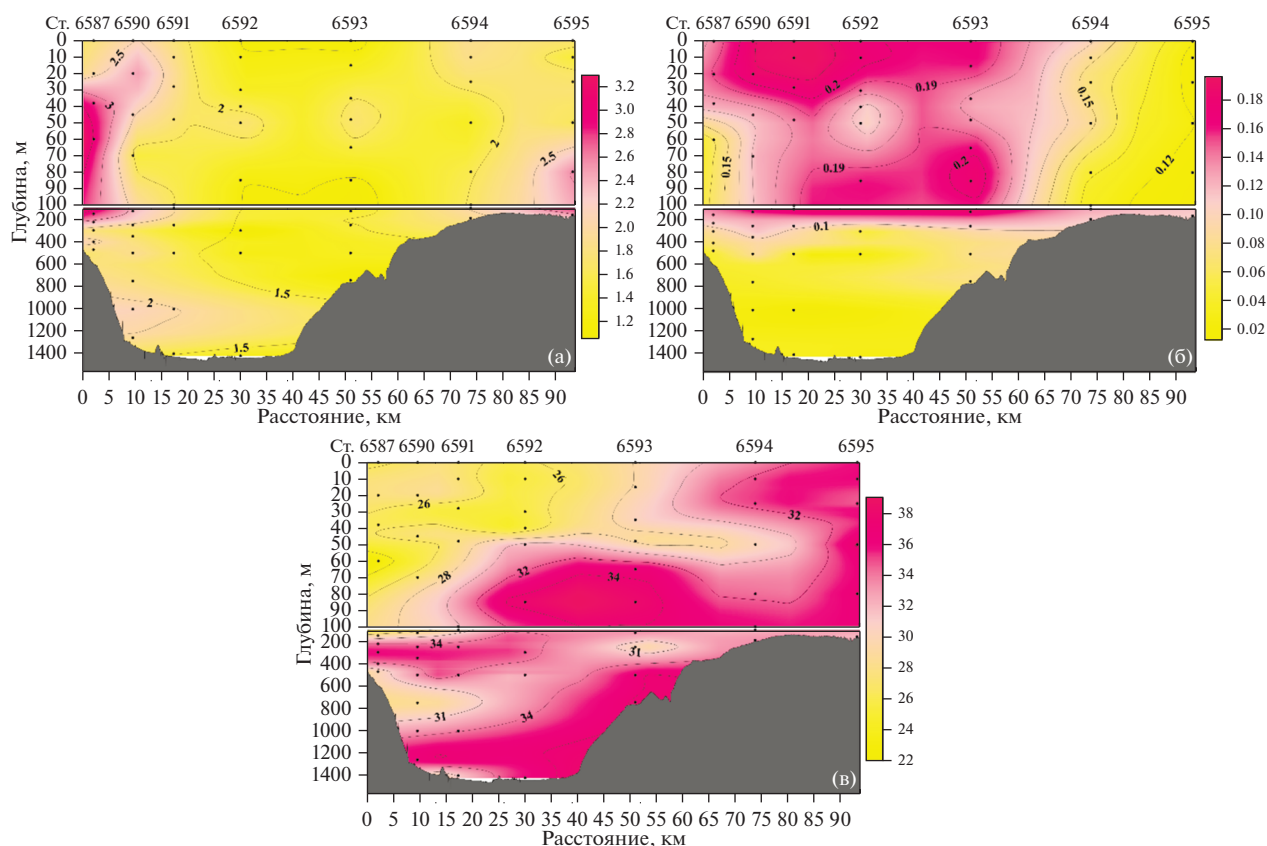
ответствовал максимальным значениям температуры воды. Ниже 200 м распределение DIC однородно, его значения изменялись от 2.225 до 2.245 ммоль/кг. Величины pH уменьшались с увеличением глубины. В проливе Брансфила значения pH изменялись от 7.94 до 8.11 (рис. 5в). Изменения  $p\text{CO}_2$  с глубиной были противоположны изменениям pH: с ростом глубины в морской воде происходило увеличение содержания углекислого газа. Наибольшие колебания значений  $p\text{CO}_2$  были отмечены в проливе Брансфила: от 335 до 479  $\mu\text{атм}$  (рис. 5г). Шельфовые воды характеризовались значениями pH 8.06–8.09 и величинами  $p\text{CO}_2$  355–375  $\mu\text{атм}$  (рис. 5в, 5г). Значение pH вод АЦТ достигало величины 8.10, а парциальное давление  $\text{CO}_2$  – 340  $\mu\text{атм}$ , что соответствует максимальным концентрациям кислорода (рис. 4а). Нижняя граница температурного градиента ( $0^\circ\text{C}$ ) соответствовала значению pH 8.03 и  $p\text{CO}_2$ , равному 405  $\mu\text{атм}$ , что соответствовало давлению  $\text{CO}_2$  в атмосфере. На глубинах ниже 100 м pH изменялся от 7.95 до 8.00, уменьшаясь с глубиной. Давление  $\text{CO}_2$  здесь изменялось от 425 до 475  $\mu\text{атм}$ , принимая наибольшие значения в слое 200–500 м. На шельфе Антарктического полуострова во всей толще вод распределения pH и  $p\text{CO}_2$  однородны,

параметры изменялись в диапазонах 8.03–8.06 и 395–405  $\mu\text{атм}$  соответственно (рис. 5в и 5г). Наибольшие отличия значений параметров карбонатной системы от общей вертикальной изменчивости были зарегистрированы на станции 6587 в проливе Брансфила, что предположительно было обусловлено относительно высокой температурой воды ( $0.04$ – $0.41^\circ\text{C}$ ) на горизонтах 150–470 м.

Вследствие высокого содержания взвешенного вещества (вероятно, биогенного происхождения) по данным датчика мутности, в части проб фосфаты не определяли. В южной части разреза, на шельфе Антарктического полуострова (ст. 6595), содержание фосфатов в слое 25–159 м составило от 2.17 до 2.22  $\mu\text{M}$ .

Содержание кремния в водах исследованной акватории варьировало от 69 до 84.5  $\mu\text{M}$ . В верхнем 100-м слое содержание кремния варьирует от 74 до 81  $\mu\text{M}$  (рис. 6). В центральной и южной части разреза содержание кремния составляет от 68  $\mu\text{M}$  в поверхностном слое на станции 6594 до 82  $\mu\text{M}$  в придонном слое станции 6593. По содержанию кремния (83  $\mu\text{M}$ ) выделяется слой ЦГВ на глубине 400–500 м. Станция 6594, расположенная в области противотечения из пролива Антарктик, отличается однородным распределением кремния глубже 15 м. Вблизи Антарктического п-ова со-





**Рис. 7.** Распределение на разрезе содержаний форм азота: (а)– аммонийного,  $\mu\text{M}$ ; (б) – нитритного,  $\mu\text{M}$  и (в) – нитратного,  $\mu\text{M}$ .

держание кремния возрастает до 76–79  $\mu\text{M}$ , что связано с его выщелачиванием из пород, слагающих берег полуострова.

Содержание аммонийного азота в водах пролива Брансфилда достаточно высокое и варьирует от 1.0 до 3.8  $\mu\text{M}$  (рис. 7а). Максимум его содержания отмечен в водах северной части разреза, на станции 6587, ближе всего расположенной к о. Гринвич. Здесь концентрация аммонийного азота составила 3.8  $\mu\text{M}$  на горизонте 60 м. На большей части разреза содержание аммонийного азота варьирует в интервале 1.0–1.8  $\mu\text{M}$ , лишь в южной части разреза в придонном слое станции 6595 отмечен локальный максимум, составивший 3.05  $\mu\text{M}$ .

Содержание нитритов, промежуточной формы окисления органического азота, в водах пролива варьировало от аналитического нуля до 0.22  $\mu\text{M}$  (рис. 7б). Максимум отмечается на станции 6591 в слое 0–30 м. Высокие концентрации нитритов ( $>0.15$   $\mu\text{M}$ ) характеризуют северную и центральную части разреза. На шельфе Антарктического полуострова в верхнем деятельном слое содержание нитритов варьирует в интервале 0.11–0.14  $\mu\text{M}$ . Глубже 300 м нитритная форма минерального азота близка к аналитическому нулю.

Содержание нитратного азота в водах пролива изменялось от 22.5 до 38.0  $\mu\text{M}$  (рис. 7в). Выделяется четкая дипольная структура в его распределении: минимальные концентрации отмечаются в верхнем 100-метровом слое северной части разреза, в центральной – до горизонта 50 м, а также в придонном слое станций 6587 и 6590. Концентрации нитратов выше 30  $\mu\text{M}$  характеризуют южные, наиболее мелководные, станции разреза 6594 и 6595, а также слой ниже 50 м в центральной части разреза. Наибольшее содержание нитратного азота наблюдается в придонных слоях на глубоководных станциях, так как традиционно содержание нитратов с глубиной увеличивается.

Поверхностный слой изученной акватории по отношению к углекислому газу не насыщен, парциальное давление варьирует в интервале 338–399  $\mu\text{атм}$ , при этом на станциях вблизи Антарктического полуострова эти значения близки к равновесным (400  $\mu\text{атм}$ ). Измеренное в ходе работ содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере составило 415–416  $\mu\text{атм}$ , что существенно превышает равновесное значение (рис. 8). Можно заключить, что поток  $\text{CO}_2$  на всей исследованной акватории направлен из атмосферы в воду, что может привести к смещению карбонатного равновесия, увеличив концен-

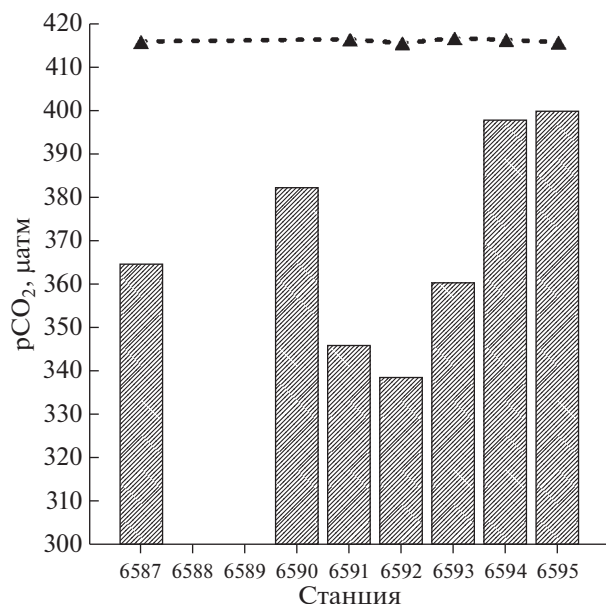


Рис. 8. Парциальное давление углекислого газа (μатм) в поверхностном слое вод вдоль разреза и в приводном слое атмосферы (черная пунктирная линия)

трацию ионов водорода, тем самым усиливая процесс асидификации. В работе [28] показано, что горизонт насыщения арагонитом, являющийся маркером процесса асидификации, может подняться в поверхностный слой уже к 2100 г., что приведет к тотальному изменению экосистемы вод Антарктики.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам исследований в акватории пролива Брансфилда можно выделить два района, исходя из динамики вод, а также термохалинной и гидрохимической структур: северный (островной) и южный (континентальный). Результаты измерений показывают выраженное течение в проливе, направленное на северо-восток, вдоль

шельфа Юж. Шетландских островов. Течение шириной 12 км и глубиной до 100 м со средней скоростью 30–40 см/с, максимальная измеренная скорость – 47 см/с. Глубже 100 м течение ослабевает и на глубине 500 м измеренная скорость составила 20 см/с. Данная динамическая структура характеризуется в верхнем 100-м слое температурой выше 0°C (2.7°C в ядре) и минимальной измеренной соленостью 34.18 епс и принадлежит к Антарктической Поверхностной водной массе (АПВ), теплой и наименее соленой в это время года [9], поступающей в пролив с водами АЦТ. Температура вод в основной струе течения существенно выше, чем показано в более ранних исследованиях [10, 41], что связано с сезонном проведении измерений. Оптические характеристики этой водной массы имеют высокий, по сравнению с окружающими водами, показатель ослабления. Это связано с наличием здесь фитопланктона, который косвенно определяется по флуоресценции хлорофилла “а”. Данный факт отражается и в высоком содержании растворенного кислорода в этих водах, и, как следствие, в пониженном парциальном давлении CO<sub>2</sub>, щелочности и рН, а распределяющий эффект проявляется в пониженной концентрации DIC (табл. 1). Интересным моментом является несоответствие глубины эвфотического слоя (1% ФАР) и слоя доминирования продукционных процессов над деструкционными (значения кажущегося потребления кислорода (АОУ) ниже нуля). Глубина залегания нижней границы эвфотического слоя изменяется от 40 м вблизи Южных Шетландских островов до 80 м на шельфе Антарктического п-ова. Превалирование продукции органического вещества над минерализацией приурочено к северной и центральной частям разреза на глубинах до 40 м. Воды шельфа Антарктического п-ова характеризуются преимущественно деструкционными процессами.

Необходимо отметить распределение биогенных элементов, оно также подчеркивает гидроло-

Таблица 1. Характеристики водных масс пролива Брансфилда

Водная масса	Параметр								
	T °C	S, ‰	DO, мл/л	pH <sub>ТОТ</sub>	NTA, ммоль/кг	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , μM	SiO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , μM	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , μM	DIC, ммоль/кг
АПВ	2.7	34.18	7.94	8.10	2.340	–	74.3	24.9	2.16
ЦГВ	0.41	34.53	5.86	7.95	2.358	–	83.5	33.5	2.24
ШУ	–0.77	34.44	7.08	8.02	2.352	2.17	78.6	31.1	2.22
ПБ	–1.47	34.54	6.92	7.95	2.359	–	–	37.4	2.23

Примечание. T – температура, S – соленость, DO – растворенный кислород, NTA – нормированная общая щелочность, PO<sub>4</sub><sup>-</sup> – фосфаты, SiO<sub>3</sub><sup>-</sup> – силикаты, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – азот нитратов, DIC – растворенный неорганический углерод. АПВ – антарктическая поверхностная вода, ЦГВ – глубинная циркулярная вода, ШУ – модифицированная шельфовая вода северо-западной части моря Уэдделла, ПБ – придонная вода пролива Брансфилда.

гическую структуру вод. Содержание фосфатов и силикатов в этих водах соответствует ранее наблюдавшимся распределениям и абсолютным содержаниям [2, 9, 27]. Высокие концентрации аммонийного азота, по-видимому, связаны как с окислением ОВ в результате активного цветения фитопланктона, так и со стоком с берегов Юж. Шетландских островов [27, 35]. Концентрации нитритного азота (порядка 0.2  $\mu\text{M}$ ) также указывают на активное протекание процесса разложения органического вещества на фоне высоких продукционных характеристик. Концентрации нитратного азота 22–26  $\mu\text{M}$  также характеризуют воды АЦТ [2].

Отдельно стоит рассмотреть глубинные воды в исследованном районе. Под АПВ на глубине порядка 500 м располагается ЦГВ, которая течет в том же направлении, но со скоростью 20 см/с, и также, как и АЦТ, характеризуется температурой выше 0°C, но минимумом содержания кислорода [1]. Для ЦГВ характерны высокие концентрации силикатов и нитратов [2, 4], что подтверждают и полученные нами результаты (табл. 1). Стоит отметить высокое парциальное давление углекислого газа (475  $\mu\text{atm}$ ) и низкий pH (7.95 в шкале total) в ЦГВ по сравнению с водами пролива, что можно объяснить происхождением этих вод и их возрастом. Главным же отличием вод ЦГВ от глубинных вод пролива из моря Уэдделла является то, что экстремумы содержания кислорода, силикатов и нитратов выражены достаточно четко. В эту структуру вносят дополнения воды моря Уэдделла, которые затекают в пролив Брансфилда с северо-востока, через пролив Антарктик, а затем разворачиваются и сливаются с ветвью АЦТ. При этом образуются большие горизонтальные градиенты плотности, и геострофическая струя АЦТ ускоряется [10, 41]. Скорость течения 15 см/с, а в придонном слое не превышает 5 см/с. Эти воды характеризуются температурой ниже 0°C и соленостью 34.4 епс; по оптическим характеристикам — воды чистые, глубина 1% ФАР (эвфотический слой) достигает 80 м. Насыщение вод кислородом не превышает 90%, что связано с низкими продукционными характеристиками этих вод. При этом парциальное давление углекислого газа находится вблизи равновесного значения 400  $\mu\text{atm}$  в верхнем 100-м слое. По биогенным элементам модифицированные воды моря Уэдделла характеризуются концентрациями фосфатов (2.1–2.3  $\mu\text{M}$ ) и силикатов (70–75  $\mu\text{M}$ ). При этом нитратный азот достигает концентрации 33  $\mu\text{M}$ , что характерно для этих вод [2] (табл. 1). Подтверждение затока именно вод моря Уэдделла можно определить по индексу отношения кремния к фосфору, который считается надежным маркером вод моря Уэдделла, когда превышает значение 33–35 [1]. Модифицированные воды моря Уэдделла движутся в слое 100–200 м вдоль шельфа Антарктического

полуострова на юго-восток (рис.3), индекс Si/P равен 36 в придонном слое (159 м) на станции 6595.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проливе Брансфилда взаимодействуют воды южной струи АЦТ и шельфовые воды северо-западной части моря Уэдделла. По результатам исследований в акватории пролива Брансфилда можно выделить два района, исходя из динамики вод, а также термохалинной и гидрохимической структур: северный (островной) и южный (континентальный). В исследованной акватории выделяются четыре водных массы: АПВ, ЦГВ, модифицированная вода северо-западной части моря Уэдделла и придонная вода пролива Брансфилда. Результаты измерений показывают выраженное течение в проливе, направленное на северо-восток, вдоль шельфа Юж. Шетландских островов. Течение шириной 12 км и глубиной до 100 м со средней скоростью 30–40 см/с, максимальная измеренная скорость — 47 см/с, характеризуется в верхнем 100-м слое температурой выше 0°C (2.7°C в ядре) и минимальной измеренной соленостью 34.18 епс. Оптические характеристики этой водной массы имеют высокий, по сравнению с окружающими водами, показатель ослабления (0.3–0.4  $\text{m}^{-1}$ ). Это связано с наличием здесь фитопланктона, который косвенно определяется по флуоресценции хлорофилла “а”. Данный факт отражается и в высоком содержании растворенного кислорода в этих водах, и, как следствие, в пониженных значениях парциального давления  $\text{CO}_2$ , щелочности и pH, а поступление в акваторию вод с более низкой соленостью проявляется в пониженной концентрации DIC. Интересным моментом является несоответствие глубины эвфотического слоя (1% ФАР) и слоя доминирования продукционных процессов над деструкционными (АОУ ниже нуля). Содержание силикатов варьировало от 68 до 75  $\mu\text{M}$  в поверхностном слое северной части разреза до 83  $\mu\text{M}$  в глубинных слоях, в центральной и южной частях разреза содержание кремния составляет от 68 до 82  $\mu\text{M}$ . Высокие концентрации аммонийного азота (от 1.0 до 3.8  $\mu\text{M}$ ), по-видимому, связаны как с окислением ОВ в результате активного цветения фитопланктона, так и со стоком с берегов Юж. Шетландских островов. Концентрации нитритного азота (порядка 0.2  $\mu\text{M}$ ) также указывают на активное протекание процесса разложения органического вещества на фоне высоких продукционных характеристик. Концентрации нитратного азота изменялись от 22.5 до 38.0  $\mu\text{M}$ . На глубинах 250–500 м выделяется Глубинная Циркумполярная водная масса, характеризующаяся низким содержанием кислорода, высоким содержанием кремния. Ниже 500 м происходит вентиляция вод пролива Брансфилда склоновым течением, что приводит к росту со-

держания растворенного кислорода в воде (от 78% в слое 600 м до 82% в придонном слое на глубине 1400 м). Поверхностный слой изученной акватории по отношению к углекислому газу является не насыщенным (338–399  $\mu\text{atm}$ ), поток  $\text{CO}_2$  на всей исследованной акватории направлен из атмосферы в воду.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность К.В. Артамоновой (ВНИРО) за конструктивную критику и ценные рекомендации.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках Государственного задания ИОРАН (№0128-2019-0008), Государственного задания Тихоокеанского океанологического института (№FWMM-2019-0007), Государственного задания Морского гидрофизического института (№ 0555-2019-0003). Анализ гидрофизических данных выполнен при поддержке гранта Президента РФ МК-1492.2021.1.5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанова Н.В., Артамонова К.В. Гидрохимическая структура вод в районах промысла антарктического криля *Euphausia superba* Dana // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 118–132.
2. Батрак К.В. Гидрохимическая характеристика различных модификаций антарктических вод // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 371–378.
3. Виноградов М. Е., Федоров К. Н. Фронтальные зоны юго-восточной части Тихого океана: биология, физика, химия. М.: Наука, 1984. 336 с.
4. Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Сток антарктических шельфовых вод в летний период на шельфе и материковом склоне моря Содружества и их влияние формирования донных вод Южного океана // Океанология. 2011. Т. 51. № 3. С. 393–408.
5. Грузинов В.М. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 272 с.
6. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В. и др. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. М.: ООО “ВАШ ФОРМАТ”, 2018. 140 с.
7. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Хлебонашев П.В. Поверхностный сток биогенных элементов с берега залива Благополучия (арх. Новая земля) // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 610–617.
8. Масленников В.В. Современные представления о крупномасштабной циркуляции вод Антарктики и пути массового дрейфа криля // Труды ВНИРО. Биологические ресурсы антарктического криля. 1980. С. 8–27.
9. Масленников В.В. Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М.: ВНИРО, 2003. 295 с.
10. Морозов Е.Г. Течения в проливе Брансфилд // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 6. С. 823–825.
11. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Спиридонов В.А. и др. Программа комплексных экспедиционных исследований экосистемы Атлантического сектора Южного океана (декабрь 2019–март 2020 г.) // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 1086–1088.
12. Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др. Исследования экосистемы атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 823–825.
13. 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.
14. Скрипалева Е.А. Особенности структуры вод и геострофической циркуляции в шельфовой зоне моря Уэдделла и пролива Брансфилда // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2004. № 10. С. 70–77.
15. Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. Бордовского О.К. и др. М.: ИОАН СССР, 1992. 198 с.
16. Тараканов Р. Ю., Гриценко А. М. Струи антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов // Океанология. 2018. Т. 58. №. 4. С. 541–555.
17. Тищенко П.Я. Кислотно-основное равновесие в морской воде // Исследования морских экосистем и биоресурсов. М.: Наука, 2007. С. 17–186.
18. 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.
19. Capella J.E., Quetin L.B., Hofmann E.E. et al. Models of the early life history of *Euphausia superba* – Part II. Lagrangian calculations // Deep-Sea Res. 1992. V. 39. P. 1201–1220.
20. Clowes A.J. Hydrology of the Bransfield Strait // Discovery Rep. 1934. V. 9. P. 1–64
21. Deacon G.E.R. Physical and biological zonation in the Southern Ocean // Deep-Sea Res. 1982. V.29. P. 1–15.
22. Dierssen H. M., Smith R. C. Case 2 Antarctic coastal waters: The bio-optical properties of surface meltwater // In: Ackleson S., Marra J. (Eds.) Proceedings Ocean Optics XV. Washington, D.C.: Office of Naval Research, Ocean, Atmosphere, and Space Dept., 2000.
23. Hofman E.E., Klinck J.M., Lascara C.M. et al. Water Mass Distribution and Circulation West of the Antarctic Peninsula and including Bransfield Strait // Foundations for ecological research west of the Antarctic Peninsula. 1996. V. 70. P. 61–80.
24. Holm-Hansen O., Mitchell B.G. Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region // Deep Sea Res., Part II. 1991. V. 39. P.961–980.
25. Isla J.A., Llope M., Anadon R. Size-fractionated mesozooplankton biomass, metabolism and grazing along a

- 50° N to 30° S transect of the Atlantic Ocean // J. Plankton Res. 2004. V. 26. P. 1301–1313.
26. Moffat C., Meredith M. Shelf–ocean exchange and hydrography west of the Antarctic Peninsula: a review // Phil. Trans. R. Soc. A. 2018. V. 376: 20170164.
  27. Nędzarek A. Sources, diversity and circulation of biogenic compounds in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica // Antarctic Science. 2008. V. 20. № 2. P. 135–145.
  28. Negrete-García G., Lovenduski N.S., Hauri C. et al. Sudden emergence of a shallow aragonite saturation horizon in the Southern Ocean // Nat. Clim. Change. 2019. V. 9. № 4. P. 313–317.
  29. Niiler P.P., Amos A., Hu J.-H. Water masses and 200 m relative geostrophic circulation in the western Bransfield Strait region // Deep-Sea Res. 1991. V. 38. P. 943–959.
  30. Orsi A.H., Whitworth Th. III, Nowlin W. D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep-Sea Res. 1995. V. 42. № 5. P. 641–673.
  31. Sangrà P., Gordo C., Hernández-Arencibia M. et al. The Bransfield current system // Deep Sea Res., Part I. 2011. V. 58. № 4. P. 390–402
  32. Schmidtko S., Heywood K., Thompson A. et al. Multidecadal warming of Antarctic waters // Science. 2014. V. 346. № 6214. P. 1227–1231.
  33. Siegel V., Watkins J.L. Distribution, biomass and demography of Antarctic krill, *Euphausia superba* // In: Siegel V. (Ed.) Biology and ecology of Antarctic krill. Advances in Polar Ecology. Springer, Cham., 2016. P. 21–100.
  34. Sievers H.A. Descripción de las condiciones oceanográficas físicas, como apoya al estudio de la distribución y comportamiento del krill // Instituto Antártico Chileno, Scientific Series. 1982. V. 28. P. 87–136.
  35. Sturz A.A., Gray S.C., Dykes K. et al. Seasonal changes of dissolved nutrients within and around Port Foster Deception Island, Antarctica // Deep Sea Res., Part II. 2003. V. 50. № 10–11. P. 1685–1705.
  36. Thompson A.F., Heywood K.J., Thorpe S.E. et al. Surface circulation at the tip of the Antarctic Peninsula from drifters // J. of Physical Oceanography. 2009. V. 39. № 1. P. 3–26.
  37. Weiss R.F. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater // Deep-Sea Res. 1970. V. 17. P. 721–735.
  38. Wilson C., Klinkhammer G.P., Chin C.S. Hydrography within the Central and East Basins of the Bransfield Strait, Antarctica // J. of Physical oceanography. 1999. V. 29. № 3. P. 465–479.
  39. Whitworth III T., Orsi A. M., Kim S. J. et al. Water masses and mixing near the Antarctic Slope Front // Ocean, ice, and atmosphere: interactions at the Antarctic continental margin. 1985. V. 75. P. 1–27.
  40. Whitworth III T., Nowlin Jr W.D., Orsi A.H. et al. Weddell Sea Shelf Water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia Confluence // Deep-Sea Res. 1994. V. 41. P. 629–641.
  41. Zhou M., Niiler P.P., Zhu Y. et al. The western boundary current in the Bransfield Strait, Antarctica // Deep Sea Res., Part I. 2006. V. 53. P. 1244–1252.

## Water Structure in the Bransfield Strait (Antarctica) in January 2020: Hydrophysical, Optical and Hydrochemical Features

A. A. Polukhin<sup>a, #</sup>, E. G. Morozov<sup>a</sup>, P. P. Tishchenko<sup>b</sup>, D. I. Frey<sup>a</sup>, V. A. Artemiev<sup>a</sup>,  
G. V. Borisenko<sup>a</sup>, A. V. Vidnichuk<sup>c</sup>, E. N. Marina<sup>b</sup>, E. V. Medvedev<sup>c</sup>, O. S. Popov<sup>b</sup>,  
A. M. Seliverstova<sup>a</sup>, and A. L. Chultsova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia*

<sup>c</sup>*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Crimea*

<sup>#</sup>*e-mail: polukhin@ocean.ru*

The abiotic characteristics of the waters in the Bransfield Strait were studied in the section from the South Shetland Islands to the Antarctic Peninsula. The Bransfield Current was registered along the archipelago, directed to the northeast with a current velocity 20–47 cm/s. It differs in temperature and salinity in its core (2.7°C and 34.18‰). The depth of the lower boundary of the euphotic layer varies from 40 m near the South Shetland Islands to 80 m on the shelf of the Antarctic Peninsula. The oxygen content and parameters of the carbonate system indicate the predominance of production processes over destructive ones in the surface layer of the central part of the Strait during the investigation period. On the shelf of the Antarctic Peninsula, a counterflow from the Weddell Sea was recorded, distinguished by the oxygen saturation (90%) and silica (74 μM). In total, four water masses were identified in the studied area: Antarctic Surface Water, Deep Circumpolar Water, modified water of the north-western Weddell Sea shelf, Bottom Bransfield Water.

**Keywords:** Southern Ocean, Bransfield Strait, thermohaline structure, current, bio-optical parameters, hydrochemical structure, nutrients