

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНЫХ МАСС ПРОЛИВА БРАНСФИЛД ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ААНИИ 2016–2022 гг.

А. С. Макаров*, Н. Н. Антипов, С. В. Кашин, М. С. Молчанов**

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Россия, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38,*

**e-mail: makarov@aari.ru*

***e-mail: mms@aari.ru*

В статье представлены результаты анализа данных глубоководных океанологических наблюдений, проводившихся учеными ААНИИ в проливе Брансфилд с 2016 г. по 2022 г. Пролив Брансфилд отличается сложной динамикой, уникальными водными массами, высокой биопродуктивностью. Выполненные ранее исследования позволили составить представление о структуре и характеристиках водных масс, циркуляции вод, особенностях ледового режима. В настоящее время на фоне наблюдаемых изменений климата актуальным является мониторинг изменений состояния вод океана. Основные наблюдения судами ААНИИ проводятся на регулярно повторяющемся разрезе через центральную котловину пролива Брансфилд, от залива Максвелл до материкового склона Антарктического полуострова. Ряд наблюдений состоит из шести реализаций разреза с дискретностью 1 год. Наблюдения на разрезе через восточную котловину пролива проводились дважды – в 2018 г. и 2022 г. Установлены существенные различия в характеристиках и динамике водных масс пролива между реализациями повторяющихся разрезов. Температура и соленость придонного слоя Глубинной воды пролива Брансфилд (ГВБ), заполняющей абиссаль центральной котловины, изменялась в пределах от -1.578 до -1.797 °C и от 34.555 до 34.598 епс соответственно. Тенденция на потепление более, чем на 0.2 °C (до -1.578 °C) и опреснение на 0.03 епс (до 34.555 епс), наблюдавшаяся в период 2018–2020 гг., нарушена новым похолоданием на 0.2 °C (до -1.747 °C) и ростом солености до 34.593 епс за год. Установлена изменчивость характеристик течения пролива Брансфилд (ТПБ), проявившаяся в колебаниях горизонтального (от 10 до 20 км) и вертикального (от 200 до 550 м) размеров потока. Спорадически появляющийся язык глубинной воды из Антарктического циркумполярного течения ниже потока ТПБ зафиксирован только в данных, полученных в 2020–2022 гг. В этот период характеристики ядра показали заметную изменчивость глубины залегания ядра (в диапазоне 320–450 м), температуры (от 0.460 до 0.891 °C) и солености (34.582–34.612 епс). Разрез через восточную котловину пролива позволил обнаружить повышение за 4 года средней температуры слоя ГВБ мощностью 1200 м на 0.25 °C (с сопутствующим ростом солености на 0.02 епс).

Ключевые слова: пролив Брансфилд, Антарктический полуостров, течение Брансфилда, водная масса, Глубинная вода пролива Брансфилд, Циркумполярная глубинная вода, центральная котловина пролива Брансфилд, восточная котловина пролива Брансфилд

Введение

В принятом в 2020 г. плане проведения «Десятилетия ООН, посвященного науке об океане в интересах устойчивого развития» (в дальнейшем, Десятилетие), в частности отмечается отставание в объеме научных знаний о полярных регионах и Южном океане в сравнении с другими районами Мирового океана. Акцент на Южном океане понятен, его изученность уступает многим другим регионам Мирового океана, а его воды являются важнейшим климатообразующим фактором. И хотя к настоящему времени получили значительное развитие современные автономные системы наблюдений за океаном (спутниковые наблюдения за льдами и поверхностью океана, дрейфующие буи, датчики, установленные на морских млекопитающих и др.), важными остаются и глубоководные судовые наблюдения, позволяющие получить информацию, в том числе и о состоянии глубинных слоев океана, отличающиеся большей точностью измерений и более широким спектром наблюдаемых параметров.

В настоящей статье отражаются некоторые итоги экспедиционных океанологических исследований за трехлетний период реализации проекта «Комплексные многодисциплинарные исследования и мониторинг экосистем в стратегически важных районах южной Атлантики».

В рамках проекта заявлено исследование района Южного океана вблизи оконечности Антарктического полуострова, включающего проливы Брансфилд и Лопер (между островами Кинг-Джордж и Элефант). Карта района представлена на рисунке 1. Этот регион является весьма сложным с точки зрения наблюдаемых структуры и циркуляции вод. Здесь взаимодействуют водные массы, переносимые собственно АЦТ, воды из морей Беллинсгаузена и Уэдделла. Водные массы из этих регионов имеют существенно различные характеристики, и их взаимодействие формирует сложную картину распределения термохалинных параметров, а наличие большого количества островов, сложная картина топографии дна приводит к не очень понятной и на сегодняшний день схеме циркуляции и взаимодействия водных масс. Интерес к режиму вод этого региона существует давно. Особенности формирования и распространения водных масс, натурным и модельным исследованиям циркуляции здесь посвящено немало работ (например, Мухаметьянов и др., 2022; Морозов, 2007; Hoffmann et al., 1996; Sangra et al., 2011; Caspel et al., 2017; Gordon et al., 2000; Frey et al., 2022; Gordey et al., 2024).

Основным объектом исследований стал пролив Брансфилд (ПБ), расположенный между Антарктическим полуостровом и Южно-Шетландскими островами, состоящий из трех глубоководных бассейнов (Западной, Центральной и Восточной котловин), которые разделяются относительно мелководными порогами с глубинами менее 1000 м. Бассейны пролива в основном заняты водными массами, свойства которых определяются характеристиками вод, поступающих из прилегающих морей: теплыми и относительно пресными из моря Беллинсгаузена и холодными и относительно солеными из моря Уэдделла. Основные водные массы, наблюдаемые в проливе, в таком случае могут быть отнесены к переходным водам с влиянием моря Беллинсгаузена

и переходным водам с влиянием моря Уэдделла, в зависимости от доминирующих исходных вод (Tokarczyk, 1987). В соответствии с работами (Garsia et al., 2002; Кречик и др., 2021) в данном исследовании будем использовать наименования Транзитная вода моря Беллинсгаузена (ТВБ) и Транзитная вода моря Уэдделла (ТВУ). Эти водные массы разделены мелководным фронтом, который хорошо выражен в поле температуры. Распространение ТВБ ограничено узким участком, приуроченным к шельфу и верхней части материкового склона вдоль северной половины пролива. Свой вклад в характеристики ТВБ вносят и модифицированная Циркумполярная глубинная вода, которая может поступать в пролив Брансфилд через пролив Бойд и, возможно, другие проходы.

Глубинные и придонные слои центральной и восточной котловин пролива Брансфилд заполняет плотная и холодная водная масса. В соответствии с принятой в упомянутых работах терминологией, будем именовать ее Глубинной водой пролива Брансфилд (ГВБ). По существующим представлениям, ГВБ является результатом смешения трех типов исходных вод: Циркумполярной глубинной воды (ЦГВ), а также Антарктической шельфовой воды низкой солености и Антарктической шельфовой воды высокой солености, которые формируются в море Уэдделла (Dotto et al., 2016). Смеси этих вод погружаются в глубины бассейнов пролива Брансфилд вдоль изопикнических поверхностей, не претерпевая заметной трансформации. Отсутствие значительного объема теплых соленых глубинных вод в форме ЦГВ или Глубинной воды моря Уэдделла (ГВМУ) в пределах пролива Брансфилд объясняет более холодную форму глубинных и донных вод в бассейнах пролива по сравнению с соседним открытым океаном. При этом ГВБ центрального бассейна – более холодные и соленые, содержат больше кислорода, чем ГВБ восточного бассейна. Донные воды Западного бассейна теплее, чем в двух других бассейнах, что отражает значительно меньший доступ холодной шельфовой воды или, что более вероятно, увеличение затока модифицированных ЦГВ с запада, в том числе через пролив Жерлаш (Hoffmann et al., 1996).

Динамика вод пролива, в соответствии, например, с (Sangrà et al., 2011) может быть представлена следующим образом. Основной мезомасштабной особенностью является фронт Брансфилда (ФБ) и связанное с ним течение Брансфилда (ТБ), которое течет на северо-восток вдоль южного склона Южно-Шетландских островов, перенося в основном ТВБ. По существующим представлениям, ТБ играет важную роль в обеспечении переноса и удержания биоты в проливе Брансфилд (Zhou et al., 2006). Ниже фронта Брансфилда, вдоль склона Южных Шетландских островов, наблюдается узкий язык Циркумполярных глубинных вод (ЦГВ). На поверхности конвергенция ТВБ и ТВУ приводит к неглубокому бароклинному фронту вблизи Антарктического полуострова (ФАП). Между ФБ и ФАП обнаруживается система антициклонических вихрей (Sangrà et al., 2011) диаметром около 20 км, которые могут достигать глубины 300 м. Эта вихревая система могла возникнуть из-за неустойчивости течения Брансфилда. Перенос ТВУ в юго-западном направлении вдоль западного шельфа Антарктического полуострова осуществляет течение,

являющееся продолжением склонового течения моря Уэдделла. Антарктическое склоновое течение (АСТ) в западной части моря Уэдделла течет на север и несет приблизительно 1 Св ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$) шельфовых вод моря Уэдделла вокруг оконечности Антарктического полуострова (к востоку от о. Жуэнвилль) в пролив Брансфилд (Heuwood et al., 2004). При этом значительный поток этих вод через пролив Антарктик, отделяющий Антарктический полуостров от острова Жуэнвилль (рисунк 1), считается маловероятным (Huneke et al., 2016). Юго-западное течение рециркулирует в западном бассейне пролива Брансфилд, таким образом, начиная ТБ. Последнее представляет собой прибрежное течение с максимальными поверхностными скоростями около 0.5 м/с и почти линейным спадом скорости к дну (Poulin et al., 2014). Вариант схемы поверхностных течений и фронтов района можно видеть на рисунке 1 в работе (Кречик и др., 2021). Течение Брансфилда, антициклоническая вихревая система, фронт полуострова, прибрежное течение Антарктического полуострова и язык Циркумполярных глубинных вод являются динамически связанными компонентами системы течений пролива Брансфилд.

Из изложенного понятно, что в формировании и трансформации водных масс в проливе важную роль играют процессы, связанные с образованием и распространением водных масс на шельфе моря Уэдделла. Роль шельфовых и глубинных вод моря Уэдделла существенна и с точки зрения их влияния на структуру и характеристики водных масс, входящих в Атлантический сектор Южного океана с АЦТ, на часть шельфовой области западной стороны Антарктического полуострова, на режим вод моря Скоша. Сложно оценить изменения в режиме вод этих районов, не учитывая изменчивости характеристик вод моря Уэдделла. Непосредственные наблюдения за процессами и их изменчивостью, в том числе и климатического масштаба, для вод шельфа и склона западной части моря Уэдделла практически невозможны, вследствие круглогодично тяжелой ледовой обстановки. Учитывая их влияние на режим вод пролива Брансфилд, наблюдения за изменчивостью свойств в его котловинах может позволить сделать выводы в том числе и об изменчивости процессов в море Уэдделла.

Организация и содержание наблюдений, выполненных судами ААНИИ в 2016–2022 гг. в районе пролива Брансфилд

Основным объектом исследований в рамках программ глубоководных океанографических наблюдений, разработанных и реализуемых учеными Арктического и антарктического института (ААНИИ) в районе пролива Брансфилд с 2015 г., стала его центральная котловина. Кроме того, менее регулярно велись наблюдения в восточной котловине пролива Брансфилд и на разрезе южная часть пролива Дрейка – пролив Лопер. Океанографические наблюдения выполняются с использованием научно-экспедиционных судов усиленного ледового класса «Академик Трешников» и «Академик Федоров» Росгидромета практически ежегодно в летне-осенний (для южного

полушария) период (январь–апрель) и проводятся в рамках сезонной части очередной Российской антарктической экспедиции (РАЭ).

На рисунке 1 показано расположение основных географических объектов района, а также разрезов и точек зондирования на них, выполненных судами ААНИИ как в предшествующий Десятилетий период, так и для двух экспедиций (2021 и 2022 гг.), относящихся к первым годам Десятилетия. Поскольку основной целью этих исследований является мониторинг временной изменчивости водных масс, в большинстве случаев точки зондирования для разных лет совпадают по положению. Поэтому на схеме показано положение разрезов для первого года наблюдений (2015 г.), в известной степени ставших рекогносцировочными, для 2018 г., когда был выполнен наибольший за весь период объем наблюдений, и для 2021 и 2022 гг. – первых лет, когда наблюдения выполнялись уже в рамках Десятилетия. Содержание наблюдений и предварительные научные выводы после каждой проведенной экспедиции публикуются в периодическом издании ААНИИ «Российские полярные исследования» (Антипов и др., 2016, 2017, 2020, 2021, 2022).

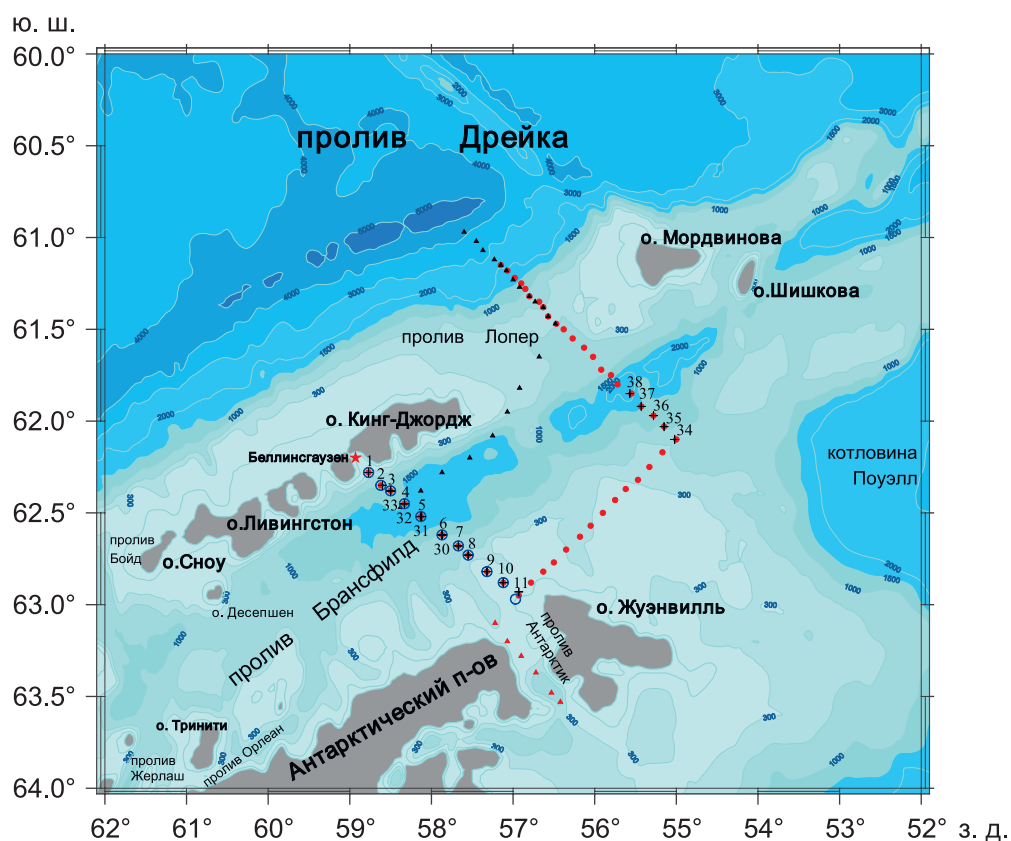


Рис. 1 – Схема района исследований. Красные заполненные кружки – положение станций на разрезах, выполненных в период 63-й РАЭ (2018 г.). Черные треугольники – положение станций разрезов, выполненных в период 60-й РАЭ (2015 г.). Синие незаполненные кружки – положение станций, выполненных на разрезе через центральную котловину пролива Брансфилд в период 66-й РАЭ (2021 г.). Черные крестики с номерами – положение станций, выполненных в период 67-й РАЭ (2022 г.). Красные треугольники – положение станций в проливе Антарктик, выполненных в период 58-й РАЭ (2013 г.)

Необходимо отметить, что выполнение программ глубоководных океанологических исследований судами ААНИИ в сезонные периоды антарктических экспедиций часто корректируется в связи с возникающими форс-мажорными обстоятельствами (связанными с ледовой и погодной обстановкой, техническими и логистическими проблемами). Такие обстоятельства не позволили выполнить запланированные наблюдения в проливе Брансфилд в 2023 г., поэтому в статье обсуждаются итоги только первых двух лет Десятилетия.

Как сказано выше, основным объектом исследований стала центральная котловина пролива Брансфилд, разрез через которую обычно выполняется непосредственно после выхода судна из залива Максвелл, по окончании операций по обеспечению станции Беллинсгаузен. К настоящему времени этот разрез, начиная с 2016 г., был выполнен 6 раз (таблица 1). Разрез вдоль пролива Лопер полностью был выполнен один раз (в 2018 г.), однако в зависимости от возможностей (в первую очередь наличия времени) в ряде случаев выполнялись отдельные его части, что позволило исследовать изменчивость структуры и характеристик водных масс на отдельных участках. В частности, в 2022 г. удалось повторить часть разреза, пересекающую восточную котловину пролива Брансфилд. Краткие описания полученных результатов приводятся в статье ниже.

Табл. 1 – Характеристики разрезов, выполненных судами ААНИИ в районе исследований в период с 2015 по 2022 гг.

№ РАЭ	Судно	Год	Число	Месяц	№ разреза	Район	Число станций
60	Академик Федоров	2015	9	IV	1	Центральная котловина – пр. Лопер	8
			9–10	IV	2	Пр. Лопер – пр. Дрейка	13
61	Академик Федоров	2016	25	IV	1	Центральная котловина	11
			26	IV	2	Пр. Лопер – пр. Дрейка	12
62	Академик Федоров	2017	9–10	IV	1	Центральная котловина	11
			10–11	IV	2	Пр. Лопер – пр. Дрейка – восточная котловина	15
63	Академик Трешников	2018	23–24	IV	1	Центральная котловина	11
			24	IV	2	Шельф Антарктического п-ова	12
			24–26	IV	3	Пр. Лопер – пр. Дрейка – восточная котловина	22
65	Академик Трешников	2020	9–10	III	1	Центральная котловина	11
66	Академик Трешников	2021	10–11	III	1	Центральная котловина	11
67	Академик Трешников	2022	29	I	1	Центральная котловина	11
			20–21	II	2	Центральная котловина	4
			23	II	3	Восточная котловина	5

Для получения подробных профилей температуры и солености морской воды в каждой точке наблюдений оба судна оснащены зондом “SeaBird 911+”. С целью достижения необходимой дискретности по вертикали, скорость зондирования на всех станциях не превышает 1 м/с, а при подходе ко дну и на верхних 100 метрах подъема зонда к поверхности – 0.5 м/с. Приближение зонда ко дну на станциях контролируется с помощью альтиметра PSA-916 D, установленного на несущей раме зонда. Отбор проб для определения содержания растворенного кислорода и биогенных элементов (в случае наличия таких наблюдений в программе экспедиции) производится на стандартных горизонтах 0, 50, 100, 200, 500, 750, 1000, 2000 м и в придонном слое. Кроме того, дополнительно отбираются пробы в слоях экстремумов температуры и солености, положение которых определяется оперативно, путем анализа профилей при зондировании «вниз» на каждой станции. Периодически отбираются пробы воды на соленость с двух наиболее стабильных по показаниям этой характеристики горизонтов, с целью контроля работы датчика электропроводности зонда. Величина солености в этом случае определяется на солемере AUTOSAL 8400B.

Основные результаты анализа изменчивости структуры и циркуляции водных масс пролива Брансфилд в период с 2016 по 2022 гг.

Водные массы центральной котловины пролива Брансфилд

После выполнения рекогносцировочного разреза вдоль части центральной котловины пролива Брансфилд в 2015 г., в качестве базового, то есть регулярно повторяемого, был определен разрез от залива Максвелл до материкового склона Антарктического полуострова, впервые выполненный в 2016 г. Разрез расположен приблизительно нормально относительно положения изобат этого района и заканчивается на материковом склоне полуострова, вблизи входа в пролив Антарктик. Океанологические наблюдения начинались обычно сразу после окончания логистических операций на станции Беллинсгаузен, расположенной на берегу этого залива. Разрез состоит из 11 станций, его длина около 120 км. Расстояние между станциями составляет от 7–8 км в районе бровки шельфа на северном и южном краях разреза, до 18 км в центральной его части. На его выполнение обычно уходит менее суток. В створе разреза максимальная глубина на осевой станции приближается к 1800 м. На юге разрез захватывает часть шельфа острова Кинг-Джордж в диапазоне глубин 500–600 м. На 600 м находится кромка шельфа, от которой начинается достаточно крутой склон. Шельф Антарктического полуострова на противоположной стороне разреза пологий и мелкий, с глубиной у входа в пролив Антарктик около 120 м, шириной наиболее пологой части (до глубины 200 м) около 30 км. С глубин около 350 м начинается склон, менее крутой, чем на противоположной стороне разреза.

На рисунке 2 показано распределение температуры и солености на реализации разреза, выполненного в 2021 г., первом году Десятилетия, а также указаны основные

водные массы. В распределении характеристик выражены основные элементы структуры вод, описанные выше. В районе северного шельфа и склона хорошо проявляется фронт Брансфилда (ФБ), с которым сопряжено течение Брансфилда (ТБ). Это течение переносит Транзитную воду моря Беллингаузена (ТВБ), которая южнее ФБ занимает и верхний слой вод пролива мощностью около 100 м, достигая шельфа Антарктического полуострова, где выражен фронт Антарктического полуострова (ФАП). На шельфе, южнее ФАП, обнаруживается более холодная и соленая Транзитная вода моря Уэдделла. Наконец, наиболее объемная водная масса, занимающая глубоководную область котловины – Глубинная вода пролива Брансфилд (ГВБ).

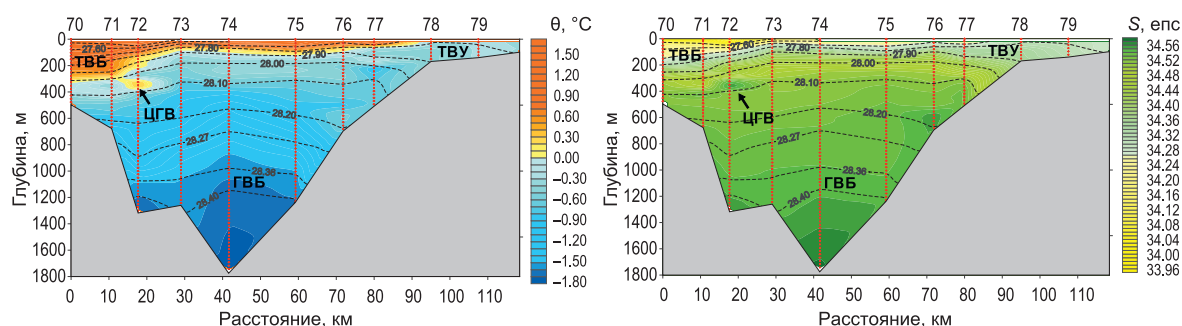


Рис. 2 – Потенциальная температура (левый рисунок) и соленость (правый рисунок) на разрезе 2021 г. Пунктирной линией показаны изолинии аномалий нейтральной плотности. Аббревиатура для водных масс соответствует принятой в тексте статьи

Прямоугольники на представленной на рисунке 3 диаграмме показывают ориентировочные диапазоны свойств для перечисленных водных масс. Общее представление об изменчивости можно составить на основе распределений температуры и солености на каждой реализации разреза, показанных на рисунке 4.

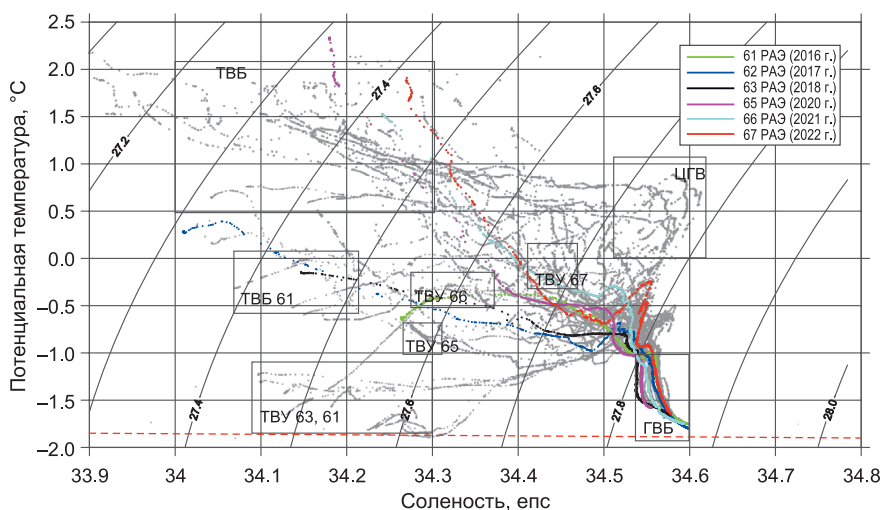


Рис. 3 – θ/S -диаграмма для данных разреза за весь период наблюдений. Аббревиатура в прямоугольниках обозначает наименования водных масс, соответственно тексту статьи. Цифры рядом с аббревиатурой – номер РАЭ. Соответствующие годы указаны в таблице 1. Цветами выделены кривые для осевых (наиболее глубоких) станций разрезов. Показаны изолинии потенциальной плотности для давления 0 дцбар.

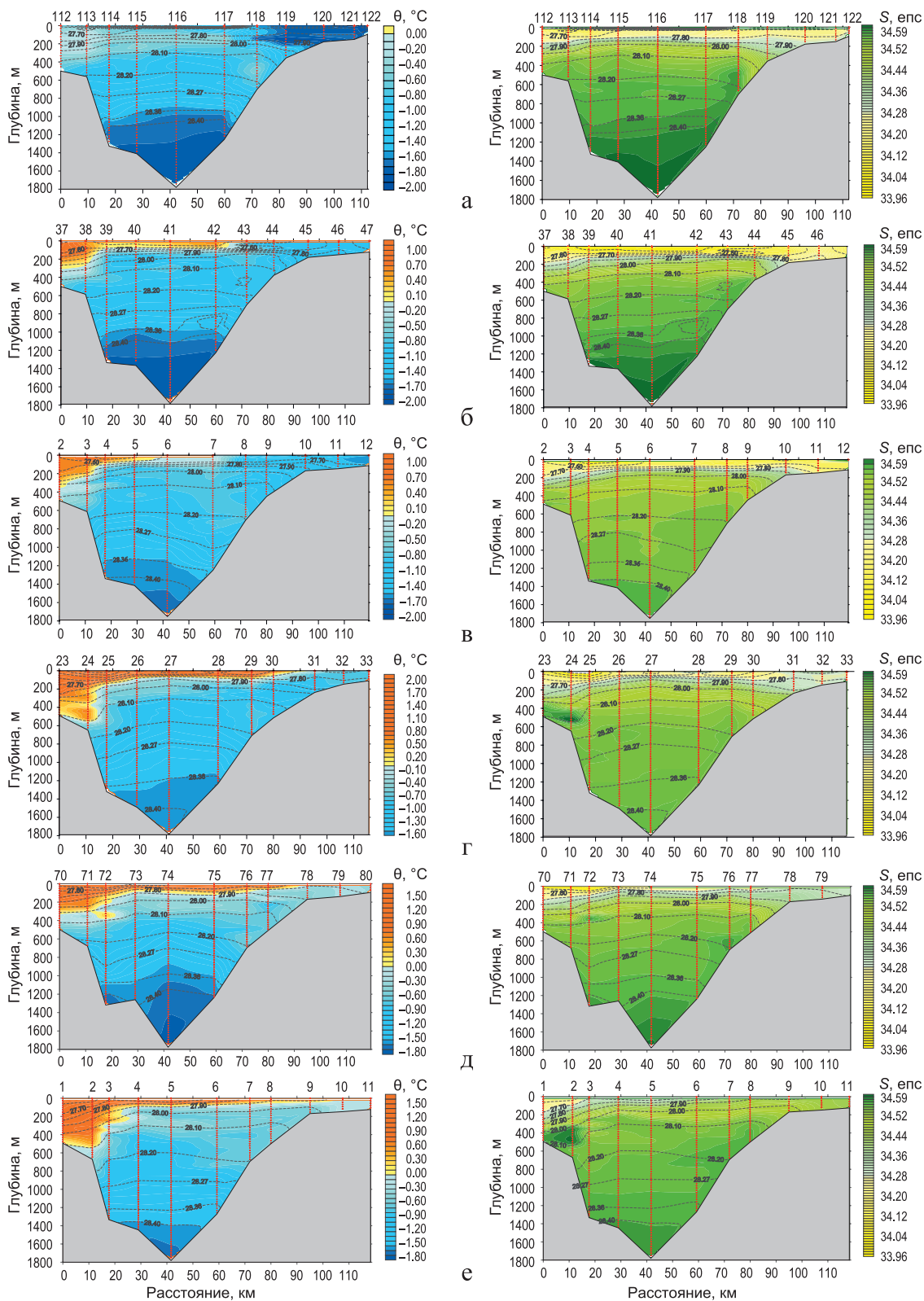


Рис. 4 – Потенциальная температура (слева) и соленость (справа) для всех реализаций базового разреза через центральную котловину пролива Брансфилд: а – 2016 г. (61-я РАЭ); б – 2017 г. (62-я РАЭ); в – 2018 г. (63-я РАЭ); г – 2020 г. (65-я РАЭ); д – 2021 г. (66-я РАЭ); е – 2022 г. (67-я РАЭ). Пунктирной линией показаны изолинии аномалий нейтральной плотности

В таблице 2 приведены значения характеристик в ядрах водных масс, обнаруженных на разрезе. Значения температуры и солёности для ГВБ и ЦГВ приведены с точностью до третьего знака, поскольку являются результатами измерений в конкретных точках профилей, представленные в таблице значения для ТВБ и ТВУ (как поверхностных водных масс) получены осреднением по слою этих водных масс с известной долей волонтаризма, они носят оценочный характер и приводятся с точностью до второго знака после запятой.

Табл. 2 – Температура и солёность в ядрах водных масс на разрезе через центральную котловину пролива Брансфилд

РАЭ	ТВБ		ТВУ		ГВБ		ЦГВ	
	θ , °C	S , епс	θ , °C	S , епс	θ , °C	S , епс	θ , °C	S , епс
61	-0.06	34.20	-1.71	34.26	-1.745	34.597		
62	1.06	34.10	-1.05	34.12	-1.797	34.598		
63	0.75	34.10	-1.35	34.15	-1.657	34.576	0.063	34.526
65	1.67	34.16	-0.81	34.29	-1.578	34.555	0.714	34.612
66	1.41	34.13	-0.34	34.32	-1.747	34.593	0.460	34.582
67	1.45	34.20	-0.19	34.44	-1.644	34.578	0.891	34.596

В таблице 2 продемонстрирована заметная изменчивость всех элементов, заключающаяся как в колебаниях значений температуры и солёности водных масс, так и в их объемах и степени распространения в пределах разреза. Напомним, что дискретность наблюдений близка к одному году (не считая пропуска наблюдений в 2019 г.). В 2016–2021 гг. наблюдения проводились осенью Южного полушария (март–апрель), а в 2021 г. – летом (январь). Поэтому в распределении, особенно характеристик поверхностных вод, проявляется и сезонная изменчивость. Термин «межгодовая изменчивость» отражает только промежуток времени между последующими реализациями, хотя реальные масштабы проявляющейся в распределениях изменчивости не всегда можно определить.

Глубинная вода пролива Брансфилд (ГВБ)

Глубинная вода пролива Брансфилд (ГВБ) – водная масса, заполняющая центральную и восточную котловины пролива. Ранее считалось, что холодные глубинные воды, заполняющие пролив Брансфилд, могут образовываться локально (Gordon, Nowlin, 1978), поскольку котловины пролива относительно изолированы. Однако (Whitworth et al., 1994) сделали вывод, что глубокие воды в проливе Брансфилд представляют собой смесь ЦГВ из АЦТ, более холодной и немного более пресной Глубинной воды из моря Уэдделла (ГВМУ) и шельфовых вод с северо-запада моря Уэдделла. Смесь этих вод перемещается к западу севернее Антарктического полуострова, опускаясь вдоль изопикнических поверхностей и возобновляя Глубинные воды пролива Брансфилд, в первую очередь наиболее изолированной центральной

котловины. По мнению (Whirworth et al., 1994), эта схема смешивания может происходить в течение всего года и не зависит от зимней конвекции, которая не наблюдалась в проливе Брансфилд. Позднее (Gordon et al., 2000) уточнили эту схему. По результатам их исследований в состав ГВБ входят следующие водные массы (в % указаны массовые доли): АШВ низкой солености из моря Уэдделла (24 %); АШВ высокой солености, наблюдаемые северо-восточнее острова Жуэнвиль (60 %); ГВМУ (11 %), и небольшое количество воды, обнаруженной в области пикноклина в близлежащих районах Тихого океана (5 %). В свою очередь, применив оптимальный многопараметрический анализ к данным по температуре, солености и кислороду, исследователи Dotto et al. (2016) показали, что ГВБ могут быть хорошо представлены тремя типами исходных вод: ЦГВ, шельфовой водой низкой солености и шельфовой водой высокой солености.

Важное уточнение в объяснения процессов формирования ГВБ внесли в 2017 г. (Caspel et al., 2017). Проведя модельные исследования, авторы показали, что воды, обнаруженные на бровке континентального шельфа на западе моря Уэдделла, имеют более сильное воздействие на изменчивость придонных слоев ГВБ, чем воды, наблюдаемые на самом континентальном шельфе. В качестве трассера они использовали талую воду шельфовых ледников (ТВЛ). Модельные расчеты показали, что ТВЛ из шельфового ледника Фильхнера – Ронне в большей степени проявляется в ГВБ восточной котловины, тогда как ТВЛ из шельфового ледника Ларсена более выражено в центральной котловине. Несмотря на небольшие концентрации, наличие ТВЛ является хорошим индикатором происхождения водной массы и ее пути. При этом понимание источников ГВБ имеет решающее значение для оценки причин и последствий их изменчивости (Dotto et al., 2016). Важно, что результаты наблюдений изменчивости ГВБ могут помочь выявить изменения в характеристиках шельфовых вод, образующих ГВМУ, предшественника антарктических придонных вод – важнейшей водной массы Южного океана.

Для анализа вертикальной структуры и ее изменчивости для ГВБ за исследуемый период были рассмотрены особенности профилей температуры и солености на центральной станции, в самой глубокой точке разреза. Шесть профилей для этой точки выделены на общей диаграмме цветами (рисунок 3). Нижняя часть диаграммы с профилями для осевой станции показана на рисунке 5. В предыдущих исследованиях верхнюю границу ГВБ часто связывали с изотермой $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Gordon et al., 2000). В нашем анализе мы определяли верхнюю границу, исходя из характера θ/S кривой, положения указанной изотермы и точки достижения значения нейтральной плотности 28.27 кг/м^3 . Нейтральная плотность – плотностной параметр, широко применяемый в океанологии и разработанный в качестве альтернативы использованию набора отдельных поверхностей потенциальной плотности, отнесенных к различным уровням давления (McDougall, 1987; Jackett, McDougall, 1997). В нашем исследовании мы используем предложенное в ряде работ в качестве верхней границы Антарктической донной воды (АДВ) значение этого параметра $28,27\text{ кг/м}^3$ (Orsi et al., 1999; Whitworth et al., 1998).

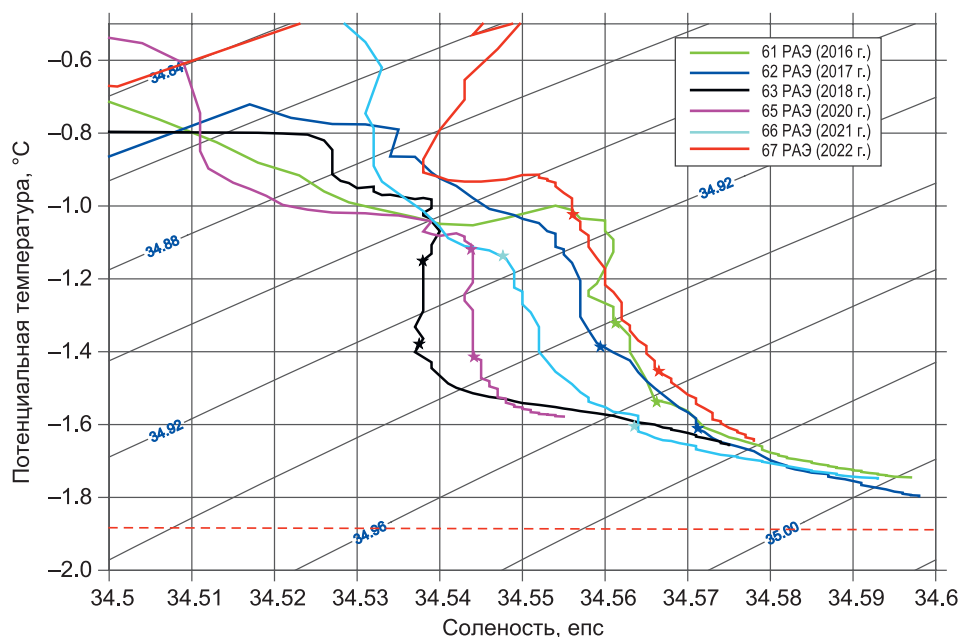


Рис. 5 – θ/S -кривые для осевых (наиболее глубоких) станций разреза. Звездочками соответствующих цветов показаны границы выделенных для ГВБ слоев. Показаны изопикны плотности для давления 1500 дцбар

На диаграмме просматривается двухслойная структура ГВБ, а переход от сложной вышележащей структуры к относительно однородному по солениости верхнему слою ГВБ близок к значению нейтральной плотности, указанному выше ($\gamma^n = 28.27 \text{ кг/м}^3$). В качестве границы между слоями, исходя из перехода от однородного по солениости к слою повышенных градиентов, установлено значение нейтральной плотности $\gamma^n = 28.36 \text{ кг/м}^3$, также определенное ранее некоторыми авторами в качестве условной границы между верхним и нижним слоями АДВ, имеющими свои особенности при распространении в Южном океане (Hirano et al., 2015). В таблице 3 приведены значения температуры и солениости для обеих границ слоев, а также характеристики придонного слоя.

Табл. 3 – Положение и термохалинные характеристики для границ слоев и ядра (дно) ГВБ на осевой станции разреза через центральную котловину

РАЭ	Год	$\gamma^n = 28.27 \text{ кг/м}^3$			$\gamma^n = 28.36 \text{ кг/м}^3$			Дно			
		H, м	θ , °C	S, епс	H, м	θ , °C	S, епс	H, м	θ , °C	S, епс	γ^n , кг/м ³
61	2016	720	-1.243	34.558	930	-1.558	34.569	1758	-1.745	34.597	28.493
62	2017	767	-1.185	34.557	997	-1.512	34.566	1756	-1.797	34.598	28.504
63	2018	890	-1.180	34.538	1155	-1.519	34.545	1741	-1.657	34.576	28.455
65	2020	787	-1.258	34.543	1180	-1.498	34.546	1771	-1.578	34.555	28.421
66	2021	700	-1.319	34.552	975	-1.564	34.561	1765	-1.747	34.593	28.490
67	2022	915	-1.039	34.557	1230	-1.368	34.564	1771	-1.644	34.578	28.456
67-2	2022	892	-1.051	34.558	1202	-1.382	34.564	1772	-1.662	34.580	28.461

Важным подтверждением обоснованности выбранных критериев для выделения слоев стало сравнение профилей зондирований на центральной станции разреза, повторенных в 2022 г. с промежутком в 21 день. Первое зондирование было выполнено 29 января, а второе – 20 февраля. Характеристики для слоев при повторном зондировании приведены в таблице 3, в последней строке. Повторное зондирование показало отсутствие изменений в значениях солености и некоторое охлаждение слоя ГВБ. Детальный анализ полных профилей температуры и солености показал, что степень похолодания различна для выделенных слоев. Наибольшее понижение температуры (на 0.03–0.06 °C) обнаружено в верхнем слое ГВБ (примерно от 900 до 1250 м). Практически не изменилась температура в слое 1250–1550 м, а придонный 200-метровый слой охладился на 0.02 °C. В пределах всего слоя ГВБ значения солености на одинаковых горизонтах различались не более, чем на 0.002 епс. Различный характер изменчивости для выделенных слоев был выявлен и при сравнении значений θ и S между профилями 2020–2022 гг. Можно предположить, что основное обновление ГВБ происходит в верхнем слое и вблизи дна океана.

Приведенные в таблице данные измерений показывают, что температура и соленость придонного слоя ГВБ изменялись в пределах от –1.578 до –1.797 °C и от 34.555 до 34.598 епс соответственно. После аномально холодного придонного слоя, наблюдаемого в 2016 г. и особенно в 2017 г. (–1.797 °C, 34.598 епс), было зафиксировано заметное потепление этой воды до –1.578 °C в 2020 г. (с понижением солености до 34.555 епс). Однако в 2021 г. эта тенденция была нарушена заметным понижением температуры до –1.747 °C с повышением солености до 34.593 епс, в свою сменившееся в 2022 г. ростом температуры до –1.644 °C, (с понижением солености до 34.578 епс). Поскольку данные наблюдений показывают обратную связь между изменениями температуры и солености ГВБ, можно полагать, что наблюдаемые колебания значений ее характеристик связаны не с изменением свойств относительно теплой и соленой ЦГВ, а с изменением пропорций глубинных и шельфовых вод из моря Уэдделла.

Транзитная вода моря Беллинсгаузена (ТВБ) и течение пролива Брансфилд (ТБ)

В районе шельфа и склона северной части разреза на всех реализациях выражена область теплой и относительно соленой водной массы, характеристики которой в основном определяются основным вкладом воды, поступающей с юго-запада, из моря Беллинсгаузена. Перенос ее на разрезе связан с течением пролива Брансфилд (ТБ), стрежень которого связан с ФБ, хорошо выраженном в первую очередь в распределении температуры. Важной особенностью области ТБ является не всегда проявляющийся в распределении температуры и солености язык ЦГВ, обособленный или интегрированный в ТВБ, с ядром которого связан обычно локальный максимум в распределении температуры и солености.

Результаты наблюдений показывают существенную изменчивость как параметров ТБ (ширина и глубина проникновения), так и в значениях характеристик ТВБ и ЦГВ. Параметры потока мы оценивали по ширине и глубине области с выраженным

наклоном изопикн γ' и распределению температуры в районе бровки шельфа о. Кинг Джорж. Эти особенности хорошо просматриваются в северной части базового разреза на всех реализациях (рисунок 4). По нашим оценкам, ширина потока от года к году менялась в диапазоне 12–22 км, а глубина проникновения менялась от 350 до 600 м. Характеристики ТВБ в потоке ТБ испытывали значительные колебания. Аномально выглядит 2016 г., когда в пределах разреза в потоке ТБ переносилась вода с температурой ниже 0 °С. Изменения характеристик ТВБ видны из таблицы 2. Наиболее теплая вода наблюдалась последние 3 года, от 1 до 1.7 °С в поверхностном слое. Отметим, что характеристики ТВБ определяются процессами в море Беллинсгаузена и проливе Жерлаш, в первую очередь сроками и интенсивностью таяния льда и нагрева поверхности. Кроме того, собственно начало потоку ТБ, как считается, дает рециркуляция юго-западного прибрежного течения в районе западной котловины пролива Брансфилд, а значит и воды из моря Уэдделла могут участвовать в формировании характеристик ТВБ (Poulin et al., 2014). Изменчивость этих процессов определяет и наблюдаемую изменчивость характеристик ТВБ.

Изменчивость характеристик в наблюдаемом ядре ЦГВ связана с иными причинами. Как видно из таблицы 2 и рисунка 4, в случаях, когда ядро ЦГВ выделялось в створе разреза, а очевидно и ярко это имело место в 2020–2022 гг., оно находилось на глубине 320–450 м и имело температуру от 0.4 до 0.9 °С (соленость 34.58–34.60 епс). Обнаруженный в 2018 г. слабый максимум 0.06 °С (34.53 епс) может также являться «следом» ЦГВ. При этом в трех случаях выраженного ядра ЦГВ мы наблюдаем три различных структуры, определяемые его положением относительно массы ТВБ (рисунок 4):

В 2020 г. ЦГВ выражено в виде мощного ядра на глубине 450 м с температурой 0.7 °С и соленостью 34.61 епс, подстилающего ТВБ и в целом увеличивающего мощность потока ТБ до 600 м – максимальной из наблюдаемых за весь период.

В 2021 г. ЦГВ была обнаружена на разрезе в виде отделенного от массы ТВБ ядра на глубине 350 м, с температурой 0.43 °С и соленостью 34.58 епс, которое в дальнейшем может отделиться от ТБ или объединиться с ним.

Наконец, в 2022 г. ядро ЦГВ обнаруживается внутри массы ТВБ, на глубине 320 м, с максимальными из наблюдаемых для ЦГВ температурой и соленостью (0.89 °С и 34.60 епс). В данном случае весь объем ТВБ – самый теплый и соленый из наблюдаемых, и выделяется максимальными горизонтальным и вертикальным размерами (22 км, 600 м). Повторенная через 20 суток часть разреза показала, что ширина ТБ за этот период выросла от 20 до 28 км, температура в ядре ЦГВ увеличилась с 0.90 до 1.20 °С, а соленость – с 34.60 до 34.63 епс.

Из предыдущих исследований известна сильная изменчивость потока ТБ и особенно характеристик языка ЦГВ. Происхождение этого языка связывают со спорадическим поступлением ЦГВ с южной периферии АЦТ через пролив Бойда. Кроме того, не исключено вовлечение ЦГВ в район западной котловины через пролив между островами Смит и Брабант (Gordon et al., 2000). Шельф западнее этого прохода заполнен ЦГВ с температурой выше 1.4 °С и соленостью 34.68 епс, что показали

наблюдения НЭС «Академик Федоров», выполнившего здесь разрез в феврале 2010 г. Изменчивость интенсивности этого поступления, его характеристик, взаимодействие с циркулирующими южнее пролива водными массами определяет наблюдаемую сильную изменчивость ЦГВ.

Значительную изменчивость ЦГВ, перенос которой связан с ТБ, показывает сравнение результатов наших наблюдений, сделанных в марте 2020 г. и описанных выше, с полученными в экспедиции ИО РАН в январе 2020 г. в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» данными на разрезе, пересекавшем центральную котловину пролива южнее примерно на 0.5° широты (Кречик и др., 2021). Хотя разрезы начинаются практически на одной изобате (чуть менее 500 м), поток ТБ в январе имеет ширину около 10 км, а в ядре ЦГВ, обнаруженном на южной станции разреза на глубине 400 м, температура и соленость составили 0.48°C и 34.50–34.54 епс соответственно. Не исключено, что в данном случае на разрез попала часть языка ЦГВ, но в любом случае очевидна существенная временная и пространственная изменчивость как ТБ, так и свойств распространяющейся с ним ЦГВ.

Транзитная вода моря Уэдделла

В области шельфа Антарктического полуострова в створе разреза наблюдается ТВУ, перенос которой в юго-западном направлении осуществляет течение, являющееся в известной степени продолжением прибрежного течения с запада моря Уэдделла. Особенностью положения разреза является близость к его северному выходу из пролива Антарктик. Считается, что холодные шельфовые воды моря Уэдделла в основном поступают в пролив Брансфилд севернее, огибая остров Жуэнвиль (Gordon et al., 2000). В некоторых исследованиях отмечается малая вероятность существенного потока вод из моря Уэдделла через пролив Антарктик (Caspel et al., 2017). Данные наблюдений на разрезе, выполненном вдоль пролива Антарктик в первом рейсе НЭС «Академик Трешников» в 2013 г. (положение точек зондирования на этом разрезе показано на рисунке 1), не показали признаков проникновения шельфовых вод из моря Уэдделла на шельф западной части антарктического полуострова. Однако менее холодная вода верхнего слоя, как показывают данные разреза, может поступать на шельф пролива Брансфилд и участвовать в формировании структуры и характеристик ТВУ в районе северной оконечности базового разреза.

ТВУ от ТВБ отделяет ФАП, положение которого в многолетнем плане изменчиво, что хорошо просматривается на рисунке 4. Характеристики ТВУ в створе разреза показаны в таблице 2. Очевидна их существенная изменчивость, в которую значительный вклад вносит сезонная составляющая. Осенью ТВУ более холодная (ниже -1.0°C), менее соленая (около 34.10 епс), а ФАП смещен к центру котловины и ширина области ТВУ составляет около 55 км от северной точки разреза. Летом и в начале осени ширина области распространения ТВУ составляет 25 км и менее, ее положение полностью приурочено к шельфу. Температура в 2021 и 2022 гг.

составила от -0.2 до -0.3 °C при солёности 34.30–34.45 епс. Особняком стоит 2016 г., отличающийся низкими температурами всех водных масс (таблица 2). На выполненном в конце апреля разрезе трудно определить положение ФАП, но с некоторой натяжкой мы оцениваем ширину области ТВУ в 70 км. Подобное распределение характеристик стало следствием аномальных погодно-ледовых условий, наблюдавшихся в этот период в районе. В период работ в районе произошел вынос льда из моря Уэдделла по меридиану 54° з. д. с дальнейшим поступлением его на запад, в пролив Брансфилд. По спутниковым снимкам обнаружен вынос тяжелого льда ядра атлантического массива с запада моря Уэдделла через пролив Антарктик в направлении залива Максвелл. Таким образом, изучаемая аномальная картина свойств водных масс, очевидно, определялась аномальным состоянием атмосферы и ледового покрова.

Глубинная вода восточной котловины пролива Брансфилд

Особенностям структуры и циркуляции вод восточного бассейна пролива Брансфилд посвящены ряд исследований (Lopez et al., 1999; Whitworth et al., 1994). По современным представлениям, ГВБ для восточной котловины представляет собой смесь шельфовой воды с температурой около точки замерзания (65 %) и 35 % относительно теплой и солёной Глубинной воды моря Уэдделла (ГВМУ). Основной источник донной воды восточного бассейна находится на прибрежной стороне шельфо-склонового фронта на западе моря Уэдделла, у острова Жуэнвиль. Смесь водных масс, которая в конечном итоге заполняет восточный бассейн, образуется восточнее острова Жуэнвиль и погружается в восточную котловину без дальнейшего разбавления, что Whitworth et al. (1994) называют изопикническим распространением. Смесь ГВМУ и малосолёной АШВ из моря Уэдделла даёт простейшее объяснение донным водам восточной котловины (Gordon et al., 2000). Вместе с тем, последние данные показывают существование переливов ГВБ через порог из центрального бассейна (Frey et al., 2022), вклад которых ещё предстоит оценить.

Наблюдения в восточной котловине пролива Брансфилд за период с 2015 по 2022 гг. были проведены всего 2 раза, но полученные результаты показывают целесообразность продолжения таких наблюдений. В конце апреля 2018 г. был выполнен разрез от пролива Дрейка, южная часть которого пересекала восточную котловину пролива Брансфилд. В конце февраля 2022 г., в рамках работ по программе Десятилетия, удалось частично повторить наблюдения в тех же точках, что и в 2018 г. Сравнение характеристик ГВБ (таблица 4 и рисунок 6) показало их значительную изменчивость.

В качестве верхней границы слоя ГВБ, как и для центральной котловины, условно принято значение $\gamma^s = 28.27$ кг/м³. Сравнение показывает сильное потепление слоя ГВБ. Средняя температура слоя от 1000 м до дна (около 2000 м) выросла на 0.25 °C (с сопутствующим ростом солёности на 0.02 епс).

Табл. 4 – Характеристики верхней границы и придонного слоя ГВБ
 восточной котловины пролива Брансфилд

РАЭ	№ ст.	$\gamma^n = 28.27 \text{ кг/м}^3$			Дно			
		$H, \text{ м}$	$\theta, \text{ }^\circ\text{C}$	$S, \text{ епс}$	$H, \text{ м}$	$\theta, \text{ }^\circ\text{C}$	$S, \text{ епс}$	$\gamma^n, \text{ кг/м}^3$
63	28	1121	-1.006	34.540	1742	-1.114	34.543	28.322
	29	1090	-1.025	34.540	2032	-1.104	34.544	28.327
	30	1060	-1.028	34.542	1988	-1.128	34.544	28.331
67	37	1375	-0.822	34.555	1831	-0.849	34.558	28.290
	38	1370	-0.823	34.556	2168	-0.856	34.559	28.296

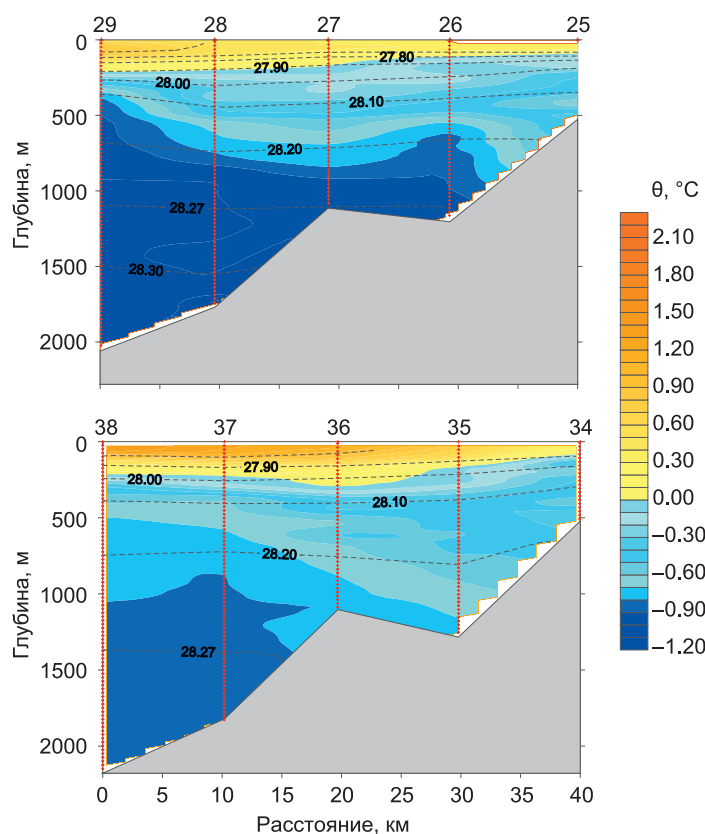


Рис. 6 – Потенциальная температура в южной части восточной котловины пролива Брансфилд, наблюдаемая в 2018 г. (верхний рисунок) и в 2022 г. (нижний рисунок). Пунктирной линией показаны изолинии нейтральной плотности

Такой рост средней температуры столь мощного слоя (1200 м), формирующегося за счет поступления вод из моря Уэдделла, может отражать существенные изменения свойств поступающих вод или крупномасштабной изменчивости динамики этих процессов. Видимо, это связано с выявленным потеплением ГВМУ (Strass et al., 2020). Речь может идти об изменчивости климатического масштаба и предполагает продолжение наблюдений в этом регионе. Тем более, что прямые наблюдения на западе моря Уэдделла невозможны из-за практически постоянного покрытия льдом данного региона.

Основные результаты

На основе анализа данных измерений ААНИИ в проливе Брансфилд в 2016–2022 гг. показано, что температура и соленость придонного слоя Глубинной воды пролива Брансфилд (ГВБ), заполняющей абиссаль центральной котловины, изменялась в пределах от -1.58 до -1.80 °С и от 34.56 до 34.60 епс соответственно. После аномально холодного придонного слоя, наблюдаемого в 2016 г., и особенно в 2017 г. (-1.80 °С, 34.60 епс), было зафиксировано заметное потепление этой воды до -1.58 °С в 2020 г. (с понижением солености до 34.56 епс). Однако в 2021 г. было обнаружено заметное понижение температуры до -1.75 °С с повышением солености до 34.59 епс, в свою очередь сменившееся в 2022 г. ростом температуры до -1.64 °С, (с некоторым понижением солености). Поскольку данные наблюдений показывают обратную связь между изменениями температуры и солености ГВБ, можно полагать, что наблюдаемые колебания значений ее характеристик связаны не с изменением свойств относительно теплой и соленой ЦГВ, а с изменением пропорций глубинных и шельфовых вод из моря Уэдделла.

По данным двух реализаций базового разреза в 2022 г., было обнаружено, что за один месяц между выполнением разрезов температура в слое 1250–1550 м практически не изменилась, а придонный 200-метровый слой охладился на 0.02 °С. В пределах всего слоя ГВБ значения солености на одинаковых горизонтах различались не более, чем на 0.002 епс. Различный характер изменчивости для выделенных слоев был выявлен и при сравнении значений θ и S между профилями 2020–2022 гг. Соответственно, можно предположить, что основное обновление ГВБ происходит в верхнем слое и вблизи дна океана.

Анализ термохалинной структуры на разных реализациях базового разреза позволил оценить изменчивость (между этими реализациями) некоторых характеристик течения пролива Брансфилд (ТПБ), проявившуюся в колебаниях горизонтального (от 10 до 20 км) и вертикального (от 200 до 550 м) размеров потока. Обнаруженный спорадически появляющийся язык глубинной воды из АЦТ в нижней части потока ТПБ, зафиксирован только в данных, полученных в 2020–2022 гг. В этот период характеристики ядра показали заметное изменение глубины залегания ядра (диапазоне 320–450 м), температуры (от 0.4 до 0.9 °С), и солености (34.58–34.63 епс).

Анализ данных измерений на двух реализациях разреза поперек восточной котловины показал положительное изменение средней температуры слоя ГВБ мощностью 1200 м на 0.25 °С (с сопутствующим ростом солености на 0.02 епс). В основном, это может быть связано с ранее выявленным потеплением ГВМУ, являющейся основной формирующей ГВБ восточного бассейна водной массой. Несомненно, существует вклад в изменчивость ГВБ за счет перетоков придонных вод из центрального бассейна. Однако оценить количественно его роль по существующим данным и литературным источникам невозможно.

Таким образом, начальный этап изучения временной изменчивости циркуляции, структуры и характеристик вод пролива Брансфилд по проекту «Комплексные

многодисциплинарные исследования и мониторинг экосистем в стратегически важных районах южной Атлантики» в рамках проведения «Десятилетия ООН, посвященного науке об океане в интересах устойчивого развития», показал перспективность и научную значимость выбранного района и направления исследований. Проведенный анализ позволил сделать выводы о выраженной взаимосвязи изменчивости элементов структуры и циркуляции вод региона. Представляется перспективным продолжение исследований в выбранном направлении, заключающееся не только в выявлении и фиксации временной изменчивости характеристик системы, но и внесении возможных корректив и дополнений в программы работ, с целью получения дополнительной информации для суждения о причинах наблюдаемых изменений.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках проекта 5.2 «Комплексные океанологические, климатические, гляциологические и геофизические исследования Антарктики и Южного океана» плана НИТР/ОПР Росгидромета (2020–2024 гг.).

Список литературы

1. Антипов Н. Н., Бунякин В. П., Кашин С. В., Кузнецов В. Л., Чистяков И. А. Океанографические исследования Южного океана в январе–апреле 2016 года с борта НЭС «Академик Федоров» // Российские полярные исследования. 2016. № 2. С. 12–15.
2. Антипов Н. Н., Бунякин В. П., Кашин С. В., Кузнецов В. Л., Чистяков И. А. Океанографические исследования Южного океана в 41-м рейсе НЭС «Академик Федоров» // Российские полярные исследования. 2017. № 3. С. 8–10.
3. Антипов Н. Н., Кашин С. В., Молчанов М. С. Глубоководные океанологические исследования Южного океана с борта НЭС «Академик Трешников» в сезонный период 66-й РАЭ // Российские полярные исследования. 2021. № 3. С. 9–13.
4. Антипов Н. Н., Кашин С. В., Молчанов М. С., Федотова А. А. Основные результаты океанологических исследований Южного океана в сезонный период 67-й РАЭ // Российские полярные исследования. 2022. № 4. С. 18–24.
5. Антипов Н. Н., Кашин С. В., Молчанов М. С. Океанографические исследования Южного океана в 14-м рейсе НЭС «Академик Трешников» // Российские полярные исследования. 2020. № 2. С. 32–35.
6. Кречик В. А., Фрей Д. И., Морозов Е. Г. Особенности циркуляции вод в центральной части пролива Брансфилда в январе 2020 г. // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 101–105.
7. Морозов Е. Г. Течения в проливе Брансфилд // Доклады Академии наук. 2007. Т. 415. № 6. С. 823–825.
8. Мухаметьянов Р. З., Фрей Д. И., Морозов Е. Г. Течения в проливе Брансфилда по геострофическим расчетам и данным инструментальных измерений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 5. С. 583–590.
9. Caspel Van M., Hellmer H. H., Mata M. M. On the ventilation of Bransfield Strait deep basins // Deep-Sea Res. II. 2017. Vol. 149. P. 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.006>.
10. Damià Gomis, Marc A. García, Oswaldo López, Ananda Pascual Quasi-geostrophic 3D circulation and mass transport in the western Bransfield Strait during Austral summer 1995/96 // Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography. 2002. Vol. 49. No. 4–5. P. 603–621. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00114-X).

11. *Dotto T. S., Kerr R., Mata M. M., Garcia C. A. E.* Multidecadal freshening and lightening in the deep waters of the Bransfield Strait, Antarctica // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2016. Vol. 121. P. 3741–3756. <https://doi.org/10.1002/2015JC011228>.
12. *Frey D. I., Krechik V. A., Morozov E. G., Drozd I. D., Gordey A. S., Latushkin A. A., Mekhova O. S., Mukhametianov R. Z., Murzina S. A., Ostroumova S. A. et al.* Water Exchange between Deep Basins of the Bransfield Strait // *Water*. 2022. Vol. 14. 3193. <https://doi.org/10.3390/w14203193>.
13. *García M. A., Castro C. G., Ríos A. F., Doval M. D., Rosón G., Gomis D., López O.* Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96 // *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2002. Vol. 49. No. 4–5. 2002. P. 585–602. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00113-8).
14. *Gordey A. S., Frey D., Drozd I., Krechik V., Smirnova D. A., Gladyshev S., Morozov E.* Spatial variability of water mass transports in the Bransfield Strait based on direct current measurements // *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2024. Vol. 207. 104284. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2024.104284>.
15. *Gordon A. L., Mensch M., Zhaoqian D., Smethie W. M. Jr., de Bettencourt J.* Deep and bottom water of the Bransfield strait eastern and central basins // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2000. Vol. 105. P. 11337–11346. <https://doi.org/10.1029/2000JC900030>.
16. *Gordon A. L., Nowlin W. D.* The Basin Waters of the Bransfield Strait // *J. Phys. Oceanogr.* 1978. Vol. 8. P. 258–264. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1978\)008<0258:TBWOTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1978)008<0258:TBWOTB>2.0.CO;2).
17. *Heywood K. J., Naveira Garabato A. C., Stevens D. P., Muench R. D.* On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2004. Vol. 109. C06021. <https://doi.org/10.1029/2003JC002053>
18. *Hirano D., Kitade Y., Ohshima K. I., Fukamachi Y.* The role of turbulent mixing in the modified Shelf Water overflows that produce Cape Darnley Bottom Water // *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2015. Vol. 120. P. 910–922. <https://doi.org/10.1002/2014JC010059>.
19. *Hofmann E. E., Klinck J. M., Lascara C. M., Smith D. A.* Water Mass Distribution and Circulation West of the Antarctic Peninsula And Including Bransfield Strait // *Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula*. 2002. P. 61–80. <https://doi.org/10.1029/AR070p0061>.
20. *Huhn O., Hellmer H. H., Rhein M., Rodehacke C., Roether W., Schodlok M. P., Schröder M.* Evidence of deep- and bottom-water formation in the western Weddell Sea // *Deep Sea Res. Part II: Top. Stud. Oceanogr.* 2008. Vol. 55. P. 1098–1116. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.12.015>.
21. *Jackett D. R., McDougall T. J.* A neutral density variable for the world's oceans // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. Vol. 27. P. 237–263.
22. *López O., García M. A., Gomis D., Rojas P., Sospedra J., Sánchez-Arcilla A.* Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antarctica) // *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 1999. Vol. 46. No. 10. P. 1755–1778. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00017-5).
23. *McDougall T. J.* Neutral surfaces // *J. Phys. Oceanogr.* 1987. Vol. 17. P. 1950–1964.
24. *Mathias van Caspel, Hartmut H. Hellmer, Mauricio M. Mata* On the ventilation of Bransfield Strait deep basins // *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018. Vol. 149. P. 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.006>.
25. *Meng Zhou, Pearn P. Niiler, Yiwu Zhu, Ryan D. Dorland* The western boundary current in the Bransfield Strait, Antarctica // *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2006. Vol. 53. No. 7. P. 1244–1252. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.04.003>.

26. Orsi A. H., Johnson G. C., Bullister J. L. Circulation, mixing, and production of Antarctic bottom water // *Prog. Oceanogr.* 1999. Vol. 43. P. 55–109.
27. Poulin F., Stegner A., Hern M., Marrero-Díaz A., Sangrá P. Steep Shelf Stabilization of the Coastal Bransfield Current: Linear Stability Analysis // *J. Phys. Oceanogr.* 2014. Vol. 44 (2). P. 714–732. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0158.1>.
28. Sangrá P., Gordo C., Hernández-Arencibia M., Marrero-Díaz A., Rodríguez-Santana A., Stegner A., Martínez-Marrero A., Pelegrí J. L., Pichon T. The Bransfield Current System // *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers.* 2011. Vol. 58. No. 4. P. 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.011>.
29. Strass V. H., Rohardt G., Kanzow T., Hoppema M., Boebel O. Multidecadal Warming and Density Loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica // *J. Climate.* Vol. 33. P. 9863–9881. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0271.1>.
30. Tokarczyk R. Classification of water masses in the Bransfield Strait and Southern part of the Drake Passage using a method of statistical multidimensional analysis // *Polish Polar Research.* 1987. Vol. 8. P. 333–336.
31. Whitworth T., Nowlin W. D., Orsi A. H., Locarnini R. A., Smith S. G. Weddell Sea shelf water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia Confluence // *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers.* 1994. Vol. 41. No. 4. P. 629–641. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0967-0637(94)90046-9).
32. Whitworth III T., Orsi A. H., Kim S.-J., Nowlin W. D., Locarnini R. A. Water masses and mixing near Antarctic Slope Front // *Ocean, Ice and Atmosphere: Interactions at the Antarctic Continental Margin. Antarctic Res. Ser.* 1998. Vol. 75. P. 1–27.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024, одобрена к печати 28.06.2024.

Для цитирования: Макаров А. С., Антипов Н. Н., Кашин С. В., Молчанов М. С. Изменчивость водных масс пролива Брансфилд по данным наблюдений ААНИИ 2016–2022 гг. // *Океанологические исследования.* 2024. № 52 (2). С. 145–168. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).8).

VARIABILITY OF WATER MASSES IN BRANSFIELD STRAIT ACCORDING TO AARI OBSERVATIONS IN 2016–2022

A. S. Makarov*, N. N. Antipov, S. V. Kashin, M. S. Molchanov**

*State Scientific Center of the Russian Federation
Arctic and Antarctic Research Institute,
38, Beringa street, St. Petersburg, 199397, Russia,*

**e-mail: makarov@aari.ru*

***e-mail: mms@aari.ru*

The article presents the results of an analysis of deep-sea oceanographic observation data carried out by AARI scientists in the Bransfield Strait from 2016 to 2022. Bransfield Strait is characterized by complex dynamics, unique water masses, and high bioproductivity. Previous studies made it possible to get an idea of the structure and characteristics of water masses, water circulation, and features of the ice regime. Currently, against the background of observed climate changes, monitoring changes in the state of ocean waters is relevant. The main observations of the AARI vessel are carried out on a stationary section through the central basin of the Bransfield Strait, from Maxwell Bay to the continental slope of the Antarctic Peninsula; a series of observations consists of six realizations of the section with a discreteness of a year. Observations along

the section through the eastern basin of the strait were carried out twice, in 2018 and 2022. The interannual variability of the characteristics and dynamics of the water masses of the strait has been established. The temperature and salinity of the bottom layer of Bransfield Strait deep water (BDW), filling the abyssal of the central basin, varied from -1.58 to -1.80 °C and from 34.56 to 34.60 psu, respectively. The trend of warming by more than 0.2 °C (up to -1.578 °C) and desalination by 0.03 psu (up to 34.555 psu), observed in the period 2018–2020, was disrupted by a new cooling of 0.2 °C (up to -1.747 °C) and increase in salinity to 34.59 psu per year. The variability of the characteristics of the Bransfield Strait flow (BF), manifested in fluctuations in the horizontal (from 10 to 20 km) and vertical (from 200 to 550 m) flow dimensions, has been established. A sporadically appearing tongue of deep water from the Antarctic Circumpolar Current below the BF flow was recorded only in data obtained in 2020–2022. During this period, core characteristics showed noticeable variability in core depth (range 320–450 m), temperature (0.4 to 0.9 °C), and salinity (34.58–34.63 psu). A section through the eastern basin of the strait made it possible to detect an increase in the average temperature of the 1200 m thick BDW layer by 0.25 °C over 4 years (with a concomitant increase in salinity by 0.02 psu), reflecting the variability of the climatic scale.

Keywords: Bransfield Strait, Antarctic Peninsula, Bransfield Current, water mass, Bransfield Strait deep water, circumpolar deep water, central basin of Bransfield Strait, eastern basin of Bransfield Strait

Acknowledgement: This work is a contribution to project 5.2 «Complex oceanographic, climatic, glaciological and geophysical studies of Antarctica and Southern Ocean» funded by Roshydromet of the Russian Federation.

References

1. Antipov, N. N., V. P. Bunyakin, S. V. Kashin, V. L. Kuznecov, and I. A. Chistyakov, 2016: Okeanograficheskie issledovaniya Yuznogo okeana v yanvare–aprele 2016 goda s borta NES “Akademik Fedorov” (Oceanographic studies of the Southern Ocean in January–April 2016 from the board of the R/V “Academician Fedorov”). *Rossijskie polyarnye issledovaniya*, **2**, 12–15.
2. Antipov, N. N., V. P. Bunyakin, S. V. Kashin, V. L. Kuznetsov, and I. A. Czystiakov, 2017: Okeanologicheskie issledovaniya Yuznogo okeana v 41-m reise NES “Akademik Fedorov” (Oceanographic studies of the Southern Ocean in the 41st voyage of the R/V “Academician Fedorov”). *Rossijskie polyarnye issledovaniya*, **3**, 8–10.
3. Antipov, N. N., S. V. Kashin, and M. S. Molchanov, 2021: Glubokovodnye okeanologicheskie issledovaniya Yuznogo okeana s borta NES “Akademik Treshnikov” v sezonnyj period 66 RAE (Deep-sea oceanological research of the Southern Ocean from the board of the R/V “Academician Treshnikov” during the seasonal period of the 66th RAE). *Rossijskie polyarnye issledovaniya*, **3**, 9–13.
4. Antipov, N. N., S. V. Kashin, M. S. Molchanov, and A. A. Fedotova, 2022: Osnovnye rezul'taty okeanologicheskikh issledovanij Yuznogo okeana v sezonnyj period 67 RAE (The main results of oceanological studies of the Southern Ocean during the seasonal period of the 67th RAE). *Rossijskie polyarnye issledovaniya*, **4**, 18–24.
5. Antipov, N. N., S. V. Kashin, and M. S. Molchanov, 2020: Okeanograficheskie issledovaniya YUzhnogo okeana v 14 rejse NES “Akademik Treshnikov” (Oceanographic studies of the

- Southern Ocean in the 14th voyage of the R/V “Academician Treshnikov”). *Rossijskie polyarnye issledovaniya*, **2**, 32–35.
6. Krechik, V. A., D. I. Frej, and E. G. Morozov, 2021: Osobennosti cirkulyacii vod v central’noj chasti proliva Bransfilda v yanvare 2020 (Features of circulation in the central part of the Bransfield Strait in January 2020). *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle*, **496** (1), 101–105, <https://doi.org/10.31857/S2686739721010114>.
 7. Morozov, E. G., 2007: Techeniya v prolive Bransfild (Currents in the Bransfield Strait). *Doklady Akademii Nauk*, **415** (6), 823–825.
 8. Muhamet’yanov, R. Z., D. I. Frej, and E. G. Morozov, 2022: Techeniya v prolive Bransfilda po geostroficheskim raschetam i dannym instrumental’nyh izmerenij (Currents in the Bransfield Strait based on geostrophic calculations and data of instrumental measurements). *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, **58** (5), 583–590, <https://doi.org/10.31857/S0002351522050066>.
 9. Caspel, van M., H. H. Hellmer, and M. M. Mata, 2017: On the ventilation of Bransfield Strait deep basins. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 149, 25–30, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.006>.
 10. Gomis, D., Marc A. García, O. López, and A. Pascual, 2022: Quasi-geostrophic 3D circulation and mass transport in the western Bransfield Strait during Austral summer 1995/96. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **49** (4–5), 603–621, [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00114-X).
 11. Dotto, T. S., R. Kerr, M. M. Mata, and C. A. E. Garcia, 2016: Multidecadal freshening and lightening in the deep waters of the Bransfield Strait, Antarctica. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **121**, 3741–3756, <https://doi.org/10.1002/2015JC011228>.
 12. Frey, Dmitry I., Viktor A. Krechik, Eugene G. Morozov, Ilya D. Drozd, Alexandra S. Gordey, Alexander A. Latushkin, Olga S. Mekhova, Rinat Z. Mukhametianov, Svetlana A. Murzina, and Sofia A. Ostroumova et al., 2022: Water Exchange between Deep Basins of the Bransfield Strait. *Water*, **14** (20), 3193, <https://doi.org/10.3390/w14203193>.
 13. García, M. A., C. G. Castro, A. F. Ríos, M. D. Doval, G. Rosón, D. Gomis, and O. López, 2002: Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. *Deep Sea Research, Part II: Topical Studies in Oceanography*, **49** (4–5), 585–602, [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00113-8).
 14. Gordey, A. S., D. I. Frey, I. D. Drozd, V. A. Krechik, D. A. Smirnova, S. V. Gladyshev, and E. G. Morozov, 2024: Spatial variability of water mass transports in the Bransfield Strait based on direct current measurements, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **207**, 104284, <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2024.104284>.
 15. Gordon, A. L., M. Mensch, D. Zhaoqian, W. M. Jr. Smethie, and J. de Bettencourt, 2000: Deep and bottom water of the Bransfield Strait eastern and central basins. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **105**, 11337–11346, <https://doi:10.1029/2000JC900030>.
 16. Gordon, A. L. and W. D. Nowlin, 1978: The Basin Waters of the Bransfield Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, **8**, 258–264, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1978\)008<0258:TBWOTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1978)008<0258:TBWOTB>2.0.CO;2).
 17. Heywood, K. J., A. C. Naveira Garabato, D. P. Stevens, and R. D. Muench, 2004: On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **109**, <https://doi.org/10.1029/2003JC002053>.
 18. Hirano, D., Y. Kitade, K. I. Ohshima, and Y. Fukamachi, 2015: The role of turbulent mixing in the modified Shelf Water overflows that produce Cape Darnley Bottom Water, *J. Geophys. Res. Oceans*, **120**, 910–922, <https://doi.org/10.1002/2014JC010059>.
 19. Hofmann, E. E., J. M. Klinck, C. M. Lascara, and D. A. Smith, 2002: Water mass distribution and circulation west of the Antarctic Peninsula and including Bransfield Strait. *Foundations*

- for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula, 61–80, <https://doi.org/10.1029/AR070p0061>.
20. Huhn, O., H. H. Hellmer, M. Rhein, C. Rodehacke, W. Roether, M. P. Schodlok, and M. Schröder, 2008: Evidence of deep- and bottom-water formation in the western Weddell Sea. *Deep Sea Res. Part II: Top. Stud. Oceanogr.*, **55**, 1098–1116, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.12.015>.
 21. Jackett, David R. and Trevor J. McDougall, 1997: A Neutral Density Variable for the World's Oceans. *Journal of Physical Oceanography*, **27**, 237–263.
 22. López, O., M. A. García, D. Gomis, P. Rojas, J. Sospedra, and A. Sánchez-Arcilla, 1999: Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antarctica). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **46** (10), 1755–1778, [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00017-5).
 23. McDougall, T. J., 1987: Neutral surfaces, *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 950–1964.
 24. Mathias van Caspel, Hartmut H. Hellmer, and M. Mauricio, 2018: Mata On the ventilation of Bransfield Strait deep basins. *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*, **149**, 25–30, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.006>.
 25. Zhou, M., P. P. Niiler, Y. Zhu, and R. D. Dorland, 2006: The western boundary current in the Bransfield Strait, Antarctica. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **53** (7), 1244–1252, <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.04.003>.
 26. Orsi, A. H., G. C. Johnson, and J. L. Bullister, 1999: Circulation, mixing, and production of Antarctic bottom water. *Prog. Oceanogr.*, **43**, 55–109.
 27. Poulin, F. J., A. Stegner, M. Hernández-Arencibia, A. Marrero-Dí'az, and P. Sangra, 2014: Steep Shelf Stabilization of the Coastal Bransfield Current: Linear Stability Analysis. *J. Phys. Oceanogr.*, **44** (2), 714–732, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0158.1>.
 28. Sangrà, P., C. Gordo, M. Hernández-Arencibia, A. Marrero-Dí'az, A. Rodríguez-Santana, A. Stegner, A. Martínez-Marrero, J. L. Pelegrí, and T. Pichon, 2011: The Bransfield Current System. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **58** (4), 390–402, <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.011>.
 29. Strass, V. H., G. Rohardt, T. Kanzow, M. Hoppema, and O. Boebel, 2020: Multidecadal warming and density loss in the deep Weddell Sea. *Antarctica. J. Climate*, **33**, 9863–9881, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0271.1>.
 30. Tokarczyk, R., 1987: Classification of water masses in the Bransfield Strait and Southern part of the Drake Passage using a method of statistical multidimensional analysis. *Polish Polar Research*, **8**, 333–336.
 31. Whitworth, T., W. D. Nowlin, A. H. Orsi, R. A. Locarnini, and S. G. Smith, 1994: Weddell Sea shelf water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia Confluence. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **41** (4), 629–641, [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0967-0637(94)90046-9).
 32. Whitworth, T., A. H. Orsi, S.-J. Kim, W. D. Nowlin, and R. A. Locarnini, 1998: Water masses and mixing near Antarctic Slope Front. *Ocean, Ice and Atmosphere: Interactions at the Antarctic Continental Margin. Antarctic Res. Ser.*, **75**, 1–27.

Submitted 27.02.2024., accepted 28.06.2024.

For citation: Makarov, A. S., N. N. Antipov, S. V. Kashin, and M. S. Molchanov, 2024: Variability of water masses in Bransfield Strait according to AARI observations in 2016–2022. *Journal of Oceanological Research*, **52** (2), 145–168, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).8).