

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНЫХ МАСС В ОБЛАСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОННЫХ ВОД В ЗАЛИВЕ ПРИЮДС

Н.Н. АНТИПОВ, А.В. КЛЕПИКОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: borisova@aari.ru

В работе обсуждаются результаты экспедиционных исследований процессов формирования антарктической донной воды, проведенных в период с 2004 по 2016 г. в заливе Прюде моря Содружества. Анализируются данные океанологических наблюдений на разрезе по 70° в.д., выполненном за указанный период девять раз и пересекающем шельф и материковый склон в районе, где в летний период 2004 г. экспедиция ААНИИ на НЭС «Академик Федоров» впервые зафиксировала факт формирования донных вод. Дальнейшее целенаправленное исследование структуры и характеристик водных масс на данном разрезе и в прилегающей акватории подтвердило регулярность этих процессов в летний период. При этом была обнаружена существенная межгодовая изменчивость структуры, характеристик, механизмов распространения основных водных масс на разрезе — шельфовых, глубинных и донных, анализу которой посвящена данная работа. Впервые полученная подробная информация о топографии дна океана в створе разреза и его окрестностях позволила экспериментально показать определяющую роль особенностей донной топографии в распространении вновь образованной донной воды по материковому склону. Выявлена тенденция к увеличению в последние годы объемов формирующейся летом в заливе Прюде донной воды, что связывается с усилением интенсивности таяния нижней поверхности шельфового ледника, ведущего к увеличению объема формирования переохлажденной шельфовой воды — важнейшей компоненты при формировании донной воды.

Ключевые слова: Южный океан, Антарктида, антарктическая донная вода, донная вода залива Прюде, циркулярная глубинная вода, антарктическая шельфовая вода, вода шельфовых ледников, залив Прюде, антарктический склоновый фронт, материковый склон.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие в Южном океане и прежде всего на шельфе и континентальном склоне, являются исключительно важными для понимания происходящих изменений и разработки сценариев возможных климатических изменений. Абиссальная циркуляция Мирового океана, обусловленная распространением антарктических донных вод (АДВ), может играть значительную роль в сменах ледниковых и межледниковых периодов.

Антарктическая донная вода распространяется в придонном слое на север вплоть до умеренных широт Северного полушария, оказывая существенное влияние на глобальную структуру и интенсивность меридиональной циркуляции вод Мирового океана. В Атлантическом океане поверх АДВ и навстречу ей движется североатлантическая глубинная вода, образующаяся в верхнем слое океана к юго-востоку от Гренландии. Двигаясь на юг, относительно теплые и соленые глубинные воды Северной Атлантики с глубин более 3000 м поднимаются до глубин 500–800 м

в области Антарктического полярного фронта и вовлекаются в Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ). Перемещаясь вокруг Антарктиды в потоке АЦТ, североатлантическая глубинная вода посредством смешивания с окружающими водами (в частности, глубинными водами из Тихого и Индийского океанов) преобразуется в циркумполярную глубинную воду (ЦГВ). Под влиянием преобладающих над Южным океаном сильных западных ветров и под воздействием силы Кориолиса происходит отток поверхностных вод на север, что позволяет глубинным водам подниматься к поверхности вблизи континентального склона и шельфа.

Основой для всех протекающих в области материкового склона и шельфа процессов и формирующихся здесь типов водных масс является ЦГВ, поступление которой в эту область обеспечивается системой крупномасштабных циклонических круговоротов, южные ветви которых связаны с направленным на запад антарктическим прибрежным течением. Особенно хорошо круговороты выражены в морях Уэдделла, Росса и заливе Прюдс, которые глубоко вдаются в континент. Это приводит к образованию аномалий в морском ледяном покрове (областей тонкого и разреженного льда и даже полыней) из-за «подогрева» снизу, вызывает таяние оснований шельфовых ледников и способствует образованию донных вод путем смешивания ЦГВ с плотными холодными водами, образующимися на антарктическом шельфе. Район активного взаимодействия ЦГВ с водами шельфа, характеризующийся заметным обострением градиентов океанологических параметров, именуется антарктическим склоновым фронтом (Jacobs, 1991).

Главная составляющая антарктической донной воды — плотная антарктическая шельфовая вода (АШВ), которая формируется в первую очередь в период образования морского льда в осенне-зимний период и сопутствующего выброса соли, что продуцирует соленую воду с потенциальной температурой не выше $-1,85\text{ }^{\circ}\text{C}$, как точки замерзания при атмосферном давлении (Gill, 1973). Возникающая конвекция может достигать дна шельфа, формируя придонный слой АШВ. Этот процесс усиливается существованием прибрежных полыней, которые формируются и поддерживаются направленными от берега кatabатическими ветрами с континента, более сильными зимой. Часть этой плотной воды может быть модифицирована (стать холоднее и преснее, но в целом менее плотной) за счет таяния у нижней поверхности шельфовых ледников. В результате формируется водная масса, именуемая водой шельфовых ледников (ВШЛ), с температурой ниже $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (наблюдалась до примерно $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), поскольку рост давления с глубиной понижает точку замерзания морской воды (Carmack, Foster, 1975; Foldvik et al., 1985).

Эти водные массы (обычно их смесь) могут накапливаться в депрессиях на шельфе и со временем переливаться через обычно существующий порог у бровки шельфа или находить путь вниз по депрессиям в пороге или по каньонам в сторону глубокого океана. В процессе перемещения (как по шельфу, так и по материковому склону) эта вода смешивается с более теплой окружающей водой, которая является в той или иной степени трансформированной ЦГВ — модифицированной циркумполярной водой (МЦГВ). На шельфе она имеет достаточно низкую температуру (до $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), в области материкового склона — немного выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом собственно ЦГВ в непосредственной близости от бровки шельфа обычно имеет температуру около $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Carmack, 1977). Когда при перемещении по склону эта смесь делается равной по плотности окружающему океану, она покидает окрестности континентального

для формирования АДВ (Антипов, Клепиков, 2007). Кроме того, получена информация о процессах в области взаимодействия различных водных масс в районе бровки континентального шельфа, исследованы параметры вихревых и интрузионных образований в области Антарктического склонового фронта (АСФ). Возможность выполнить исследования тонкой структуры появилась, поскольку главной особенностью наблюдений в области бровки шельфа с борта НЭС «Академик Федоров» стало практически не обеспечивавшееся в предыдущих российских и зарубежных экспедициях высокое пространственное разрешение на разрезах. Это позволило обнаружить и определить параметры мезомасштабных образований, выполнить сравнение данных натурных наблюдений с результатами численных и лабораторных экспериментов и прийти к некоторым выводам фундаментального характера (Головин и др., 2011, 2013, 2016). Другой важной особенностью натурных исследований ААНИИ в заливе Прюдс является по возможности регулярное повторение некоторых разрезов с сохранением координат точек зондирования, направленное на изучение изменчивости процессов, определяющих режим вод залива.

Основным повторяемым разрезом стал разрез по 70° в.д. Результаты анализа данных наблюдений на нем позволили определить характеристики водной массы, названной донной водой залива Прюдс (ДВЗП), исследовать мезомасштабные структуры в области АСФ, сформулировать гипотезы, объясняющие установленную изменчивость (Антипов, Клепиков, 2007, 2011; Клепиков, Антипов, 2014).

Известно, что необходимым условием для формирования АДВ является образование в необходимых количествах АШВ (и ее модификации — ВШЛ). Экспедиционные исследования ААНИИ в регионе были направлены и на исследования особенностей формирования и распространения этих водных масс. С этой целью были выполнены разрезы вблизи фронта шельфового ледника Эймери, через котловину Эймери, в бухте Саннефьорд (рис. 1).

Важными для исследования процессов формирования АДВ явились данные о циркуляции и процессах образования ВШЛ под шельфовым ледником Эймери (Leffanue, Craven, 2004). Необходимость исследовать процессы в труднодоступных для судов районах и в наиболее холодный период года (поздняя осень – зима – ранняя весна) для составления представлений об их внутригодовой изменчивости привела к разработке и организации исследований по программе MEOP (Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole). Датчики для измерения температуры, электропроводности и давления устанавливались на морских слонах и тюленях в определенных местах Южного океана и в процессе их ныряния проводились измерения, которые затем через спутник передавались в центры данных.

Очень важный результат проекта MEOP заключается в получении данных о внутригодовой изменчивости структуры и характеристик вод антарктической зоны и в частности района залива Прюдс. Анализ показал, что в зимний, недоступный для наблюдений период (за исключением вынужденного дрейфа попавших в ледовый плен судов) структура и характеристики вод существенно отличаются от таковых для летнего периода. В частности, зимой хорошо выражено распространение по акватории залива МЦГВ, поставляющих соль для формирования АШВ, выявлена относительно высокая (по сравнению с летним периодом) соленость значительной части АШВ, связанная с существованием на акватории залива полыней (Williams et al., 2016). Важные результаты дал анализ данных наблюдений базы MEOP, спутниковой информации о состоянии ледяного покрова в течение года в регионе залива Прюдс, годовых серий наблюдений заякоренными придонными измерите-

лями течений, температуры и солёности, установленными в диапазоне долгот 64–69° в.д. на материковом склоне и вблизи его основания (глубины от 1500 до 3000 м). На основе этих данных группе японских, шведских и австралийских ученых удалось установить, что в течение года (в основном в зимний период) имеет место интенсивное ледообразование в полынье вблизи мыса Дарнли, приводящее к формированию больших объемов высокосолёной (более 34,8 ‰) шельфовой воды. Следствием этих процессов является зарегистрированное в зимний период формирование и опускание в абиссаль относительно солёной донной воды. В отличие от ранее идентифицированных источников АДВ, которые требуют наличия шельфового ледника и/или большой площади шельфовой области для накопления достаточного объема плотной шельфовой воды, донная вода, формирующаяся в полынье мыса Дарнли, в первую очередь обусловлена потоком соли, возникающим при образовании морского льда. Авторы считают, что примерно $(0,3–0,7) \cdot 10^6 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ плотной шельфовой воды, произведенной в полынье мыса Дарнли, трансформируется в АДВ. По оценкам авторов работы, эта водная масса, которую называли донной водой мыса Дарнли (ДВМД), составляет 6–13 % общего циркумполярного объема (Ohshima et al., 2013). При этом не отрицается возможности вклада шельфовой воды, формирующейся в полыньях залива Прюдс, в ДВМД. Однако вклад ДВЗП в донные воды, формирующиеся в этом регионе, оценивается как незначительный (Ohshima et al., 2013).

В то же время недавно опубликована работа, основанная на новых наблюдениях датчиками STD, установленными на морских млекопитающих, для периода 2011–2013 гг., которые представляют первую комплексную оценку формирования плотной шельфовой воды собственно в заливе Прюдс в зимний период. В ней показано, что после сложной эволюции, включающей формирование АШВ в трех полыньях и охлаждение и распреснение при взаимодействии с шельфовыми ледниками Эймери и Западным, плотная шельфовая вода выходит через канал Прюдс на материковый склон. Это рассматривается как прямой вклад в донную воду мыса Дарнли. Формированию плотной воды препятствует вток пресной воды от шельфовых ледников Эймери и Западного в круговорот залива Прюдс. Это исследование подчеркивает чувствительность формирующихся АДВ к увеличению притока пресной воды из-за усиления таяния шельфовых ледников и в конечном счете не исключает возможность заметного сокращения объема образуемых донных вод Антарктики в условиях потепления климата (Williams et al., 2016).

При этом заметим, что авторы данного исследования не располагают столь подробной информацией о реальной структуре вод в области материкового склона в этом регионе (в частности, на разрезе по 70° в.д.), показывающей достаточно заметный ежегодно наблюдаемый процесс опускания плотных вод по материковому склону в летний период. Наши оценки позволяют считать важным вклад ДВЗП, наблюдаемых на склоне в летний период, в формирование АДВ в этой области. Полученная нами оценочная величина вклада склонового каскадинга АШВ в вентиляцию глубинных и донных вод Южного океана 0,04–0,24 Св ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$) на бровке шельфа протяженностью $\sim 70 \text{ км}$, где, по нашим данным, наблюдался каскадинг АШВ (Головин и др., 2011).

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ДВЗП

Экспедиционные исследования ААНИИ в заливе Прюдс, направленные непосредственно на обнаружение факта и изучение процессов образования донных вод, были начаты в 2004 г. выполнением трех меридиональных разрезов (по 70, 71 и 72° в.д.), в районе депрессии в области бровки шельфа, представляющей наиболее вероятное место

выхода на материковый склон плотных АШВ. Выполнение этих разрезов представляло известные трудности, т.к. в основном, даже в летний период, здесь располагается пояс дрейфующих льдов сплоченностью до 10 баллов. Выбор оказался удачным, и уже в данной экспедиции был зафиксирован факт наличия на материковом склоне плотных холодных вод, названных нами донной водой залива Прюдс. При этом если на 72° в.д. ДВЗП на склоне отсутствовали, на 71° в.д. — обнаружены лишь в верхней части склона, то на 70° в.д. они практически заполняли область склона с наиболее низкой температурой (до –1 °С при солености 34,55–34,59 ‰) на глубине более 1500 м.

Последующее повторение разрезов подтвердило такое пространственное распределение ДВЗП в этом регионе и стало основанием для принятия решения о выборе разреза по 70° в.д. в качестве базового для исследования процессов формирования и перемещения ДВЗП, изучения их межгодовой изменчивости. В зависимости от выделенного времени, в конкретной экспедиции удавалось выполнить различное количество разрезов, положение которых выбиралось исходя из необходимости получения информации о пространственных особенностях распространения ДВЗП. При этом разрез по 70° в.д. выполнялся при каждой возможности. В результате за период с 2004 по 2017 г. в регионе между 62° и 72° в.д. был выполнен 21 меридионально ориентированный разрез. Из них по 70° в.д. было выполнено 9 реализаций разреза, всего 139 станций. Сведения о параметрах разрезов по 70° в.д. приведены в табл. 1. Там же указаны меридианы, вдоль которых в конкретной экспедиции выполнены параллельные разрезы. Как видно из таблицы, в большинстве случаев длина разреза составляла около 70 км, при этом северная станция разреза находилась в области глубин около 2000 м. В трех случаях длина составляла около 130 км и один раз — около 240 км. В этих случаях разрез достигал глубин около 2400 и 3000 м соответственно. Как показали результаты наблюдений на этих разрезах, во всех этих случаях глубже 2000 м в придонном слое наблюдалась вода, не имеющая очевидной связи с ДВЗП, а скорее происходящая из региона моря Уэдделла (температура около –0,20 °С и соленость около 34,66 ‰). Поэтому для исследования процессов формирования и рас-

Таблица 1

Характеристики разрезов по 70° в.д., выполненных НЭС «Академик Федоров» в сезонные периоды 49–61-й РАЭ в 2004–2016 гг.

№ РАЭ	Год	Период выполнения	Широта южной станции, град. ю.ш.	Широта северной станции, град. ю.ш.	Глубина южной станции, м	Глубина северной станции, м	Длина разреза, км	Количество станций на разрезе	Дополнительные разрезы, долготы (восточная)
49	2004	26–28.01	67,35	66,67	180	1717	76	7	71°, 72°
50	2005	14–15.01	67,13	66,50	315	2012	70,4	11	64°, 66°, 68°, 72°
51	2006	13–14.01	67,13	66,00	309	2443	126	14	64°
52	2007	17–19.01	67,13	65,00	311	2942	237	17	62°, 64°
56	2011	25–27.01	67,13	66,00	308	2425	126	18	
57	2012	22–23.01	67,13	66,00	300	2443	126	18	69°, 71°
58	2013	06–07.02	67,13	66,50	306	1976	70,4	18	
60	2015	26–27.01	67,13	66,50	303	1993	70,4	18	
61	2016	17–18.01	67,13	66,50	307	2011	70,4	18	70,05–71°

пространения ДВЗП и с учетом ограниченного времени, выделяемого для выполнения океанологических работ, в конечном счете склоновая часть разреза была ограничена с севера широтой 66,5° ю.ш. (района изобаты 2000), с увеличением плотности станций в районе бровки шельфа.

Для выполнения разрезов использовался зонд «SeaBird 911+», дающий возможность получить практически непрерывный профиль температуры, солёности и давления до глубин более 6000 м. Для отбора проб воды на заданных глубинах комплекс снабжен системой для крепления 24 батометров. Наблюдение за вертикальными профилями температуры и солёности на экране монитора в режиме реального времени позволяет оперативно уточнять глубины для отбора проб воды, учитывая реально наблюдаемые слои экстремумов температуры и солёности. Специальное устройство позволяет контролировать расстояние от прибора до дна в придонных слоях, что крайне важно при исследовании структуры вод на материковом склоне и шельфе, где придонные слои вод с высокой плотностью могут иметь небольшую толщину.

Зависимость характера циркуляции вод и распространения водных масс Южного океана от донной топографии хорошо известна. В 2016 г. удалось получить подробный эхолотный промер исследуемого участка шельфа и материкового склона в районе разреза по 70° в.д. Данные по рельефу дна позволяют объяснить некоторые особенности в распределении океанологических характеристик.

Анализ результатов наблюдений на разрезе по 70° в.д. для периода 2004 – 2013 гг. и некоторые научные выводы приведены в ряде работ (Антипов, Клепиков, 2007, 2011; Клепиков, Антипов, 2014). В них отражаются крупномасштабные особенности распределения свойств водных масс в конкретные годы, высказаны предположения о механизмах формирования и распространения АШВ, ЦГВ и ДВЗП. Кроме того, рассмотрены результаты анализа тонкой структуры, описаны особенности механизма каскадинга плотных вод на шельфе и материковом склоне, параметры и особенности интрузионного расслоения при взаимодействии водных масс в области АСФ, проблемы вихреобразования и другие вопросы, ответить на которые позволяет минимальное расстояние между точками зондирования на выполненных разрезах (Головин и др., 2011, 2013, 2016). Здесь мы исследуем особенности межгодовой изменчивости структуры вод на 70° в.д. путем сравнения особенностей распространения и параметров как исходных водных масс (АШВ, ВШЛ, ЦГВ, МЦГВ), так и свойств наблюдаемой в соответствующие годы ДВЗП. При этом в рассмотрение будут включены еще не публиковавшиеся результаты наблюдений на разрезе в 2015 и 2016 гг.

ВОДНЫЕ МАССЫ ЗАЛИВА ПРЮДС И ОСОБЕННОСТИ ИХ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ НА РАЗРЕЗЕ ПО 70° В.Д.

В соответствии с работой (Baines, Condie, 1998) формирование и распространение плотных водных масс имеет несколько стадий. Первая — формирование плотной воды за счет конвективных процессов, движимых поверхностным охлаждением и режекцией соли при формировании льда на континентальном шельфе, а затем возможная модификация за счет таяния шельфовых ледников. Плотная жидкость, продуцированная этими процессами, стремится аккумулироваться в топографических депрессиях.

Вторая стадия — геострофическая подстройка вновь сформированной водной массы при ее распространении на шельфе. Это ведет к возникновению пограничного фронта вблизи бровки шельфа, хотя в регионах значительной генерации плотной воды область этого приспособления может распространяться далее вниз по склону и

порождать значительное перемешивание с соседними водными массами. Бароклинная неустойчивость вдоль этого фронта и формирование вихрей являются важными процессами, которые могут вносить вклад в перенос плотных вод вниз по склону.

Возможная третья стадия — геострофический поток может так же быть направлен прямо вниз по склону подводными каньонами. Альтернативная третья стадия — перенос посредством гравитации и трения плотной воды вниз по склону в тонком слое у дна.

Очевидно, что наблюдаемая структура вод на склоне и шельфе в конкретный год зависит от многих факторов. Межгодовая изменчивость крупномасштабной циркуляции, в том числе изменение интенсивности поступления ЦГВ в район бровки шельфа, изменчивость процессов формирования и распространения холодных и плотных АШВ и ВШЛ, разнообразие и сочетание механизмов формирования и распространения ДВЗП от бровки шельфа вдоль материкового склона проявляются в значительной временной изменчивости структуры водных масс на разрезе, характеристик и объемов ДВЗП, наблюдаемых на разрезе по 70° в.д. в разные годы.

Основные особенности межгодовых изменений в структуре вод на разрезе по 70° в.д. могут быть прослежены путем сравнения некоторых параметров, характеризующих состояние основных водных масс, участвующих в процессах формирования донных вод и определяющих особенности процессов в области антарктического склонового фронта. Главными водными массами, взаимодействие которых и определяет особенности и интенсивность этих процессов, являются АШВ и ЦГВ.

В нашем исследовании для определения верхней границы донных вод на склоне (в нашем случае ДВЗП) используется плотностной параметр, известный как нейтральная плотность. Он широко применяется в океанологии и разработан в качестве альтернативы использованию набора отдельных поверхностей потенциальной плотности, отнесенных к различным уровням давления (McDougall, 1987; Jackett, McDougall, 1997). Нейтральная плотность полезна, если прослеживаемые водные массы при своем перемещении испытывают значительное изменение давления. Обычно этот параметр используется для анализа процессов перемешивания в TS -пространстве, проведения границ между водными массами, анализа распространения водных масс и их трансформации. В нашем исследовании мы используем предложенное в ряде работ в качестве верхней границы АДВ значение этого параметра $28,27 \text{ кг/м}^3$ (Orsi et al., 1999; Whitworth et al., 1998). Это позволяет выполнить сравнение наблюдаемых в разные годы ДВЗП как между собой, так и с результатами исследований других авторов.

Будучи самой соленой на шельфе (за исключением редких случаев, когда АШВ подстилается более теплой, но и более соленой МЦГВ), по мере приближения к бровке и далее вдоль дна она становится более соленой в принципе, но менее соленой, чем прилегающие воды (ЦГВ, АДВ, МЦГВ). Поскольку характер процессов в области АСФ в сильной степени зависит от величины градиентов между свойствами АШВ и ЦГВ, важное значение имеют объем и термохалинные свойства выходящей на бровку смеси АШВ и ВШЛ, которые, в свою очередь, зависят от объемов и параметров исходных АШВ и ВШЛ. Возможны такие параметры этой смеси в области бровки, которые обеспечат плотность, необходимую для опускания к основанию склона. При этом по наблюдениям на одиночном разрезе трудно утверждать, является ли обнаруженная на разрезе ДВЗП продуктом смешения ЦГВ с АШВ, наблюдаемым в створе разреза, или эти процессы имеют место за его пределами.

Важную роль играют и параметры ЦГВ — собственно температура и соленость, расстояние от бровки, глубина положения ядра. При этом характеристики ядра ЦГВ в створе разреза могут отличаться от этих параметров восточнее, где, возможно, происходят процессы смешивания ЦГВ и АШВ и начинается процесс опускания ДВЗП, которая затем пересекает створ разреза по 70° в.д.

Заметим, что одним из промежуточных результатов взаимодействия ЦГВ с АШВ, а также с антарктической поверхностной водой является модифицированная циркумполярная глубинная вода, которая проявляется на шельфе как слой относительного максимума температуры, формирование которого не связано с летним прогревом поверхности моря. В дальнейшем МЦГВ, взаимодействуя с АШВ, может формировать смеси, которые могут затем опускаться по материковому склону (ДВЗП) или распространяться в виде интрузий и вихревых образований (вентиляция слоя ЦГВ).

Выполненные с 2004 по 2016 г. девять реализаций разреза по 70° в.д. позволяют сопоставить свойства и структуру АШВ и ЦГВ с реально наблюдаемыми в каждой из реализаций характеристиками и структурой обнаруживаемых плотных ДВЗП и сделать предположения о причинах и последствиях наблюдаемых отличий.

Заметим, что структура вод на конкретном разрезе (в данном случае по 70° в.д.) определяется как процессами, протекающими непосредственно в его плоскости или ближайших окрестностях, так и потоками или мезомасштабными образованиями, пересекающим в том или ином направлении плоскость разреза в момент его выполнения. Адекватное описание взаимодействия и распространения вод можно получить только путем выполнения площадной съемки с расстояниями между станциями, меньшими, чем масштабы исследуемых процессов. Вместе с тем вихреразрешающая дискретность зондирования в области АСФ на одном конкретном разрезе позволяет получить некоторые важные характеристики мезомасштабных образований.

Как видно из представленной на рис. 1 схемы, южная станция разреза находится на шельфе в 30 км от его бровки. При этом на первых реализациях разреза расстояния между станциями в области, близкой к бровке шельфа, составляло примерно 3 минуты широты (около 5,5 км), а в последнее время (2011–2016 гг.) расстояния между станциями на протяжении 7 км южнее и 10 км мористее бровки шельфа составляли 1 минуту широты (около 1,8 км).

Вертикальная дискретность в результате осреднения составила 1 м, зондирования в основном завершались на расстоянии около 30 м от дна. Очевидно, что выводы о межгодовой изменчивости структуры вод на разрезе нужно делать с учетом различий в расстояниях между точками зондирования между конкретными реализациями. При этом начиная с 2005 г. и до настоящего времени расстояния между точками зондирования на участке склона с глубинами от 1300–1400 м до 2000 м не менялось (5,5–7,4 км), что делает сравнимыми параметры обнаруженных на этом участке разреза ДВЗП для всего периода наблюдений (исключая разрез 2004 г.).

На рис. 2 и 3 (см. цвет. вклейку) представлены распределения потенциальной температуры на совпадающих частях всех девяти реализаций разреза. На рис. 2 показана структура для реализаций, выполненных в 2005–2007 и 2011 гг., когда расстояние между станциями в области бровки шельфа было более значительным. На рис. 3 приведены разрезы, выполненные в период с 2012 по 2016 г., с более подробной картиной термической структуры в области бровки шельфа. На всех приводимых здесь схемах разрезов использован рельеф дна, полученный подробным эхолотным промером в экспедиции 2016 г.

На представленных рисунках штриховкой выделены области, отражающие распространение основных водных масс. На шельфе заштрихованы области внутри изотерм $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, определяющие положение АШВ. В придонном слое в области материкового склона выделены области, занимаемые водой с нейтральной плотностью более $28,27\text{ кг/м}^3$ и более $28,36\text{ кг/м}^3$, которые представляют собой модификации свежееобразованной ДВЗП.

Термическая структура на девяти реализациях разреза показывает ярко выраженную временную изменчивость структуры, характеристик, положения и объемов основных водных масс. Становится понятным, почему в некоторых районах антарктического шельфа и склона отдельно выполненный разрез может ввести в заблуждение относительно возможности или невозможности формирования и трансформации водных масс, в частности, формирования АДВ. На представленных схемах выражены случаи как полного отсутствия ДВЗП (январь 2006 г.), так и случаи их значительных объемов (наиболее значительные — 2015 и 2016 гг.). Особо выделяется структура вод в 2011 г., в которой наглядно выражен вклад вихревых образований в перенос плотной воды вниз по материковому склону. Подробное горизонтальное разрешение дает возможность обнаружить сложную структуру вод в области АСФ, расположенного мористее бровки шельфа над верхней частью материкового склона. Основные особенности изменчивости структуры и характеристик водных масс будут рассмотрены ниже.

Общее представление о водных массах и их свойствах для района разреза по 70° в.д. дает табл. 2, в которой приведены средние и экстремальные значения основных гидрологических и гидрохимических характеристик, рассчитанные по результатам всех девяти реализаций разреза.

Таблица 2

Средние и экстремальные значения характеристик основных водных масс на разрезе по 70° в.д. для периода 2004–2016 гг.

Характеристики		Водная масса						
		АПВ	АЗВ	АШВ	МЦГВ	ЦГВ	АДВ	ДВЗП
T, $^{\circ}\text{C}$	средн.	–0,72	–1,77	–1,80	–0,94	0,66	–0,20	–0,97
	макс.	1,22	–1,32	–1,68	–0,10	0,86	–0,01	–0,43
	мин.	–1,84	–1,83	–1,91	–1,64	0,31	–0,49	–1,49
S, ‰	средн.	33,45	34,28	34,51	34,49	34,67	34,66	34,58
	макс.	34,31	34,48	34,58	34,59	34,70	34,67	34,64
	мин.	32,32	33,85	34,43	34,25	34,64	34,63	34,52
O ₂ , мл/л	средн.	7,9	6,9	7,0	6,4	4,9	5,0	5,9
	макс.	9,1	8,0	7,3	7,3	5,6	5,6	6,7
	мин.	7,0	5,9	6,5	5,3	4,3	4,9	5,1
Si, мкг-ат/л	средн.	44	64	69	75	103	126	86
	макс.	69	88	82	89	120	137	108
	мин.	12	38	61	66	79	116	68
PO ₄ , мкг-ат/л	средн.	1,30	2,13	2,12	2,21	2,22		2,19
	макс.	1,92	2,26	2,17	2,37	2,22		2,32
	мин.	0,70	1,98	2,03	2,16	2,23		2,10

АНТАРКТИЧЕСКАЯ ШЕЛЬФОВАЯ ВОДА И ВОДА ШЕЛЬФОВЫХ ЛЕДНИКОВ

Антарктическая шельфовая вода выделяется на конкретной станции по низкой температуре и положению в нижней (в редких случаях средней) части колонки воды. Аналогичную низкую температуру может иметь только зимняя модификация антарктической поверхностной воды, легко идентифицируемая по приповерхностному положению, поэтому установление наличия в точке зондирования АШВ (или ВШЛ) и определение ее свойств не представляют трудности. Поскольку основной район формирования АШВ и ВШЛ, обнаруживаемых на разрезе по 70° в.д., расположен на расстоянии приблизительно 100 миль от разреза (ориентировочное расстояние до фронта ледника Эймери, при скорости течения 1 см/с вода пройдет этот путь примерно за 6–7 месяцев), в процессе перемещения в западной ветви циклонической циркуляции, существующей в заливе Прюдс (Григорьев, 1968; Антипов, Клепиков, 2003), происходит трансформация их свойств за счет перемешивания как между собой, так и с АПВ или МЦГВ. При этом температура остается главным параметром для идентификации этих водных масс.

Очевидно, чем больше вклад ВШЛ в смесь с АШВ, тем ниже температура смеси, которая на значительном расстоянии от района формирования по формальным признакам может быть отнесена к АШВ. В нашем исследовании к ВШЛ будем относить воду с температурой ниже $-1,9^{\circ}\text{C}$. Вода с температурой от $-1,8$ до $-1,9^{\circ}\text{C}$ будет рассматриваться как ядро АШВ, а границы распространения этой водной массы будем определять по изотерме $-1,7^{\circ}\text{C}$. Заметим, что низкую температуру может иметь и МЦГВ, при этом она может быть продуктом смешения ЦГВ и АШВ, а может быть продуктом смешения ЦГВ и АПВ (точнее АЗВ) (Carmack, 1977; Orsi et al., 1999). При характерных для шельфовой области температурах воды плотностная стратификация определяется распределением солёности. Поэтому, за исключением особых случаев неустойчивости в области АСФ, стратификация всегда устойчива, т.е. значения солёности возрастают в направлении дна.

На всех девяти реализациях обнаруживается АШВ, т.е. на всех разрезах присутствует вода с потенциальной температурой ниже $-1,8^{\circ}\text{C}$. Обобщение данных наблюдений над характеристиками АШВ приведено в табл. 3.

Видно, что ядро АШВ (т.е. наиболее низкие в конкретной реализации температуры АШВ) лишь в трех из девяти случаев расположено на южной станции разреза (2005, 2006 и 2013 гг.). Лишь в 2013 г. температура в ядре была ниже $-1,9^{\circ}\text{C}$, т.е. вода может быть идентифицирована как ВШЛ (или смесь АШВ и ВШЛ, содержащая более высокий процент ВШЛ, чем в другие годы). Во все остальные годы температура в ядре АШВ находилась в диапазоне от $-1,8$ до $-1,87^{\circ}\text{C}$. При этом солёность в ядре составляла в основном от 34,50 ‰ до 34,53 ‰, т.е. АШВ залива Прюдс может быть отнесена к низкосолёной модификации (Carmack, 1977). Обнаружение ядра АШВ севернее южной станции разреза отражает перемещение ее с востока, от направленного вдоль восточного склона котловины Эймери на север потока шельфовых вод (данных, отражающих поступление АШВ на 70° в.д. с запада, на сегодня не обнаружено, хотя исключать это нельзя). При этом обнаружение ядра АШВ на южной станции разреза не отменяет утверждения о перемещении АШВ на разрез с востока, с более ранним смещением потока АШВ к западу.

Заметим, что практически во всех случаях в плоскости разреза самая низкая температура в слое АШВ (как и самая высокая солёность) располагалась у дна. Ис-

Средние характеристики антарктической шельфовой воды

Характеристика		Год								
		2004	2005	2006	2007	2011	2012	2013	2015	2016
T, °C	средн.	–1,86	–1,88	–1,76	–1,83	–1,83	–1,81	–1,84	–1,75	–1,82
	макс.	–1,70	–1,86	–1,70	–1,79	–1,79	–1,79	–1,74	–1,68	–1,77
	мин.	–1,89	–1,90	–1,80	–1,87	–1,86	–1,84	–1,91	–1,83	–1,89
S, ‰	средн.	34,53	34,56	34,51	34,52	34,44	34,52	34,50	34,49	34,54
	макс.	34,58	34,65	34,53	34,52	34,49	34,52	34,48	34,49	34,55
	мин.	34,48	34,52	34,50	34,51	34,43	34,51	34,51	34,48	34,52
O ₂ , мл/л	средн.	7,05		7,28		6,68	7,0	6,6	7,0	7,1
	макс.	7,30		7,35		6,81	7,0	6,8	7,1	7,2
	мин.	6,60		7,21		6,54	7,0	6,5	7,0	7,0
Si, мкг-ат/л	средн.	68		78				63	68	67
	макс.	72		82				64	69	68
	мин.	63		75				61	66	65
PO ₄ , мкг-ат/л	средн.							2,09		2,14
	макс.							2,14		2,17
	мин.							2,03		2,10

ключение составляет разрез 2011 г., когда слой АШВ с ядром, расположенным на расстоянии 6 км от бровки шельфа (самое близкое к бровке шельфа из всех реализаций расположение ядра с потенциальной температурой –1,86 °C) подстилался достаточно тонким (70–100 м) слоем относительно теплой (выше –1,6 °C) МЦГВ, имевшей соленость 34,49 ‰. Соленость АШВ в данном случае была аномально низкая (в ядре 34,44 ‰). Поскольку соленость низкая, а температура, несмотря на наибольшее удаление из всех случаев от источника, близка к температуре замерзания, можно полагать повышенный (относительно других реализаций) вклад в эту воду ВШЛ. Кроме того, на данном разрезе за бровкой шельфа (глубина места более 800 м) присутствует холодный вихрь, содержащий практически нетрансформированную шельфовую воду (–1,86 °C, 34,45 ‰).

Изотерма –1,7 °C, принятая нами за границу АШВ, позволяет сравнить для всех реализаций степень приближения этих вод к бровке шельфа и соответственно области АСФ. Лишь в 2015 г. АШВ наблюдается непосредственно на бровке (температура придонного слоя –1,77 °C при солености 34,49 ‰). Очень близко к бровке, на расстоянии около 1 км, она располагалась в описанном выше аномальном 2011 г. В случаях обнаружения ядра на южной станции разреза изотерма –1,7 °C наблюдалась на наибольшем удалении от бровки шельфа (11–19 км). Даже в случае 2013 г., когда была обнаружена вода с температурой ниже –1,91 °C, изотерма –1,7 °C наблюдалась на расстоянии 17 км от бровки шельфа. Возможно, ширина смещающегося к западу потока АШВ в среднем сохраняется, но это смещение происходило на большем или меньшем удалении от бровки (или от источника).

Существует прямая зависимость между удаленностью ядра АШВ и удаленностью изотермы –1,7 °C (индикатора протяженности слоя АШВ в створе разреза) от бровки шельфа. Исключение наблюдалось в 2015 г., когда АШВ на разрезе наблюдалась в пределах всего шельфа (изотерма –1,7 °C достигала бровки шельфа),

тогда как ядро (минимальные температуры) наблюдалось в 18 км от бровки шельфа. Отметим, что в 2015 г. наблюдалась самая низкая температура придонного слоя на бровке шельфа (при солёности 34,48 ‰), когда в единственном случае АШВ достигла бровки шельфа. Более низкая солёность была наблюдаена и в ядре АШВ (34,49 ‰ при температуре $-1,83\text{ }^{\circ}\text{C}$), что отражает увеличенный вклад ВШЛ.

Таким образом, можно сделать следующие выводы о различиях в характеристиках и распространении АШВ за рассматриваемый период.

Выявлена изменчивость в пути поступления АШВ на разрез. Поступление с юга, когда наименее трансформированная вода наблюдаена на южной станции разреза с дальнейшей трансформацией в плоскости разреза в сторону потепления. Поступление с востока, когда ядро наблюдалось на одной из промежуточных станций на шельфе. В основном близость ядра к бровке шельфа определяет и степень распространения АШВ к северу в плоскости разреза, и температуру придонного слоя в районе бровки шельфа.

Установлено, что при наблюдаемой относительно постоянной солёности (34,51–34,53 ‰) в ядре АШВ, расположенном обычно в придонном слое, имеют место и случаи пониженной солёности в ядре. В 2013 г. она составила 34,48 ‰ при самой низкой температуре за период наблюдений $-1,91\text{ }^{\circ}\text{C}$. В 2015 г. солёность ядра АШВ составляла 34,49 ‰ при температуре $-1,83\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом АШВ была распространена в пределах всей шельфовой области разреза с выходом на бровку шельфа. Ещё более низкая солёность (34,44 ‰) наблюдаена в ядре АШВ в 2011 г., когда слаботрансформированная АШВ обнаруживается в пределах практически всей шельфовой области с ядром вблизи бровки на промежуточных глубинах и подстилалась относительно тёплой МЦГВ. Указанные случаи пониженных значений температуры и солёности могут быть объяснены повышенным вкладом ВШЛ в наблюдаемую смесь (идентифицируемую нами как АШВ), причины чего могут лежать в крупномасштабных изменениях в характере и интенсивности циркуляции вод.

ЦИРКУМПОЛЯРНАЯ ГЛУБИННАЯ ВОДА И МОДИФИЦИРОВАННАЯ ГЛУБИННАЯ ВОДА

Ещё раз подчеркнем, что циркумполярная глубинная вода — определяющая водная масса для процессов в антарктической зоне Южного океана. Важными параметрами слоя ЦГВ с точки зрения ее участия в формировании ДВЗП являются как термохалинные характеристики, так и расстояние от бровки шельфа. Следствием их изменчивости будут и особенности структуры АСФ, и изменчивость процессов формирования ДВЗП. Результаты наблюдений показывают наличие межгодовой изменчивости свойств ЦГВ в данном регионе за исследуемый период.

Для анализа изменчивости потока ЦГВ были определены характеристики слоя температурного максимума ($T_{\text{макс}}$), обычно расположенного вблизи верхней границы ЦГВ, для станций, расположенных в 6, 12, 18 и 24 км от бровки шельфа в каждой реализации (см. табл. 4).

Отметим, что межгодовая изменчивость температуры слоя $T_{\text{макс}}$ для всех станций носила синхронный характер, т.е. понижение или повышение температуры слоя $T_{\text{макс}}$ в конкретный год происходило на всех станциях разреза. При этом изменения на ближайшей к бровке станции отличались большим разбросом (среднеквадратическое отклонение температуры составило 0,34), поскольку, особенно в 2006 и 2011 гг., слой $T_{\text{макс}}$ здесь был сильно трансформирован процессами взаимодействия с АШВ в области АСФ.

Характеристики слоя $T_{\text{макс}}$ ЦГВ на разрезе по 70° в.д. для периода 2004–2016 гг.

Год	Бровка шельфа		Характеристики ЦГВ на совпадающих станциях											
	Θ, °C	S, ‰	Станция 6 км от БШ			Станция 12 км от БШ			Станция 18 км от БШ			Станция 24 км от БШ		
			H, м	Θ, °C	S, ‰	H, м	Θ, °C	S, ‰	H, м	Θ, °C	S, ‰	H, м	Θ, °C	S, ‰
2004	-1,60	34,52	—	—	—	—	—	—	610	0,64	34,68	610	0,65	34,68
2005	-1,61	34,53	690	0,42	34,67	690	0,69	34,69	710	0,68	34,69	630	0,68	34,69
2006	-1,4	34,51	590	-0,14	34,59	680	0,64	34,68	750	0,6	34,68	750	0,61	34,68
2007	-1,22	34,53	520	0,72	34,66	570	0,81	34,68	560	0,77	34,68	590	0,77	34,69
2011	-1,48	34,51	780	0,02	34,64	700	0,64	34,68	720	0,64	34,64	720	0,65	34,68
2012	-0,22	34,62	670	0,7	34,68	705	0,71	34,69	715	0,72	34,69	690	0,71	34,69
2013	-0,78	34,57	660	0,5	34,66	650	0,65	34,67	680	0,64	34,68	700	0,63	34,68
2015	-1,77	34,48	660	0,63	34,67	750	0,66	34,67	710	0,7	34,67	650	0,65	34,67
2016	-1,27	34,57	520	0,56	34,67	640	0,62	34,66	570	0,66	34,67	560	0,68	34,68

Примечание. H — глубина, м; Θ — потенциальная температура, °C; S — соленость, ‰

На станциях северной части разреза, не подверженных непосредственному воздействию процессов на склоне, температура находилась в диапазоне 0,64–0,81 °C (среднее квадратическое отклонение 0,05–0,06, межгодовые изменения не выходили из диапазона 0,2 °C). Мала была и изменчивость солености (среднее квадратическое отклонение в каждой точке не превышало 0,01, значения солености слоя $T_{\text{макс}}$ находились в диапазоне 34,67–34,69 ‰). При этом лишь в 2007 г. наблюдалась температура выше 0,8 °C (на станции в 12 км от бровки шельфа).

Выше 0,7 °C температура слоя была в 2012 и 2015 гг. Наконец, во всех случаях максимальная температура была выше 0,6 °C. Мы использовали значение 0,5 °C в качестве индикатора для анализа положения потока ЦГВ относительно бровки шельфа.

В табл. 5 приведены средние и экстремальные значения температуры и солености слоев максимальной температуры ЦГВ и МЦГВ, осредненные по разрезу, а также удаленность изотермы 0,5 °C от бровки шельфа для каждой реализации. Наиболее близко к бровке изотерма 0,5 °C находилась в 2016 г., когда расстояние составило 2 км, в 2007, 2012, 2013 и 2015 гг. расстояние составляло 5 км. Около 10 км расстояние было в 2005, 2006 и 2011 гг. Годам с более высокой средней температурой ЦГВ на разрезе соответствовало в среднем наибольшее приближение потока ЦГВ к бровке шельфа.

Модифицированная ЦГВ обнаружена на каждой реализации разреза. В большинстве случаев наиболее теплая МЦГВ наблюдалась на станции вблизи бровки шельфа, а самая низкая — в районе южных станций разрезов. Однако были наблюдаемы случаи положения локальных максимумов в ядре МЦГВ в средней, а также в южной части разреза (2007, 2015 и 2016 гг.). Не исключая возможности поступления МЦГВ на шельф в створе разреза, кажется, что в основном проникновение МЦГВ на шельф происходит восточнее и в большинстве случаев МЦГВ на разрезе по 70° в.д. имеет адвективное происхождение. Это в принципе подтверждается отсутствием очевидной взаимосвязи между изменением температуры ЦГВ и МЦГВ (табл. 4). В любом случае, достаточно широкая распространенность МЦГВ в области шельфа предполагает ее заметный вклад в трансформацию АШВ по мере их приближения к бровке шельфа.

Средние и экстремальные значения характеристик ядер ЦГВ и МЦГВ по разрезам, ранжированные по средней температуре слоя $T_{\text{макс. ЦГВ}}$

Год	Расстояние (км) изотермы 0,5 °С до бровки шельфа	ЦГВ						МЦГВ	
		$\Theta_{\text{сред.}}^{\circ\text{C}}$	$\Theta_{\text{макс.}}^{\circ\text{C}}$	$\Theta_{\text{мин.}}^{\circ\text{C}}$	$S_{\text{сред.}}^{\text{‰}}$	$S_{\text{макс.}}^{\text{‰}}$	$S_{\text{мин.}}^{\text{‰}}$	$\Theta_{\text{сред.}}^{\circ\text{C}}$	$S_{\text{сред.}}^{\text{‰}}$
2006	10	0,43	0,64	–0,14	34,66	34,68	34,59	–1,15	34,48
2011	7	0,49	0,65	0,02	34,67	34,68	34,64	–1,28	34,46
2013	5	0,60	0,65	0,50	34,67	34,68	34,66	–0,46	34,55
2005	7	0,62	0,69	0,42	34,69	34,69	34,67	–0,95	34,52
2016	2	0,63	0,68	0,56	34,67	34,68	34,66	–0,60	34,53
2015	5	0,66	0,7	0,63	34,67	34,67	34,67	–1,42	34,41
2012	5	0,71	0,72	0,70	34,69	34,69	34,68	–0,45	34,56
2007	5	0,77	0,81	0,72	34,68	34,69	34,66	–1,16	34,47

Таким образом, температура в ядре ЦГВ (слое $T_{\text{макс.}}$) в межгодовом плане менялась синхронно на всех станциях, т.е. потепление или похолодание слоя относительно предыдущего года наблюдалось с одним знаком в пределах всего разреза. Средние по разрезу значения температуры ЦГВ, не включающие значения в интрузиях и вихрях, находятся в диапазоне от 0,62 °С до 0,78 °С. При этом в среднем более теплая ЦГВ наиболее приближена к бровке шельфа. Это может означать, что причиной приближения к бровке более теплой ЦГВ и, как следствие, обострения градиентов на фронте с последствиями, реализуемыми на разных масштабах, может быть усиление интенсивности собственно АЦТ или интенсификация субполярных круговоротов, ответственных за доставку ЦГВ в область материкового склона Антарктиды.

ДОННАЯ ВОДА ЗАЛИВА ПРЮДС

Как уже отмечено выше, в формировании АДВ участвуют АШВ, ВШЛ, МЦГВ и собственно ЦГВ. Возможны различные варианты процессов перемешивания этих водных масс (Whitworth et al., 1998; Middleton, Humphries, 1989; Jacobs et al., 1970). Отметим, что АШВ (в нашем случае смесь с ВШЛ) может иметь такую плотность, что будет способна опуститься по материковому склону в абиссаль без повышения плотности вследствие взаимодействия с другими водными массами (уплотнение при смешении).

Как показывают исследования, многие детали процессов формирования плотных вод на шельфе (АШВ, ВШЛ) и их перемещения вниз по склону являются до сих пор неясными, и эти детали, возможно, меняются от места к месту или во времени (Baines, Condie, 1998), что подтверждают и наши наблюдения.

Известно, что характер распространения плотных вод с шельфа к океанскому ложу в значительной степени зависит от топографии дна. Роль каньонов на склоне отмечена выше. Кроме того, важную роль играет уклон дна и характер его изменения. Однако существует мнение, что многие районы континентального склона Антарктиды имеют топографические особенности с размерами менее 10 км (типичные подводные каньоны имеют относительно крутые стороны и ширину в несколько км) и поэтому они адекватно не представлены на картах (Baines, Condie, 1998) и недостаточно отражены в массивах данных донной топографии. Мы располагаем подробным маршрутным промером, выполненным в 2016 г., и на представленных схемах хорошо выражены особенности топографии дна в створе разреза по 70° в.д., позволяющие соотнести их положение с распространением ДВЗП.

Выделение обнаруженных холодных и плотных вод в области склона в качестве ДВЗП проводилось путем расчета нейтральной плотности. В качестве границы, разделяющей ЦГВ и АДВ, в настоящее время принято использовать значение $28,27 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (Orsi et al., 1999). При этом нужно отметить, что данная изоповерхность отражает и связь наблюдаемых ДВЗП с АШВ. Т.е., если АШВ на шельфе имеет такую или более нейтральную плотность на шельфе, она очевидно будет способна опуститься до уровня АДВ. Сразу отметим, что ни в одной реализации разреза по 70° в.д. не обнаружена АШВ с таким высоким значением нейтральной плотности. При этом практически на всех реализациях разреза в области материкового склона от глубин несколько глубже 1000 м обнаруживается вода более плотная, чем $28,27 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Кроме того, выделяют и более плотную модификацию АДВ со значениями нейтральной плотности $> 28,36 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (Orsi et al., 1999), которая, как считается, не покидает антарктической зоны. ДВЗП, выделенная по этим значениям нейтральной плотности, показана на рис. 2 и 3 (см. цвет. вклейку) соответствующей штриховкой.

Как видно из рис. 2 и 3, форма и локализация верхней границы ДВЗП на разрезе позволяют предполагать, что во всех случаях эта водная масса пересекает створ разреза в западном направлении в виде или плюма (отделенного от источника объема плотной воды), или потока, связанного с источником на шельфе, расположенном восточнее разреза, и направляемого по склону донной топографией. Благодаря представленному на рисунках реальному подробному профилю дна последнее утверждение кажется достаточно очевидным. На расстоянии 39 км от начала разреза наблюдается первое заглубления рельефа дна, с его подъемом через 1 км на 70 м. Далее мористее начинается увеличение глубины с небольшими локальными нарушениями монотонности, через 10 км достигающее глубины 1670 м, после чего снова виден подъем дна на 40 м на расстоянии 2 км. Как видно из рисунков, к этим особенностям рельефа дна приурочены все наблюдаемые объемы ДВЗП. Ядро ДВЗП (станция с минимальной для разреза температурой ДВЗП) приурочено дважды к первому (южному) заглублению, трижды — к северному (более глубокому), в одном случае смещено еще севернее. Характеристики ядра ДВЗП для каждого разреза приведены в табл. 6. Здесь же приведены некоторые характеристики для всего слоя ДВЗП. Приведена средняя толщина слоя ДВЗП на конкретном разрезе. Для приблизительного сравнения объемов рассчитаны протяженность по меридиану и оценка площади, занимаемой в створе разреза этой водной массой.

Отметим, что при расположении ядра ДВЗП в диапазоне глубин 1400–1800 м (табл. 6), южная граница области ДВЗП располагалась в районе глубин 1100–400 м, а северная граница наблюдалась в основном на глубинах 1900–2000 м. Протяженность слоя по меридиану в основном находилась в диапазоне 20–35 км. Исключение составил 2011 г., когда объем ДВЗП на склоне был крайне незначителен и протяженность в створе разреза была оценена в 11 км при минимальной средней толщине слоя 33 м. Как упоминалось выше, в этом году наблюдалась аномально низкая соленость АШВ (34,44 ‰), активное вихреобразование в области АСФ, одна из самых низких температур ЦГВ (табл. 5), и в створе разреза был обнаружен вихрь, содержащий плотную ДВЗП. Указанные особенности позволяют предположить, что в данном случае формирование ДВЗП шло менее активно, в основном за счет вихревого переноса вниз по склону, зато имела место более интенсивная трансформация ЦГВ, что подтверждает положение поверхностей нейтральной плотности на данной реализации разреза (рис. 3 цвет. вклейки).

Параметры ядра донной водой залива Прюдс

Год	Характеристики слоя ДВЗП			Характеристики ядра ДВЗП						
	Объем, км ³	Толщина средняя, м	Длина, км	№ ст. ядра	Толщина, м	Глубина, м	Нейтр. плотность, кг·м ⁻³	T, °C	S, ‰	O ₂ , мл/л
2004	0,6	84	8	27	91	1500	28,33	-1,13	34,56	—
2005	3,7	112	30	11	157	1800	28,39	-1,49	34,54	—
2007	2,3	69	28	10	180	1366	28,33	-1,18	34,56	—
2011	0,6	33	11	7	72	1561	28,29	-0,71	34,60	4,4
2012	3,4	186	20	7	244	1558	28,40	-1,60	34,54	5,6
2013	1,4	80	35	15	190	1395	28,36	-1,45	34,53	6,2
2015	4,2	118	35	11	175	1420	28,34	-1,30	34,54	6,5
2016	6,0	152	35	17	240	1571	28,36	-1,06	34,60	5,6

При указанных горизонтальных размерах средняя толщина слоя ДВЗП находилась в диапазоне 80–180 м, причем максимальную мощность слой имел в области ядра (160–240 м). Аномальными по толщине слоя стали 2012 и 2016 гг., когда в ядре значение этого параметра составляло 240 м. При этом 2016 г. выделяется по максимальной среди всех реализаций площади, занимаемой ДВЗП в створе разреза (6 км²), при относительно высоких значениях температуры и солёности в ядре (–1 °C, 34,60 ‰). В 2012 г. был наблюден самый плотный, холодный и относительно пресный объем ДВЗП (параметры ядра 28,40 кг·м⁻³, –1,6 °C, 34,54 ‰), выделяющийся своей компактностью (длина по меридиану 20 км) и полностью приуроченный к области описанных выше заглуплений в рельефе дна склона.

Показательны и интересны соотношения основных параметров южной и северной окраин и ядра слоя ДВЗП. Как уже отмечалось, максимальная мощность слоя приходится на район ядра (средняя по всем реализациям 200 м). Средняя толщина слоя ДВЗП на южном краю составила 50 м, а на северном — 70 м. Такое соотношение толщины северной и южной окраин слоя ДВЗП наблюдается не всегда. Среди реализаций примерно поровну случаев, когда северная оконечность тоньше, толще или равна южной. В основном температура и солёность южной оконечности ниже таковых для северной. Это характерно для всех случаев, за исключением реализации 2012 г., когда у компактного, мощного и очень холодного образования температура и солёность южной части составляли –0,58 °C и 34,60 ‰, а северной –1,26 °C и 34,56 ‰.

Таким образом, положение, структура и характеристики ДВЗП демонстрируют существенную изменчивость между наблюдаемыми реализациями разреза. Изложенные выше аспекты изменчивости характеристик ДВЗП, наблюдаемые на разрезе за прошедший период, могут объясняться лишь изменчивостью процессов различных масштабов, определяющих формирование и распространение основных водных масс, взаимодействие которых и определяет производство антарктической донной воды — АШВ, ВШЛ, МЦГВ и ЦГВ. Это может отражать как изменчивость вклада ЦГВ в смесь, так и изменение объемов производства АШВ и ВШЛ в конкретный период времени (в частности, тоже зависящее от объемов поступающих на шельф МЦГВ в предыдущий период). Достижение указанного эффекта возможно и за счет увеличения объема формирующихся ВШЛ (более пресных и холодных, чем АШВ),

и, как следствие, изменения характеристик результирующей смеси АШВ и ВШЛ, непосредственно участвующих в производстве ДВЗП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных в рамках полевых работ Российской антарктической экспедиции исследований удалось выявить основные особенности в структуре и характеристиках вод области «шельф — материковый склон» для района залива Прюдс. Обнаруженный нами ранее факт формирования АДВ в районе залива Прюдс в летний период нашел свое подтверждение в регулярно проводившихся наблюдениях на разрезе по 70° в.д. Выполненные за период с 2004 по 2016 г. наблюдения на разрезе и в его окрестностях (ряд меридиональных разрезов в диапазоне долгот $62\text{--}72^\circ$ в.д.) подтвердили удачный выбор положения разреза для отслеживания изменчивости в процессах формирования ДВЗП. Удалось установить, что плотные воды, в последующем вентилирующие ЦГВ или достигающие формы АДВ, пересекают бровку шельфа восточнее разреза по 70° и, в основном, западнее меридиана 72° в.д. При этом они, в соответствии с генеральным западным переносом вод Антарктическим склоновым течением, имеют в своем движении по склону северо-западное направление, с составляющей вниз по склону.

Как показали несколько реализаций разреза, продленные в сторону глубокого океана (до материкового подножия, т.е. до изобаты 3000 м), практически все свежеобразованные донные воды, а именно ДВЗП, пересекают створ разреза в диапазоне глубин 1000–2000 м, т.е. при каждом выполнении разреза мы фиксировали практически все ДВЗП, в данный момент опускавшиеся по материковому склону в створе разреза. В результате получена возможность оценить не только межгодовую изменчивость структуры ДВЗП и характеристик формирующих ее глубинных и шельфовых вод, но и получить оценку изменчивости объемов ДВЗП. Проведенный анализ позволяет предположить наличие тенденции к увеличению в последние годы объемов формирующейся летом ДВЗП. При этом, учитывая характеристики ДВЗП, наиболее вероятной причиной кажется увеличение вклада в этот процесс ВШЛ, что может свидетельствовать об активизации таяния шельфовых ледников со стороны их основания при контакте с относительно теплыми АШВ (или МЦГВ).

С другой стороны, для последних лет характерно большее приближение ЦГВ к бровке шельфа и в среднем ее более высокая температура. Это может говорить об интенсификации циркуляции в АЦТ или в области субполярных круговоротов, доставляющих ЦГВ к материковому склону. Следствием может быть не только изменение процессов взаимодействия ЦГВ с водами шельфа в области АСФ, но и более активное проникновение ЦГВ на шельф в восточной части залива с дальнейшим увеличением температуры вод, проникающих под шельфовый ледник и усиливающих его таяние.

Авторы выражают благодарность экипажу НЭС «Академик Федоров» за заинтересованное отношение к выполнению океанологических наблюдений в не всегда благоприятных метеорологических и ледовых условиях Антарктики. Авторы благодарят сотрудников Лаборатории Южного океана отдела океанологии ФГБУ АНИИИ С.В. Кашина и И.А. Чистякова за участие в проведении наблюдений и помощь в обработке данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Циклонические круговороты окраинных морей восточной Антарктиды // Арктика и Антарктика. М.: Наука, 2003. Вып. 2 (36). С. 126–148.

- Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* Особенности океанографического режима залива Прюдс по данным экспедиций ААНИИ. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 76. С. 36–48.
- Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* О взаимодействии вод шельфа и глубокого океана над материковым склоном Антарктиды // Океанография и морской лед: Вклад России в Международный полярный год 2007/08 / Под ред. И.Е. Фролова. М.: Paulsen, 2011. С. 291–305.
- Григорьев Ю.А.* Циркуляция поверхностных вод в заливе Прюдс // Информ. бюл. САЭ. 1968. № 68. С. 44–48.
- Григорьев Ю.А.* Гидрологические исследования в заливе Прюдс // Труды САЭ. 1971. Т. 54. С. 180–199.
- 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 на формирование донных вод Южного океана // Океанология. 2011. Т. 51. № 3. С. 393–408.
- Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* Исследование устойчивости Антарктического склонового фронта в море Содружества // Метеорология и гидрология. 2013. № 11. С. 64–78.
- Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В.* Интрузионное расслоение антарктического склонового фронта // Океанология. 2016. Т. 56. № 4. С. 514–528.
- Денисов А.С., Мызникова М.Н.* Особенности гидрологического режима в заливе Прюдс (февраль 1973 г.) // Труды САЭ. 1978. Т. 68. С. 100–105.
- Зверев А.А.* Аномалии температуры морской воды в заливе Прюдс // Информ. бюл. САЭ. 1959. № 6. С. 30–31.
- Клепиков А.В., Антипов Н.Н.* Особенности формирования и распространения водных масс на шельфе и материковом склоне вокруг Антарктиды // Лед и снег. 2014. № 4 (128). С. 81–94.
- Саватюгин Л.М., Комова В.В.* Гидрологическая характеристика залива Прюдс в феврале 1969 г. // Труды САЭ. 1971. Т. 57. С. 99–104.
- Baines, P.G., Condie S.A.* Observations and modelling of Antarctic downslope flows: a review, in Ocean, ice, and atmosphere: interactions at the Antarctic continental margin // Antarctic Research series. 1998. Vol. 75. P. 29–49.
- Carmack E.C.* Water characteristics of the Southern Ocean south of the Polar Front // A Voyage of Discovery / Ed. M. Angel. New York: Pergamon Press, 1977. P. 15–42.
- Carmack E.C., Foster T.D.* On the flow of water out of the Weddell Sea // J. Deep-Sea Res. 1975. Vol. 22. № 11. P. 711–724.
- Foldvik A., Gammelsrod T., Torresen T.* Circulation and water masses on the southern Weddell Sea shelf. Oceanology of the Antarctic continental shelf // Antarctic Res. Ser. 1985. Vol. 43. P. 5–20.
- Gill A.E.* Circulation and bottom water production in the Weddell Sea // J. Deep-Sea Res. 1973. Vol. 20. № 2. P. 111–140.
- Jackett D.R., McDougall T.J.* A neutral density variable for the world's oceans // J. Phys. Oceanogr. 1997. Vol. 27. P. 237–263.
- Jacobs S.S.* On the nature and significance of the Antarctic Slope Front // Marine Chemistry. 1991. Vol. 35. P. 9–24.
- Jacobs S.S., Amos A.F., Bruchhausen P.M.* Ross Sea oceanography and Antarctic Bottom Water formation // J. Deep-Sea Res. 1970. Vol. 17. P. 935–962.
- Jacobs S.S., Georgi D.T.* Observations on the southwest Indian Antarctic Ocean // J. Deep-Sea Res. 1977. Vol. 24. P. 43–84.
- Leffanue H., Craven M.* Circulation and water masses from current meter and T/S measurements at the Amery Ice Shelf // FRISP Report, 2004. № 15. URL: <http://folk.uib.no/ngfls/frisp/Rep15/leffanue.pdf> [дата обращения 01.09.2017]
- McDougall T.J.* Neutral surfaces // J. Phys. Oceanogr. 1987. Vol. 17. P. 1950–1964.

Ohshima, K. I., Fukamachi Y., Williams G.D., Nihashi S., Roquet F., Kitade Y., Tamura T., Hirano D., Herraiz-Borreguero L., Field I., Hindell M., Aoki S., Wakatsuchi M. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya // *Nat. Geosci.* 2013. Vol. 6. P. 235–240.

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.

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.

Williams G.D., Herraiz-Borreguero L., Roquet F., Tamura T., Ohshima K.I., Fukamachi Y., Fraser A.D., Gao L., Chen H., McMahon C.R., Harcourt R., Hindell M. The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay // *Nat. Commun.* 2016. Vol. 7. 12577. DOI: 10.1038/ncomms12577.

N.N. ANTIPOV, A.V. KLEPIKOV

INTERANNUAL VARIABILITY OF WATER MASSES IN THE AREA OF BOTTOM WATER FORMATION IN PRYDZ BAY

The results of field studies of the processes of Antarctic Bottom Water formation conducted in the period from 2004 to 2016 in the Prydz Bay of the Commonwealth Sea is discussed. During this period the oceanographic observations along the 70° E section, crossing the shelf and the continental slope, were repeated nine times. In this area in the austral summer of 2004 during the AARI expedition on the r/v “Akademik Fedorov” the process of formation of bottom water has been recorded for the first time. A further study of the structure and characteristics of water masses on this section and in the adjacent area confirmed the regularity of these processes during the summer period. At the same time, a significant interannual variability of the structure, characteristics, and mechanisms of distribution of the main water masses in the section - shelf, deep and bottom waters — was found. For the first time, detailed information on the bottom topography of the ocean in the vicinity of this section made it possible to show the determining role of bottom topography features in the distribution of newly formed bottom water along the continental slope. The tendency of increasing of the volume of bottom water formed in the Prydz Bay in recent years is revealed, which is associated with the intensification of the basal melting of the ice shelf leading to an increase in the volume of the formation of supercooled Shelf Water, the most important component in the formation of bottom water.

Keywords: Southern Ocean, Antarctica, Antarctic Bottom Water, Prydz Bay Bottom Water, Circumpolar Deep Water, Antarctic Shelf Water, Ice Shelf Water, Prydz Bay, Antarctic Slope Front, continental slope.

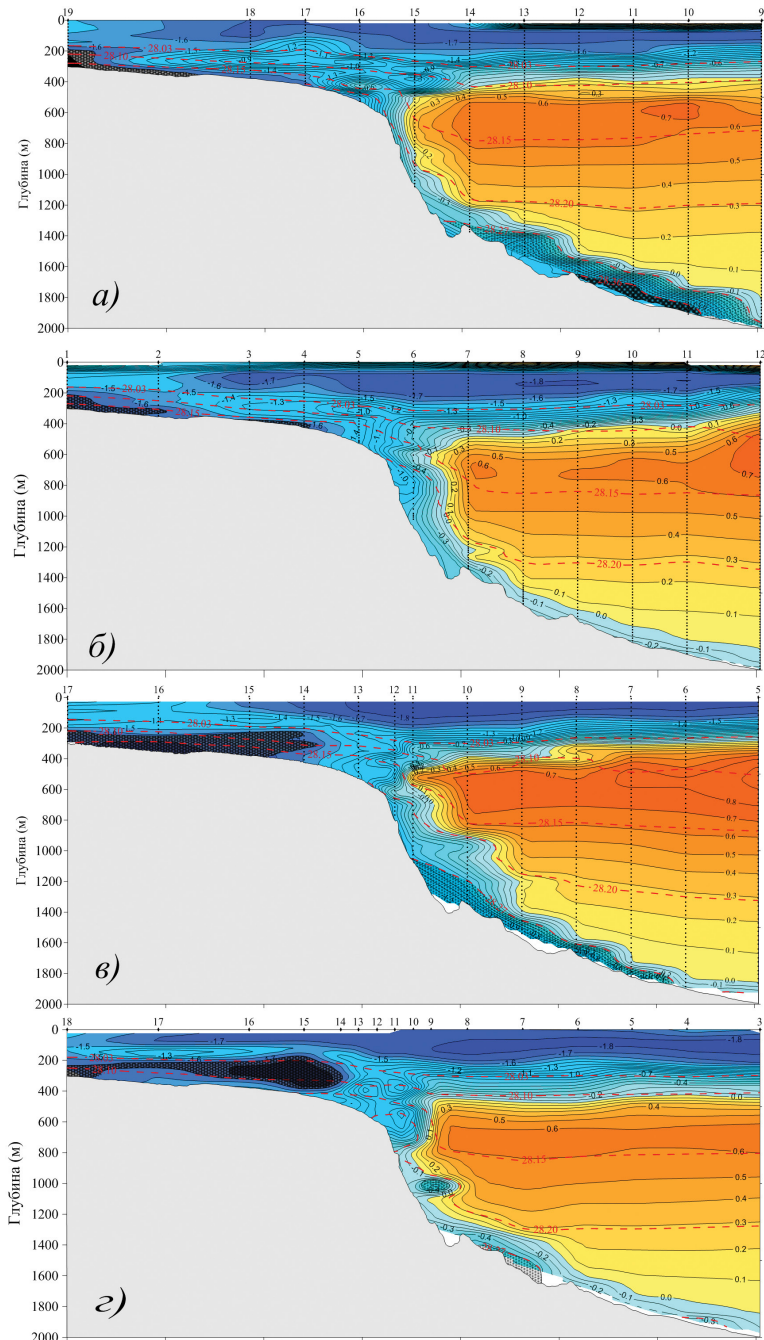


Рис. 2. Потенциальная температура на разрезе по 70° в.д., выполненном НЭС «Академик Федоров» в 2005 (а), 2006 (б), 2007 (в) и 2011 (г) гг. Красный пунктир — изолинии нейтральной плотности. Заштрихованы области распространения АШВ и ДВЗП (пояснения в тексте).

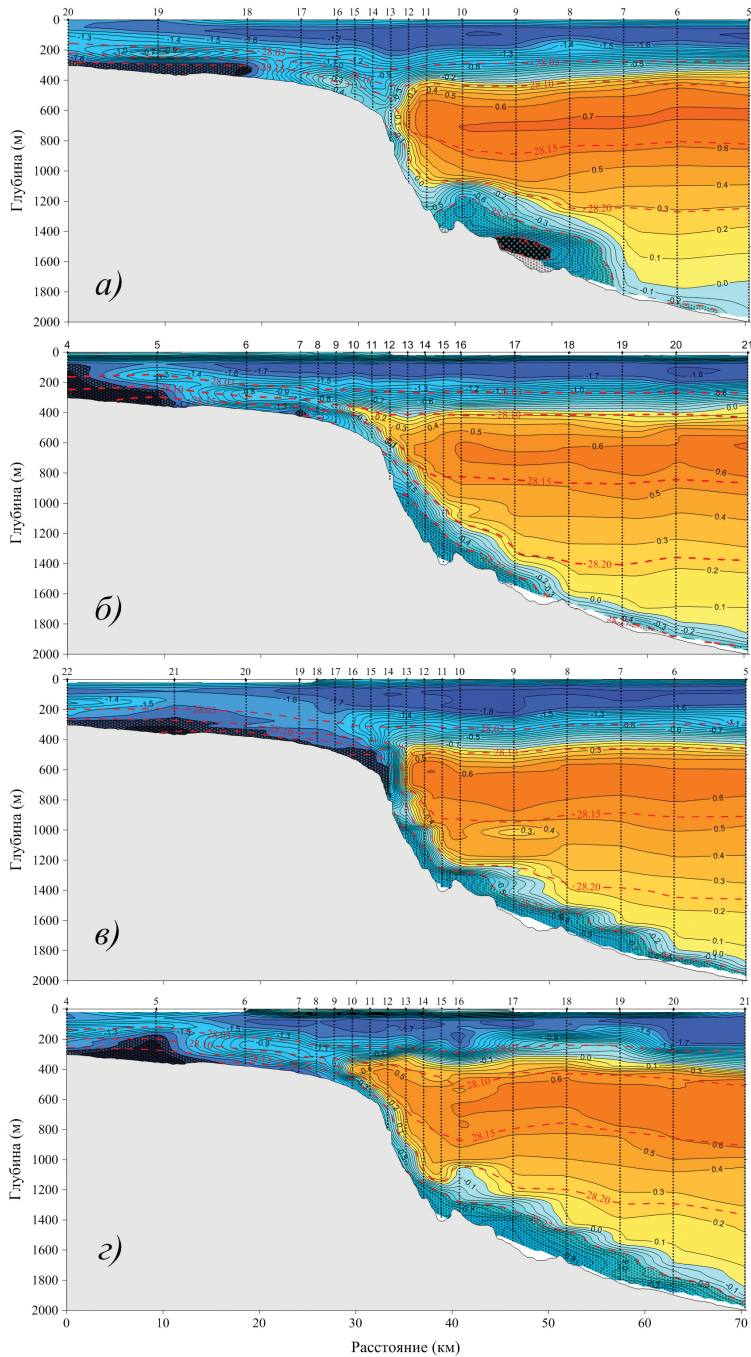


Рис. 3. Потенциальная температура на разрезе по 70° в.д., выполненном НЭС «Академик Федоров» в 2012 (а), 2013 (б), 2015 (в) и 2016 (з) гг. Красный пунктир — изолинии нейтральной плотности. Заштрихованы области распространения АШВ и ДВЗП (пояснения в тексте).