

УДК 551.465

А.А. Федотова¹, А.Н. Демидов², К.В. Артамонова³**ВОДНЫЕ МАССЫ МОРЯ СОДРУЖЕСТВА**

Значительный объем данных, полученных в ходе экспедиционных работ в последние 15 лет, и запуск программы по исследованию полярных районов Мирового океана с помощью морских млекопитающих позволяют сделать обобщение и ряд уточнений предшествующих классификаций водных масс моря Содружества с привлечением гидрохимических показателей для теплого периода и определить диапазоны термохалинных характеристик водных масс моря Содружества для холодного периода. Выявлено, что сезонная изменчивость проявляется не столько в изменении диапазона значений термохалинных характеристик водных масс, сколько в изменении глубин и районов их распространения, прежде всего в изменении районов распространения вод шельфовых ледников и модифицированных Циркумполярных глубинных вод.

Ключевые слова: водная масса, Южный океан, шельфовые воды, воды шельфовых ледников, Антарктические донные воды, море Содружества, залив Прюдс, структура вод

Введение. Антарктические донные воды (ААДВ) занимают значительную часть придонного слоя Мирового океана и являются важным звеном в глобальной термохалинной циркуляции, распространяясь до северных частей Атлантического и Тихого океанов [Wüst, 1935]. По разным оценкам, обобщенным в работе [Morozov et al., 2010], в результате смешения плотных Антарктических шельфовых вод (ААШВ) с Циркумполярными глубинными водами (ЦГВ) вокруг Антарктиды образуются от 5 до 15 Св ААДВ. Поэтому одной из ключевых задач современных исследований, проводимых в Южном океане, стало выявление и исследование районов образования плотных ААШВ и их каскадинга. Выполненные в последние десятилетия натурные исследования показали, что всего в нескольких районах Южного Океана способны образовываться плотные ААШВ, так как структура и характеристики водных масс в разных морях вокруг Антарктиды существенно различаются [Антипов, Клепиков, 2007; Ohshima et al., 2013; Williams et al., 2016; Ambblas, Dowdeswell, 2018].

В 2004 году в ходе исследований, проводимых в рамках Российской Антарктической экспедиции, впервые был зафиксирован как каскадинг ААШВ, образованных в акватории залива Прюдс [Антипов, Клепиков, 2007]. Согласно [Головин с соавт., 2011], вклад склонового каскадинга образованных в заливе Прюдс ААШВ в вентиляцию глубинных и донных вод Южного океана составляет до 0,24 Св при оценке общего расхода ААШВ в Южном океане в $5,4 \pm 1,7$ Св [Orsi et al., 2002]. Последняя оценка расхода ААШВ, образованных в пределах моря Содружества, составляет 0,3–0,7 Св [Ohshima et al., 2013]. Таким образом, море Содружества признано одним из шести значимых районов-источников плотных

шельфовых вод, участвующих в образовании ААДВ в Южном океане.

В холодный период вследствие конвекции происходит образование ААШВ и Антарктических зимних вод (ААЗВ). Вследствие особенностей циркуляции в заливе Прюдс, ААШВ способны попадать под шельфовые ледники, образуя воды шельфовых ледников (ВШЛ). Важным процессом для формирования структуры вод на шельфе моря Содружества является заход модифицированных Циркумполярных глубинных вод (МЦГВ), которые обеспечивают дополнительный поток тепла и соли. В летний период по мере прогревания поверхности моря и таяния льда формируется более теплый и распресненный слой Антарктических поверхностных вод (ААПВ). По мере накопления плотных ААШВ на шельфе происходит перенос вод на север к бровке. При выходе достаточно плотных ААШВ на бровку шельфа вследствие резкого увеличения уклона начинается гравитационный сток ААШВ, сопровождаемый бароклинной неустойчивостью при смешении с более теплыми и солеными ЦГВ [Головин с соавт., 2011]. Результат этого смешения принято называть донными водами залива Прюдс (ДВЗП). Таким образом, процесс образования ААДВ в пределах акватории моря Содружества определяется взаимодействием всех водных масс и зависит от многих факторов.

Структура вод моря Содружества определяется наличием холодного (апрель–ноябрь) и теплого (декабрь–март) сезонов. В холодный сезон, за исключением полыней, прибрежная часть шельфовой зоны моря Содружества, как правило, занята льдом. В теплый период (декабрь–март) происходит таяние морского льда и полное или частичное освобождение морской поверхности ото льда, нагревание и распреснение вод поверхностного слоя.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, аспирант; e-mail: fedotovalina@yahoo.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: alik1@mail.ru

³ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, отдел динамики климата и водных экосистем, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: ksusha.vniro@gmail.com

Акватория моря Содружества расположена к югу от Южного фронта Антарктического Циркумполярного течения (АЦТ), поэтому циркуляция вод определяется направленным на запад Антарктическим Склоновым течением (АСТ) и вдольбереговым Антарктическим Прибрежным течением (АПТ) [Антипов, Клепиков, 2014].

Наиболее полная классификация водных масс моря Содружества была выполнена в работе [Wong et al., 1998] на основании единичной съемки (88 STD-профилей) в рамках австралийского проекта FISHOG (февраль–март 1992) в пределах участка 68–80.5° в.д. Однако из-за отсутствия данных высокого разрешения на склоне в съемке FISHOG в классификации нет ДВЗП. Также нужно отметить работу [Антипов, Клепиков, 2007], выполненную на основе архивных данных ААНИИ и данных, полученных в Российской антарктической экспедиции в период 1997–2007 гг. В работе даны средние и экстремальные значения термохалинных и гидрохимических характеристик для всех водных масс.

Однако, на данный момент накоплен большой объем новых данных, включающий в себя значения термохалинных и гидрохимических характеристик практически по всей акватории моря Содружества, полученные в ходе экспедиционных работ (WOD18 и база данных ААНИИ). Вследствие этого возникла необходимость уточнения классификации водных масс моря Содружества для теплого периода. Благодаря запуску программы исследований с использованием морских млекопитающих (MEOP – Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole) стало возможным определение диапазона термохалинных характеристик и зон распространения водных масс в холодный период для выявления их сезонной изменчивости.

Привлечение гидрохимических показателей позволяет точнее идентифицировать образованные на шельфе водные массы и воды океанического происхождения (МЦГВ) в шельфовой зоне. В данном исследовании используются самые часто измеряемые гидрохимические параметры: концентрации растворенного кислорода, силикатов и фосфатов.

Таким образом, целью данной работы является уточнение предшествующих классификаций водных масс моря Содружества для теплого периода с привлечением основных гидрохимических параметров и определение диапазонов значений термохалинных характеристик водных масс в холодный период. Для решения поставленной цели

выполнены ряд задач: описание механизмов образования и трансформации водных масс, определение диапазона значений термохалинных и основных гидрохимических параметров водных масс моря Содружества, зон и глубин их распространения.

Данные и методы. В работе использовалась объединенная база данных, состоящая из баз WOD18 [www.nodc.noaa.gov], MEOP-CTD 2017 [www.meop.net] и ААНИИ (табл. 1). Для анализа термохалинной структуры были рассчитаны диапазоны нейтральной плотности (γ^n) для всех водных масс (табл. 2, 3), которая является важным параметром не только для идентификации ДВЗП на склоне, но и для определения зон распространения всех водных масс на шельфе. Результаты исследования получены на основе анализа T,S -диаграмм [Мамаев, 1988] и гидрохимических параметров (растворенного кислорода, силикатов и фосфатов).

База данных WOD18 состоит преимущественно из экспедиционных данных, полученных в период с января по март. Исключение составляют данные буев Арго для склона и открытой части моря Содружества, полученные в период с апреля по декабрь.

В работе используются данные ААНИИ, полученные в ходе Российских Антарктических экспедиций с января по март в период 1997–2016 гг. База данных содержит уникальные STD данные с высоким разрешением для зоны материкового склона, а также данные, полученные в ходе выполнения разрезов в приборьежной области ШЛЭ и в центральной части залива Прюдс.

Программа MEOP запущена в индоокеанском секторе Южного океана в 2004 году. В рамках программы STD датчики прикрепляются к голове морского слона (*Mirounga leonina*), которые в процессе кормления ныряют на большие глубины, попутно измеряя температуру и электропроводность воды. Измерения проводятся, подобно буям Арго, на стадии всплытия животного. На каждом 6-часовом интервале сохраняется самый глубоководный профиль, и впоследствии передается через спутник. В холодный период, вследствие жизненного цикла морских животных, измерения проводятся преимущественно в полыньях или на свободных ото льда участках склона, а также при перемещении животных между полыньями. На шельфе моря Содружества максимальная плотность данных приходится на районы трех крупных полыней (Маккензи, Дейвис и Барриер) в период с апреля по ноябрь. В базу входит бо-

Таблица 1

Количество станций с измерениями параметров в базах данных

Источник	Период	STD	Растворенный кислород	Силикаты	Фосфаты
WOD2018	1959–2016	2641	1006	406	303
ААНИИ	1957–2016	678	304	111	82
MEOP-CTD	2004–2017	10969	–	–	–

Таблица 2

Диапазоны значений термохалинных и гидрохимических характеристик водных масс для теплого периода по базам данных WOD18, MEOP-CTD 2017 и базы данных ААНИИ

Водная масса	Водная масса (англ.)	θ , °C	Соленость, епс	γ^n	O ₂ , мл/л	Силикаты, μ M	Фосфаты, μ M	Глубина, м
ААПВ /зона влияния ШЛЭ/	SSW	-1,7...+1	33–34,4	27,7–28	7,3–9	10–60	1–2	0–300
ААПВ /Зона влияния МЦГВ/		-1,5...+2	<34,2	<27,8	<9			
ААЗВ	WW	-1,9...-1,6	34,2–34,4	27,8–28,10	7–7,4	60–85	2–2,25	50–300
ААШВ	AASW	-1,95...-1,5	34,4–34,8	28,10–28,6	6,7–7,5	60–65	2–2,2	>200
ДВМД	CDBW	-1,85...-1,95	\geq 34,8	\geq 28,6				>400
ВШЛ	ISW	<-1,9	34,3–34,5	27,95–28,4	7,3–7,5	60–70	2–2,2	70–500
ДВЗП	PBBW	-0,5...-1,5	34,52–34,64	>28,27	5–6,8	90–100	2,1–2,3	500–2300
МЦГВ /шельф/	MCDW	-1,6...-0	34,3–34,5	27,9–28,27	6,5–6,9	75–90	2,1–2,3	100–400
ЦГВ	CDW	0–2	34,67–34,75	28–28,27	4,5–5	80–115	2,2–2,4	200–2000
ААДВ	AABW	<0	34,66–34,71	>28,27	4,2–6	110–145	2,12–2,35	>2000

Таблица 3

Диапазоны значений термохалинных характеристик водных масс для холодного периода по базам данных WOD18 и MEOP-CTD 2017

Водная масса	Водная масса (англ.)	θ , °C	Соленость, епс	γ^n	Глубина, м
ААЗВ	WW	-1,9...-1,7	\leq 34,4	27,8–28,10	0–200
ААШВ	SW	-1,97...-1,8	34,4–34,75	>28,27	>200
ВШЛ	ISW	<-1,95	34,4–34,5	28,0–28,43	200–500
ДВМД	CDBW	-1,85...-1,95	\geq 34,8	\geq 28,6	>100
ДВМС	CSBW	-0,5...-1,5	34,47–34,64	>28,27	500–2000
МЦГВ	MCDW	0...-1,7	34,4–34,5	27,9–28,1	100–300
ЦГВ	CDW	0...-1,75	34,67–34,75	28–28,27	200–2000
ААДВ	AABW	<0	34,66–34,71	>28,27	>2000

Примечание. Жирным шрифтом выделены отличные от теплого периода характеристики.

более 10 000 станций для периода с февраля по декабрь. Эксперимент проводится каждый год, но самым активным периодом является 2011–2013 гг.

Результаты исследований и их обсуждение.
Водные массы моря Содружества. Определяющими процессами для формирования гидрологического режима моря Содружества являются осенне-зимняя конвекция, прогрев и распреснение поверхностного слоя, проникновение на шельф МЦГВ и таяние шельфовых ледников. В ходе анализа θ, S -диаграмм и изучения процессов, влияющих на форми-

рование структуры вод на шельфе залива Прюдс, было выделено две зоны с принципиально отличными структурами вод и конфигурациями θ, S -диаграмм: зоны влияния шельфового ледника Эймери (рис. 1, 2,А) и МЦГВ (рис. 1, 2,Б). Структура вод в зоне влияния ШЛЭ состоит из ААПВ, ВШЛ (Э), образованные под шельфовым ледником Эймери, и ААШВ (см. рис. 2,А). Характеризуется эта зона наличием ярковыраженного пикноклина и отсутствием ААЗВ и МЦГВ. Зона влияния МЦГВ имеет другую структуру вод: ААШВ, МЦГВ, ААЗВ, ААПВ

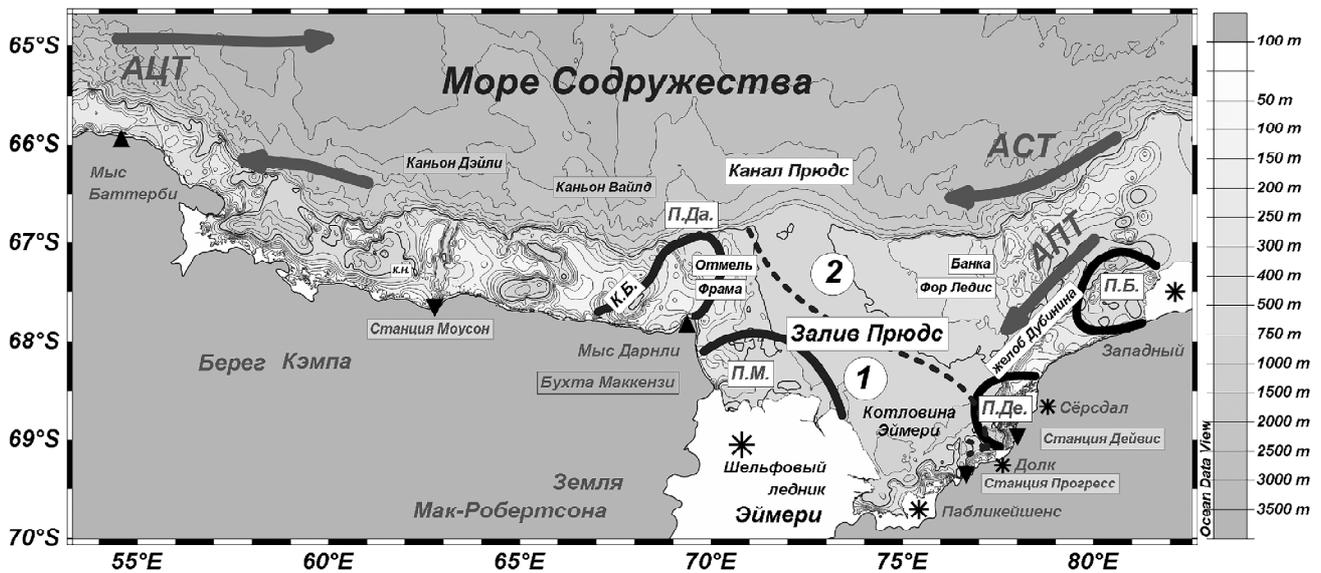


Рис. 1. Карта-схема района исследования (батиметрия по IBCSO_v1). К.Б. – котловина Бёртона; П.Да. – польня Дарнли; П.М. – польня Маккензи; П.Де. – польня Дейвис; П.Б. – польня Барриер. Сплошной черной линией обозначены границы польней по [Tamura et al., 2008]. Пунктиром обозначена граница между зонами влияния шельфового ледника Эймери и МЦГВ на шельфе залива Прюдс, характерная для теплого периода. 1 – зона влияния шельфового ледника Эймери; 2 – зона влияния МЦГВ

Fig. 1. Study area of the Cooperation Sea (bathymetry from IBCSO_v1). Black line – contours of polynyas [Tamura et al., 2008]. Dotted line – boundary between the zones of influence of Ice Shelf Amery (1) and Modified Circumpolar Deep Water (2) on the Prydz Bay shelf during warm season (January–March)

(см. рис. 2,Б). В структуру вод зоны влияния МЦГВ могут входить ВШЛ, образованные под шельфовыми ледниками Сёрсдал и Западный ($\theta > -2,05^\circ\text{C}$).

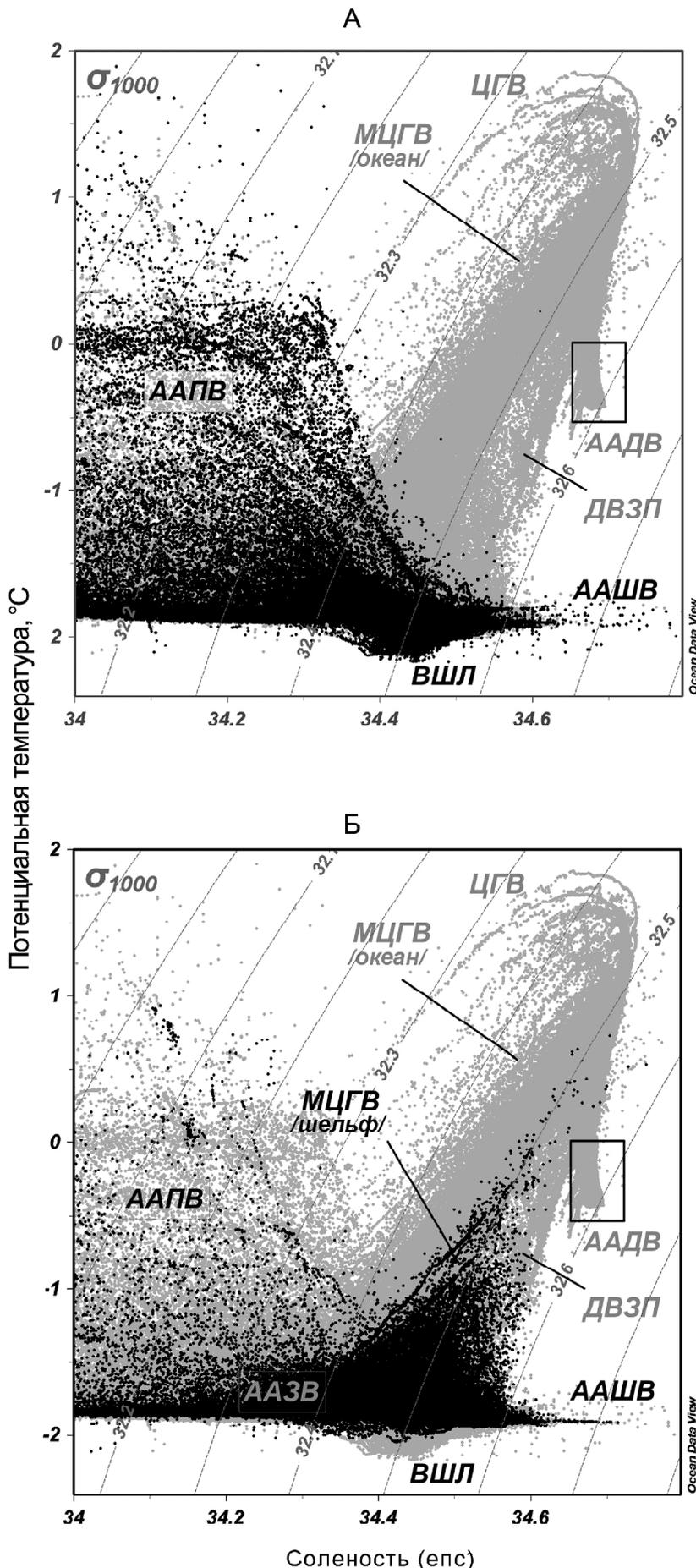
Антарктические поверхностные воды (ААПВ) образуются в летний период в результате прогрева поверхности моря и таяния морского льда и айсбергов. ААПВ характеризуется широким диапазоном температур ($-1,7 \dots +2^\circ\text{C}$), абсолютным минимумом солёности, абсолютным максимумом содержания растворенного кислорода (до 10 мл/л), а также широким диапазоном концентраций растворенного кремния ($0-60 \mu\text{M}$) и минерального фосфора ($0-2,2 \mu\text{M}$) [Батрак с соавт., 2006].

В акватории у барьера ШЛЭ вследствие особенностей циркуляции в заливе и активного перемешивания во время приливов и отливов наблюдаются ААПВ со значениями солёности до 34,43 епс и температуры от 0 до $-1,7^\circ\text{C}$. Мощность слоя колеблется от 100 м в западной части ШЛЭ (бухта Маккензи) до 300 м в водах у восточной части барьера ШЛЭ. В теплый период характерно отсутствие выраженного слоя ААЗВ.

В феврале 2001 года в восточной части ШЛЭ на глубинах до 100 м наблюдались линзы вод с положительными значениями температуры и солёностью, превышающей 34,3 епс. Таким образом, в акватории у барьера шельфового ледника Эймери ААПВ могут иметь характеристики, которые включены в диапазон термохалинных характеристик МЦГВ для остальной акватории моря Содружества. Нужно отметить, что МЦГВ в данном районе в летний период не зафиксированы.

ААПВ залива Прюдс характеризуются повышенным содержанием кремния в сравнении со средними значениями концентраций в открытом океане к северу от Южного фронта АЦТ. В теплый период значения концентраций кремния в поверхностных водах залива Прюдс изменяются от $10 \mu\text{M}$ в водах у барьеров шельфовых ледников до $60 \mu\text{M}$ на 65°ю. ш. Большие концентрации кремния обеспечиваются таянием айсбергов, несущих большое количество кремнезема на подошвах. Аналогично кремнию, фосфаты также отличаются широким диапазоном концентрации, которая по мере отдаления от шельфового ледника возрастает практически от 0 до $2 \mu\text{M}$. Достаточно низкие величины содержания биогенных элементов в прибарьерной части шельфовых ледников связаны с ростом продолжительности светового дня и увеличением интенсивности продукционных процессов в более южных водах. Это хорошо согласуется с постепенным увеличением насыщенности кислородом вод к югу (с 95% до 105%) [Батрак, 2008].

Антарктические зимние воды (ААЗВ) как и ААШВ, образуются в холодный период в результате конвекции при льдообразовании и выхолаживания. Ядро ААЗВ, как правило, проявляется в подповерхностном слое на шельфе при наличии нижележащей МЦГВ. Таким образом, выявлено, что для зоны влияния ШЛЭ, в которой отсутствуют МЦГВ, не характерен выраженный слой ААЗВ в теплый период. Хорошо распознаются ААЗВ по абсолютному минимуму и на склоне и в океанской части моря Содружества в подповерхностном слое, мощность



которого при удалении от шельфа уменьшается от 300 м на склоне до 50–100 м на 65° ю. ш. ААЗВ имеют концентрации растворенного кислорода (>7 мл/л), силикатов (60–85 μM) и фосфатов (2–2,25 μM), значения $\theta = -1,6 \dots -1,9^\circ\text{C}$ при $S = 34,2\text{--}34,4$ епс.

Антарктические шельфовые воды (ААШВ) занимают придонный слой залива Прюдс и впадины в зоне узкого шельфа в западной части моря. Основными районами образования ААШВ считаются крупные польны Дарнли, Барриер, Дейвис и Маккензи. Идентифицируются эти воды на шельфе по максимальной плотности.

Стоит отметить различие в подходе у отечественных и зарубежных авторов при выделении ААШВ в заливе Прюдс. У отечественных авторов [Антипов, Клепиков, 2007] выделяются ААШВ, имеющие обобщенные значения гидрологических характеристик. У зарубежных авторов шельфовые воды выделяются в зависимости от географического названия места образования и различаются по значениям солёности. В работах зарубежных авторов выделяют следующие водные массы, соответствующие значениям ААШВ: низкосоленую модификацию ААШВ (LSSW/Low Salinity Shelf Water) со значениями $\theta = -1,5 \dots -1,9^\circ\text{C}$, $S = 34,5\text{--}34,6$ епс [Wong et al., 1998]; высокосоленую модификацию ААШВ (HSSW/High Salinity Shelf Water) со значениями $\theta = -1,5 \dots -1,9^\circ\text{C}$, $S > 34,6$ епс [Leffanue, Craven, 2004]; плотную модификацию ААШВ (DSW/Dense Shelf Water) со значени-

Рис. 2. θ - S диаграммы для теплого периода с обозначенными водными массами: а) θ - S -диаграмма зоны влияния шельфового ледника Эймери (черные точки) на фоне общей θ - S -диаграммы моря Содружества (серые точки); б) θ - S -диаграмма зоны влияния МЦГВ (черные точки) на фоне общей θ - S -диаграммы моря Содружества (серые точки); на рисунке 2А обозначены ВШЛ шельфового ледника Эймери, на рисунке 2Б – ВШЛ, образованные под шельфовыми ледниками Западный и Сёрсдал

Fig. 2. θ - S diagrams for warm season showing water masses: а) θ - S diagram of the Amery Ice Shelf influence zone (black dots) against the background of the general θ - S diagram of the Cooperation Sea (gray dots); б) θ - S diagram of the Modified Circumpolar Deep Water influence zone (black dots) against the background of the general θ - S diagram of the Cooperation Sea (gray dots); Fig. 2A also shows ISW of the Ice Shelf Amery, Fig. 2B shows ISW formed under the Western and the Sersdal Ice Shelves

ями $\theta = -1,5 \dots -1,9^\circ\text{C}$, $S = 34,6-34,8$ епс [Ohshima et al., 2013]. В работе [Williams et al., 2016] рассматриваются отдельно 3 вида DSW в зависимости от очага формирования: полыньи Дарнли ($S > 34,8$ епс), Маккензи ($S = 34,67-34,7$ епс), Дэвис ($S < 34,55$ епс). К вышеперечисленным водным массам можно добавить самые соленые, а значит и самые плотные шельфовые воды, так называемые донные воды мыса Дарнли (CDBW/Cape Darnley Bottom Water) с экстремальными значениями солености более 34,8 епс.

Вследствие того, что главной целью исследования шельфовых вод на антарктическом шельфе является выявление их плотных модификаций, которые способны занять изопикническую поверхность ААДВ, в данной работе предлагается в качестве основного показателя для идентификации ААШВ (AASW/Antarctic Shelf Water) использовать значения нейтральной плотности (γ^n), превышающие 28,27, которые входят в диапазон $\theta = -1,95 \dots -1,5^\circ\text{C}$ при $S > 34,5$ епс. Значения гидрохимических показателей для ААШВ следующие: концентрации растворенного кислорода 6,7–7,5 мл/л, силикатов 60–65 μM , фосфатов 2–2,2 μM . Низкие значения кислорода (< 7 мл/л) наблюдаются в котловине Эймери. По всей видимости, такие концентрации обеспечиваются минимальным обновлением вод в котловине.

Донные воды мыса Дарнли (ДВМД) являются самыми плотными модификациями ААШВ в море Содружества с соленостью более 34,8 епс. Впервые воды были зафиксированы в холодный период в ходе реализации программы МЕОР и описаны в работе [Ohshima et al., 2013]. Экстремальные значения солености обеспечиваются интенсивным льдообразованием в полынье Дарнли в холодный период. На данный момент это самая плотная модификация ААШВ, зафиксированная в море Содружества. В ходе анализа базы данных МЕОР-CTD 2017 также зафиксированы ДВМД, но уже в январе и феврале 2015 г. на глубинах более 400 м в прибрежной части котловины Бертона. По всей видимости, эти воды образуются в зимний период и вследствие особенностей орографии не могут покинуть котловину Бертона. Исследование структуры вод в данном районе также показало отсутствие ААШВ на более мелководном участке шельфа. Таким образом структура вод и особенности орографии шельфа в районе полыньи Дарнли свидетельствуют об отсутствии условий для распространения к бровке шельфа и каскадинга ДВМД в теплый период.

Воды шельфовых ледников (ВШЛ) характеризуются абсолютным минимумом температуры, достигающим до $-2,5^\circ\text{C}$ на глубинах 600 м под шельфовым ледником Эймери [Chen et al., 2016]. В акватории у барьера ШЛЭ они существуют в виде отдельных линз внутри слоя менее холодных и более соленых шельфовых вод. В работе [Lefiane, Craven, 2004] предполагается, что ВШЛ шельфового ледника Эймери образуются вследствие захода ААШВ в теплый период или вследствие захода

МЦГВ ($\theta = -1,6^\circ\text{C}$) под ледник в холодный период. В результате анализа данных, полученных в ходе Австралийской программы по изучению шельфового ледника Эймери AMISOR (2001–2002) и 43, 57, 60-й Российских Антарктических экспедиций (1998, 2012, 2015), в акватории у барьера шельфового ледника Эймери определены концентрации кислорода в ВШЛ, которые превышают 7,3 мл/л. Следовательно, наблюдаемые ВШЛ являются модификацией ААШВ. На данный момент не зафиксированы ВШЛ со значениями концентраций растворенного кислорода меньше 7 мл/л, которые характерны для МЦГВ. Таким образом, можно предположить, что в летний период на шельфе залива Прюдс присутствуют только ВШЛ, образованные из ААШВ.

В период с января по апрель выявлены случаи распространения ВШЛ в западной части канала Прюдс на расстояния более 200 км от ШЛЭ к бровке шельфа. В мае ВШЛ зафиксированы в пределах западной части залива Прюдс только до $67,7^\circ$ ю.ш. В период с июня по ноябрь ВШЛ в западной части залива Прюдс не зафиксированы. По всей видимости, распространению ВШЛ из-под шельфового ледника препятствует интенсивная конвекция в полынье Маккензи. В результате изучения распространения ВШЛ на шельфе залива Прюдс в теплый период, диапазон θ , свойственный им, был изменен с -2°C [Wong et al., 1998], $-1,94^\circ\text{C}$ [Антипов, Клепиков, 2017] до $-1,9^\circ\text{C}$ для вод с соленостью 34,3–34,5 епс. Нужно отметить, что за счет экстремально низких температур и осолонения при льдообразовании на подошве ШЛЭ, в центральном секторе прибарьерной части зафиксированы плотные модификации ВШЛ ($\gamma^n < 28,4$) на глубинах более 400 м. Однако на бровке шельфа и в западной части канала Прюдс зафиксированы ВШЛ только со значениями $\gamma^n \leq 28,05$ при $\theta = -1,9 \dots -1,95^\circ\text{C}$, $S = 34,4-34,45$ епс.

Модифицированные Циркумполярные глубинные воды (МЦГВ) являются продуктом смешения образованных на антарктическом шельфе вод с ЦГВ в шельфовой зоне. На шельфе моря Содружества МЦГВ распознаются по относительным максимумам солености, температуры, концентрации фосфатов и абсолютному минимуму концентраций кислорода. Значения концентраций растворенного кислорода и фосфатов позволяют точнее определить зоны распространения МЦГВ на шельфе и степень модификации при смешении с образованными на шельфе водами.

Предполагается, что МЦГВ ($\theta = -1,6 \dots -1^\circ\text{C}$, $S = 34,4-34,5$ епс) попадают в восточную часть прибрежного района залива Прюдс и в акваторию у барьера ШЛЭ соответственно общей схеме циркуляции в районе банки Фор Ледис (см. рис. 2,Б). Вторым вариантом проникновения МЦГВ на шельф является компенсационный изопикнический апвеллинг вследствие каскадинга ААШВ, впервые описанный в работе [Головин с соавт., 2016] (см. рис. 2,Б). Такие МЦГВ наблюдаются в западном секторе залива Прюдс в районе отмели Фрама и имеют более слабую моди-

фикацию ($\theta = -1,5 \dots -0^\circ\text{C}$, $S = 34,45-34,5$ епс) по сравнению с затоковыми. В ходе анализа базы данных МЕОР-СТД для холодного периода, компенсационные МЦГВ зафиксированы на шельфе на расстояниях более 100 км от бровки. Также выявлено, что заход МЦГВ в районе банки Фор Ледис происходит как в теплый, так и в холодный период. Только в данном районе МЦГВ могут занимать придонное положение. На остальном участке шельфа залива Прюдс МЦГВ зафиксированы только в промежуточных слоях. В таблице 2 приведен объединенный диапазон значений для затоковых и компенсационных МЦГВ.

Донные воды залива Прюдс (ДВЗП) являются продуктом смешения образованных на шельфе залива Прюдс ААШВ с ЦГВ на склоне. Идентифицируются эти воды на склоне по относительному минимуму температуры, солёности, концентраций фосфатов и нитратов и по относительному максимуму содержания растворенного кислорода. Благодаря выполнению разрезов с высоким разрешением на склоне моря Содружества и повторению регулярного разреза по 70° в. д. в ходе РАЭ в период с 2004–2016 гг., удалось установить, что в теплый период каскадинг происходит, как правило, восточнее разреза по 70° в. д. и, в основном, западнее меридиана 72° в. д. [Антипов, Клепиков, 2017]. При этом ДВЗП, в соответствии с генеральным западным переносом вод Антарктическим склоновым течением (АСТ), распространяются вниз по склону в северо-западном направлении. В работе [Антипов, Клепиков, 2017] дается подробное описание ДВЗП и их межгодовой изменчивости.

Донными водами моря Содружества (ДВМС) предполагается называть характерный для холодного периода суммарный объем донных вод, включающий в себя несколько источников (полюнья Дарнли, участок узкого шельфа, расположенный восточнее полюнья Дарнли, залив Прюдс), расположенных на шельфе моря Содружества. Диапазон значений

определен по МЕОР-СТД и буям Арго, включенным в WOD18. Данные воды имеют схожие характеристики с ДВЗП.

Антарктические донные воды (ААДВ) занимают придонное положение в океанической части моря Содружества и имеют значения $\gamma^s \geq 28,27$ [Orsi et al., 1999]. Характеризуются эти воды относительным минимумом температуры, солёности и относительным максимумом концентраций растворенного кислорода. В пределах склона моря Содружества ААДВ наблюдаются, начиная с глубин 1500 м. По мере отдаления от склона нулевая изотерма, которая является верхней границей ААДВ, заглубляется. В пределах моря Содружества ААДВ движутся с АСТ на восток и затем включаются в круговорот в море Уэдделла.

Выводы:

- в ходе анализа θ , S -диаграмм и изучения процессов, влияющих на формирование структуры вод на шельфе залива Прюдс, выделены две акватории, имеющие различную структуру вод: зона влияния шельфового ледника Эймери и зона влияния модифицированных Циркумполярных глубинных вод;

- в результате комплексного анализа термохалинных и гидрохимических показателей выявлено, что на шельфе залива Прюдс в теплый период наблюдаются воды шельфовых ледников (ВШЛ), которые являются модификацией Антарктических шельфовых вод;

- анализ объединенной базы данных позволил сделать обобщение и уточнить диапазоны значений термохалинных и гидрохимических характеристик для теплого периода. На основе анализа базы данных МЕОР-СТД впервые определены диапазоны термохалинных характеристик водных масс шельфа для холодного периода (апрель–ноябрь);

- выявлена сезонная изменчивость структуры вод шельфовой зоны залива Прюдс и определено, что она проявляется в изменении границ распространения ВШЛ и модифицированных Циркумполярных глубинных вод.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Н.Н. Антипову, и.о. зав. лаб. океанологических и климатических исследований Антарктики ААНИИ, за ценные замечания к статье, а также судовому научно-техническому отряду НЭС «Академик Федоров» за помощь в получении экспедиционных данных. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003.

Составление баз данных проведено по проекту РФФ № 19-17-00110.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Межгодовая изменчивость водных масс в области формирования донных вод в заливе Прюдс // Арктика и Антарктика. Вып. 3(113). 2017. С. 87–106.

Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Особенности формирования и распространения водных масс на шельфе и материковом склоне вокруг Антарктиды // Снег и лед. Вып. 128. 2014. С. 81–94.

Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Особенности океанографического режима залива Прюдс по данным экспедиций ААНИИ 1997–2007 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. Вып. 76. 2007. С. 36–48.

Батрак К.В., Масленников В.В., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Особенности структуры вод шельфа и материкового склона в море Содружества по данным экспедиции НИС «Академик Федоров» в 2006 г. // Арктика и Антарктика. Вып. 5(39). 2007. С. 112–124.

Батрак К.В. Гидрохимическая характеристика различных модификаций антарктических вод // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 381–388.

Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Интрузивное расслоение антарктического склонового фронта // Океанология. Т. 56. № 4. 2016. С. 514–528.

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*. Т. 51. № 3. 2011. С. 393–408.

Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. М.: Гидрометеиздат, 1987. 294 с.

Amblas D., Dowdeswell J.A. Physiographic influences on dense shelf-water cascading down the Antarctic continental slope // *Earth-Science Reviews*. Vol. 185. 2018. P. 887–900.

Chen H., Lin L., Li Y., Craven M. The Water Masses and Circulation at the Amery Ice Shelf // *Open Access Library Journal*, 3: e2542, 2016.

Leffanue H., Craven M. Circulation and water masses from current meter and T/S measurements at the Amery Ice Shelf // *FRISP Report*. № 15. 2004. P. 1–7.

Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., Zenk W. Abyssal channels in the Atlantic Ocean: Water structure and flows // Springer. 2010. 290 p.

Ohshima K.I. et al. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya // *Nature Geoscience* (6). 2013. P. 235–240.

Orsi A.H. et al. On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon

measurements // *Journal of geophysical research*. Vol. 107. № C8. 2002. P. 31.

Orsi A.H., Johnson G.C., Bullister J.L. Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water // *Prog. Oceanogr.* № 43. 1999. P. 55.

Tamura T., Ohshima, K.I., Nihashi S. Mapping of sea-ice production for Antarctic coastal polynyas // *Geophys. Res. Lett.* 35. L07606. 2008. P. 5.

Williams G.D. et al. The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay // *Nat. Commun.* 7:12577, 2016. P. 1–9.

Wüst G. Schichtung und zirkulation des Atlantischen ozeans. Die stratosphäre. Deutsche Atl. Exped. «Meteor» 1925–27. // *Wiss. Ergebn. Bd VI. I Teil. Lief. 2.* 1935. P. 106.

Wong A. et al. Ocean-ice interaction and possible bottom water formation in Prydz bay, Antarctica // *Ocean, ice and atmosphere: interactions at the Antarctic Continental Margin, Antarctic research series*. Vol. 75. 1998. P. 173–187.

Электронные ресурсы:

МЕОП-CTD [Электронный ресурс] URL: <http://www.meop.net> (дата обращения 10.08.2018)

World Ocean Database [Электронный ресурс] URL: <http://www.nodc.noaa.gov> (дата обращения 15.12.2018)

Поступила в редакцию 17.04.2019

После доработки 21.06.2019

Принята к публикации 12.09.2019

A.A. Fedotova¹, A.N. Demidov², K.V. Artamonova³

WATER MASSES OF THE COOPERATION SEA

A large amount of data obtained during the expeditions of the last 15 years and the launching of the MEOP program allow synthesizing and refining previous classifications of water masses in the Cooperation Sea with due account of hydrochemical parameters for warm season and finding the range of thermohaline values of water masses in the Cooperation Sea for cold season. It is revealed that seasonal variability shows itself by the changes of depths and locations of water masses, particularly Ice Shelf Water and Modified Circumpolar Deep Water, rather than by the changes of thermohaline parameters of water masses.

Key words: water mass, Southern Ocean, shelf water, ice shelf water, Antarctic bottom water, the Cooperation Sea, the Prydz Bay, water structure

Acknowledgements. The authors are grateful to N.N. Antipov, acting Head of the Laboratory of oceanographic and climatic investigations of Antarctica of the AANII, for valuable comments to the paper, and to the shipboard scientific-technical crew of the R/V «Akademik Fedorov» for their help in obtaining expedition data.

Compilation of databases was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 19-17-00110).

REFERENCES

Amblas D., Dowdeswell J.A. Physiographic influences on dense shelf-water cascading down the Antarctic continental slope // *Earth-Science Reviews*. Vol. 185. 2018. P. 887–900.

Antipov N.N., Klepikov A.V. Mezhsodovaya izmenchivost' vodnyh mass v oblasti formirovaniya donnyh vod v zalive Prydz [Interannual variability of water masses in the area of formation of bottom water, the Prydz Bay] // *Arktika i Antarktika*. 2017. № 3. P. 87–106. (In Russian)

Antipov N.N., Klepikov A.V. Osobennosti formirovaniya i rasprostraneniya vodnyh mass na shelfe i materikovom sklone vokrug Antarktidy [Specific features of formation and distribution of water masses on the Antarctic shelf and slope] // *Sneg i Ljud*. 2014. № 128. P. 81–94. (In Russian)

Antipov N.N., Klepikov A.V. Osobennosti okeanograficheskogo rezhima zaliva Prydz po dannym ekspeditsij AANII 1997–2007 [Specific features of the oceanographic regime in the Prydz Bay

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, PhD student; *e-mail*: fedotovalina@yahoo.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: alik1@mail.ru

³ All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Department of Climate Dynamics and Aquatic Ecosystems, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail*: ksusha.vniro@gmail.com

according to the data of 1997–2007 AANII expeditions] // Probl. Arkt. i Antarkt. 2007. № 76. P. 36–48. (In Russian)

Batrak K.V. Gidrohimičeskaya harakteristika različnykh modifikacij antarkticheskikh vod [The hydrochemical characteristics of different modifications of the Antarctic water] // Okeanologiya. 2008. Vol. 48. № 3. P. 381–388. (In Russian)

Batrak K.V., Maslennikov V.V., Antipov N.N., Klepikov A.V. Osobennosti struktury vod shel'fa i materikovogo sklona v more Sodrugaestva po dannym ekspedicii NIS «Akademik Fedorov» v 2006 g [Specific features of water structure on the shelf and continental slope of the Cooperation Sea according to 2006 expedition of R/V «Akademik Fedorov»] // Arktika i Antarktika. Vol. 5(39). 2007. P. 112–124. (In Russian)

Chen H., Lin L., Li Y., Craven M. The Water Masses and Circulation at the Amery Ice Shelf // Open Access Library Journal. 3: e2542, 2016.

Golovin P.N., Antipov N.N., Klepikov A.V. Stok Antarkticheskikh shelfovykh vod v letnij period na shelfe i materikovom sklone morja Sodrugaestva i ih vliyanie na formirovanie donnykh vod Juzhnogo okeana [Flow of Antarctic Shelf Water on the shelf and continental slope of the Cooperation Sea and their influence on the AABW formation in summer] // Okeanologiya. 2011. Vol. 51. № 3. P. 393–408. (In Russian)

Golovin P.N., Antipov N.N., Klepikov A.V. Intruzivnoe rassloenie antarkticheskogo sklonovogo fronta [Intrusive stratification of the Antarctic slope front] // Okeanologiya. 2016. Vol. 56. № 4. P. 514–528.

Leffanue H., Craven M. Circulation and water masses from current meter and T/S measurements at the Amery Ice Shelf // FRISP Report. № 15. 2004. P. 1–7.

Mamaev O.I. Termohalinnyy analiz vod Mirovogo okeana [Thermohaline analysis of the World ocean waters] M.: Gidrometeoizdat, 1987. 294 p. (In Russian)

Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., Zenk W. Abyssal channels in the Atlantic Ocean: Water structure and flows. Springer. 2010. 290 p.

Ohshima K.I. et al. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya // Nature Geoscience (6). 2013. P. 235–240.

Orsi A.H. et al. On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements // Journal of geophysical research. Vol. 107. № C8. 2002. 31 p.

Orsi A.H., Johnson G.C., Bullister J.L. Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water // Prog. Oceanogr. 43. 1999. 55 p.

Tamura T., Ohshima, K.I., Nihashi S. Mapping of sea-ice production for Antarctic coastal polynyas // Geophys. Res. Lett. 35. L07606, 2008. 5 p.

Williams G.D. et al. The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay // Nat. Commun. 7:12577, 2016. P. 1–9.

Wong A. et al. Ocean-ice interaction and possible bottom water formation in Prydz bay, Antarctica // Ocean, ice and atmosphere: interactions at the Antarctic Continental Margin, Antarctic research series. Vol. 75. 1998. P. 173–187.

Wüst G. Schichtung und zirkulation des Atlantischen ozeans. Die stratosphäre. Deutsche Atl. Exped. «Meteor» 1925–27 // Wiss. Ergebn. Bd VI. I Teil. Lief. 2, 1935. 106 p.

Web sources:

MEOP-CTD [Elektronnyy resurs] URL: <http://www.meop.net> (data access 10.08.2018).

World Ocean Database, [Elektronnyy resurs] URL: <http://www.nodc.noaa.gov> (data access 15.12.2018)

Received 17.04.2019

Revised 21.06.2019

Accepted 12.09.2019