

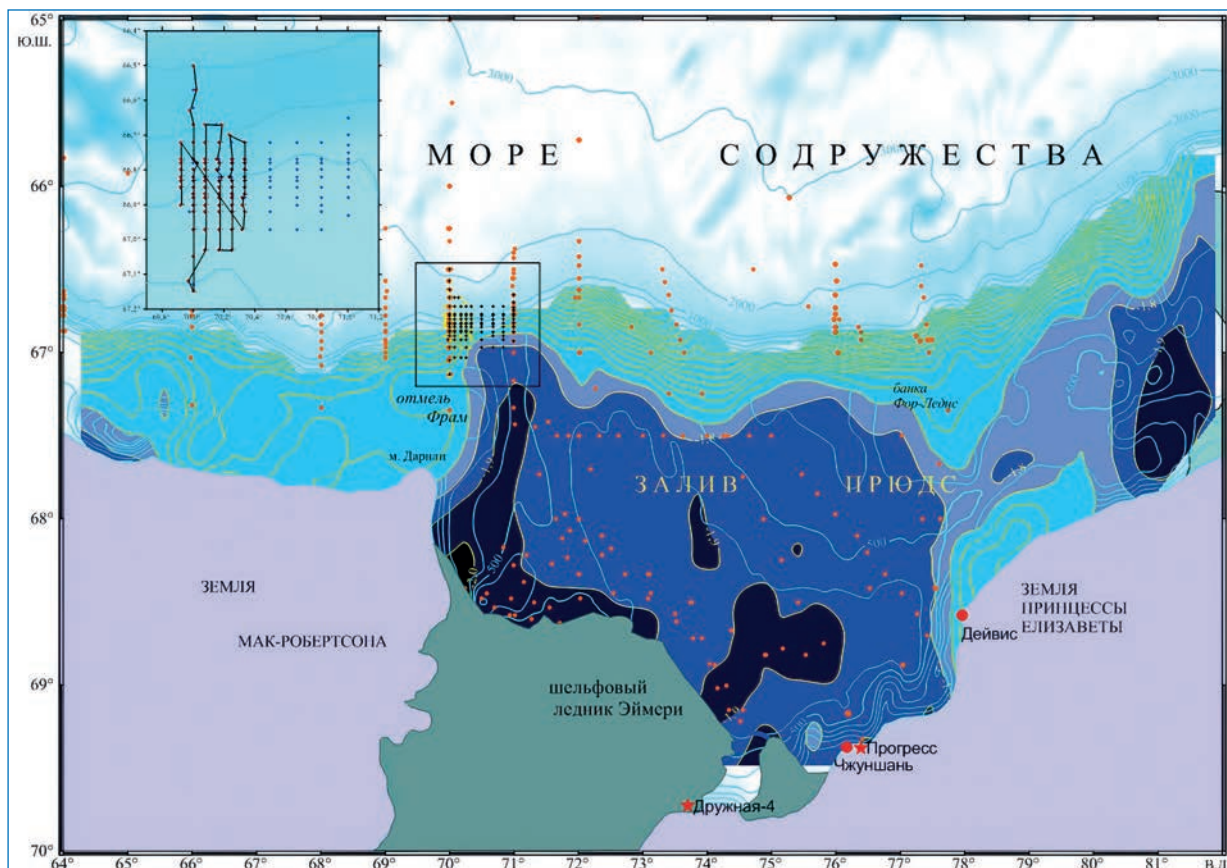
## ГЛУБОКОВОДНЫЕ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЛИВА ПРЮДС В СЕЗОННЫЙ ПЕРИОД 68-й РАЭ

Программа глубоководных океанографических исследований в рамках сезонного периода 68-й РАЭ предусматривала работы в заливе Прюдс моря Содружества, целенаправленное изучение режима вод которого было начато учеными ААНИИ в 1997 году. После ряда рекогносцировочных исследований в различных областях залива (в период с 1997 по 2001 год) был определен наиболее перспективный с точки зрения изучения такого климатически важного процесса, как формирование антарктической донной воды, район, расположенный вблизи заглупления бровки шельфа на выходе из депрессии Эймери. Начиная с 2004 года в этом регионе выполнялись океанологические разрезы, наиболее интересным из которых стал разрез по 70° в. д. Выбор положения этого разреза для мониторинга процессов на шельфе и материковом склоне оказался удачным, а 9 его реализаций с 2004 по 2016 год позволили получить уникальную информацию, в том числе и фундаментального научного характера. Наблюдения 2023 года проводились после 6-летнего перерыва, вызванного техническими, погодными и логистическими обстоятельствами.

Нужно заметить, что информация о процессах, происходящих в Южном океане, и прежде всего на шельфе и континентальном склоне, является исключительно важной для анализа и прогноза изменений климата Земли. Одним из наиболее интересных регионов с этой точки зрения является залив Прюдс. На побережье залива се-

годня функционируют четыре станции, принадлежащие Австралии, Индии, Китаю, России, и научное обеспечение транспортных операций является важной задачей ученых. С другой стороны, данный регион сегодня рассматривается как один из важнейших районов, связанных с образованием антарктической донной воды (АДВ), самой плотной воды в Мировом океане, формирование которой очень важно для его глобальной циркуляции. АДВ распространяется в придонном слое вплоть до умеренных широт Северного полушария. 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 смешивается с окружающими водами (в частности, глубинными водами из Тихого и Индийского океанов) и 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. Эта водная масса

Океанологическая изученность залива Прюдс судами ААНИИ за период с 1997 по 2023 год. Показано распределение температуры придонного слоя плотной шельфовой воды. На врезке — положение станций полигона 2016 года (синие значки) и положение станций и маршрут следования судна при выполнении полигона в 2023 году (красные значки)



является основой для всех формирующихся здесь типов водных масс, а ее поступление в эту область в основном обеспечивается системой крупномасштабных циклонических круговоротов. Распространение относительно теплой ЦГВ далее к югу вызывает таяние оснований шельфовых ледников и способствует образованию АДВ путем смешивания ЦГВ с плотными холодными водами, образующимися на антарктическом шельфе. Главная составляющая антарктической донной воды — плотная антарктическая шельфовая вода (АШВ). Она формируется при конвекции в период образования морского льда в осенне-зимний период при сопутствующем выбросе соли, что продуцирует относительно соленую воду с потенциальной температурой не выше  $-1,85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (точка замерзания при атмосферном давлении). В областях прибарьерных (прибрежных) полыней возникающая конвекция может достигать дна, формируя АШВ, которая в летний период проявляется в виде холодного придонного слоя. 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  $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (минимальная наблюдаемая температура этой водной массы  $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), поскольку рост давления с глубиной понижает точку замерзания морской воды. Эти водные массы (обычно их смесь) могут накапливаться в депрессиях на шельфе и со временем переливаться через порог у бровки шельфа или находить путь вниз через депрессии в пороге или по каньонам материкового склона.

В процессе перемещения (по шельфу и материковому склону) эта вода смешивается с более теплой в той или иной степени трансформированной ЦГВ — модифицированной циркумполярной водой (МЦГВ). На глубинах, где при перемещении по дну склона эта смесь делается равной по плотности водам окружающего океана, она покидает придонный слой и распространяется (в виде интрузий, линз, вихрей) изопикнически, в соответствующем ее плотности слое, пополняя придонный слой АДВ или вентилируя ЦГВ. Исследованию процессов, связанных с образованием и распространением плотных холодных вод в области шельфа и материкового склона были посвящены экспедиционные работы, проводившиеся в заливе Прюдс учеными ААНИИ с 1997 года по программам, разработанным в лаборатории океанологических и климатических исследований Антарктики (ныне лаборатория Южного океана отдела океанологии).

Анализ полученных данных, в первую очередь результатов наблюдений на разрезе по  $70^{\circ}$  в. д., показал особую роль региона в формировании режима вод не только Южного, но и Мирового океана.

Уже при первом выполнении разреза по  $70^{\circ}$  в. д. в январе 2004 года был зафиксирован факт «сползания» по материковому склону холодных плотных вод, сформировавшихся в зимний период в полынях залива Прюдс (в основном в полынье залива Маккензи у северо-западного края шельфового ледника Эймери) — факт существования каскадинга. Плотность этих вод оказалась достаточной для достижения ими абиссальных глубин и пополнения слоя АДВ. Эта вода была названа нами донной водой залива Прюдс (ДВЗП). За период с 2004 по 2016 год данный разрез был выполнен девять раз, т. е. практически был организован мониторинг процессов, определяющих режим вод в данном районе, показавший ежегодное существование каскадинга холодных плотных

вод. Было установлено существование изменчивости различных временных и пространственных масштабов структуры и свойств водных масс, в первую очередь ЦГВ и ДВЗП, которая может как влиять на изменения климата, так и являться следствием его изменений по другим глобальным причинам. Попутно была получена подробная информация о топографии дна океана в створе разреза и его окрестностях, что позволило экспериментально показать определяющую роль донной топографии в распространении вновь образованной ДВЗП по шельфу и материковому склону.

Уникальной особенностью разреза является малое расстояние между точками зондирования, уменьшенное в районе бровки шельфа до 1,8 км. В сочетании с тонкоструктурным (менее 1 м) вертикальным разрешением это обеспечило возможность качественно нового уровня интерпретации данных наблюдений. Данные такого качества позволили провести детальный анализ особенностей каскадинга во всех частях склона. Удалось показать, что характер и устойчивость этого процесса зависят от крутизны склона, а локальные неровности дна влияют на каскадинг, приводя к неустойчивости плотностных потоков, интрузионному расслоению и вихреобразованию. Установлено, что изменения уклона дна меняют режим стока плотных вод, а возникающие при этом гидравлические скачки приводят к турбулентному перемешиванию и являются одним из основных механизмов вентилиации глубинных и донных вод.

Малая пространственная дискретность позволила исследовать особенности структуры Антарктического склонового течения (АСТ). Это течение является фронтальным, с ним сопряжен Антарктический склоновый фронт (АСФ). В районе АСФ относительно теплые и соленые ЦГВ поднимаются вверх к континентальному шельфу, в итоге здесь наблюдаются самые сильные для прибрежных районов Южного океана горизонтальные градиенты между холодной шельфовой водой и ЦГВ. В дополнение к перепадам температуры и солёности, для области АСФ характерны сильные градиенты плотности. Геометрия этих поверхностей влияет на то, воды какой плотности имеют доступ на шельф. Максимальный наклон изопикн, как правило, наблюдается на бровке шельфа. Горизонтальные градиенты плотности также связаны с геострофически сбалансированными, имеющими вертикальный сдвиг вдоль склона потоками, так что поле плотности влияет на вертикальную структуру потока АСТ вдоль склона. Наконец, горизонтальные градиенты плотности могут быть источником потенциальной энергии, влияющей на генерацию и интенсивность вихрей, которые, в свою очередь, влияют на перенос тепла, пресной воды и других индикаторов.

Крайне важна роль процессов различных масштабов в области АСТ для определения характера и объема поступления теплых вод на шельф Антарктиды. При этом эффективность АСТ в качестве барьера для переноса тепла изменчива как в пространстве, так и во времени. Способность этой теплой воды пересекать АСТ и достигать континентального шельфа сильно варьируется из-за динамических свойств этого течения. В некоторых регионах АСТ образует сильный барьер для переноса тепла, и воды на шельфе остаются холодными и пресными. В других местах АСТ создает гораздо более слабый барьер, и теплая вода заполняет придонный слой на шельфе, в том числе под шельфовыми ледниками, что приводит к увеличению скорости таяния шельфовых ледников и в конечном счете к дестабилизации ледников Антарктиды.

Наблюдения 2016 года стали еще одним уникальным шагом к пониманию пространственной и временной изменчивости процессов различных масштабов в области шельфа и материкового склона Антарктиды, поскольку были выполнены в виде площадной съемки в долготном диапазоне от 70° в. д. до 71° в. д. Съемка состояла из 9 меридионально ориентированных разрезов, включавших зондирования в 106 точках. При этом было сохранено минимальное расстояние между станциями в примыкающих с обеих сторон к бровке шельфа частях разрезов — 1,8 км. Расстояние между разрезами также было минимизировано и в западной части полигона (от 70 до 70°20' в. д.) составляло 5 минут долготы (около 3,8 км), от 70°20' до 71° в. д. — 10 минут (7,6 км). Успешному выполнению работ способствовало практическое отсутствие дрейфующего льда, чего не было в периоды предыдущих работ в этом районе.

В результате была получена подробная картина мезомасштабной структуры вод в областях материкового склона и шельфа в диапазоне долгот от 70 до 71° в. д. Было установлено, что рельеф дна в значительной степени определяет пространственные особенности процессов, ответственных за формирование и распространение плотных и холодных АШВ на шельфе и ДВЗП на материковом склоне.

Наблюдения, выполненные на вошедшем в съемку 2016 года разрезе по 70° в. д., в сочетании с предыдущими наблюдениями показали, что выявленная изменчивость структуры вод и характеристик, обнаруженных на разрезе ДВЗП, в основном связана с изменчивостью крупномасштабных процессов, определяющих формирование и распространение основных водных масс АШВ, ВШЛ, ЦГВ.

Установленная изменчивость свойств поступающей со стороны глубокого океана теплой ЦГВ может быть объяснена крупномасштабными колебаниями интенсивности (и положения) южных струй АЦТ.

Другой причиной изменчивости свойств (включая объем) ДВЗП была определена изменчивость процессов, происходящих в южной части залива Прюдс, — формирования АШВ, ее трансформации в ВШЛ и особенностей распространения от района формирования до области бровки шельфа. Наблюденное (более чем в два раза) увеличение объема ДВЗП, пересекших створ разреза в момент его выполнения в 2015 и 2016 годах, по сравнению с 2012 и 2013 годами было связано, в частности, с установленным значительным увеличением объемов формирования ВШЛ в южной части залива Прюдс. Это стало свидетельством предполагавшегося усиления процессов таяния нижней поверхности шельфового ледника Эймери.

В программе океанологических исследований в 2023 году было запланировано повторение части съемки 2016 года (от 70 до 70°20' в. д.) и ее расширение в западном направлении до 69°40' в. д.

Зондирования выполнялись зондом “SeaBird 911+”, при этом производился отбор проб для определения содержания растворенного кислорода и биогенных элементов на горизонтах 0, 50, 100, 200, 500, 750, 1000, 2000 м и в придонном слое. Кроме того, дополнительно отбирались пробы в слоях экстремумов температуры и солености, положение которых определялось оперативно, путем анализа профилей при зондировании «вниз» на каждой станции.

С целью достижения необходимой дискретности по вертикали скорость зондирования на всех станциях не

превышала 1 м/с, а при подходе ко дну и на верхних 100 метрах подъема зонда к поверхности — 0,5 м/с.

Приближение зонда ко дну на станциях контролировалось с помощью альтиметра PSA-916 D, установленного на несущей раме зонда. В 68-й РАЭ, с учетом результатов анализа данных 61-й РАЭ, было уменьшено расстояние между последним горизонтом и дном. В 61-й РАЭ среднее расстояние до дна составляло более 20 м (11–30 м), а в период 68-й РАЭ среднее было около 12 м (4–23 м). Это важно для тонкого анализа распространения плотных вод, учитывая, что придонный пограничный слой составляет 20–30 м.

Работы выполнялись при практическом отсутствии дрейфующего льда. В отличие от легких ледовых условий 2016 года, в 2023 году было зарегистрировано аномальное состояние ледяного покрова не только в районе моря Содружества, но и в Южном океане в целом. В феврале 2023 года площадь морского льда вокруг Антарктиды достигла самых низких значений с момента начала спутниковых наблюдений в 1979 году. Площадь морского льда вокруг Антарктиды в феврале 2023 года составила 1,79 млн км<sup>2</sup>, что на 130 000 км<sup>2</sup> ниже предыдущего рекордно низкого уровня, достигнутого в феврале 2022 года.

Море Содружества (сектор 55°–85° в. д.) в феврале 2023 года практически полностью отчистилось от морского льда, площадь которого сократилась до значения 10,4 тыс. км<sup>2</sup>. Это на порядок ниже, чем средняя площадь за всю историю спутниковых наблюдений.

Кроме того, для моря Содружества и залива Прюдс наблюдаются более ранние сроки освобождения акватории от морского льда. Ранее процесс деградации морского льда начинался в конце ноября — начале декабря, в то время как в 2022 году это произошло на 2–3 недели раньше.

Такое аномальное состояние ледяного покрова может быть связано и с состоянием океана. Определение возможной роли океана стало одной из задач наблюдений в экспедиции 2023 года.

Наблюдения на полигоне проводились в период с 29 января по 2 февраля и были преждевременно завершены по причине существенного ухудшения погоды. Всего было сделано 5 разрезов в диапазоне долгот 69°55' в. д. — 70°20' в. д. с расстоянием между разрезами 5 минут долготы. В результате на полигоне было выполнено 80 глубоководных (до дна океана) гидрологических станций.

Несмотря на неполное выполнение программы, результаты наблюдений оказались как достаточно неожиданными, так и вполне вписывающимися в существующую на сегодня картину представлений о тенденциях изменений в режиме вод Южного океана, в том числе и климатического масштаба.

Наблюденная в 2023 году структура вод имеет принципиальные отличия от таковой как для разреза по 70 в. д. (в сравнении с предыдущими девятью реализациями), так и для полигона в целом (в сравнении с западной частью полигона 2016 года).

Важной отличительной особенностью съемки 2023 года стала сложная мезомасштабная структура как на шельфе, так и на склоне, связанная с активными процессами в области АСФ, приводящими к формированию вихрей, интрузий, линз. Эти образования хорошо выражены на представленных рисунках в распределении потенциальной температуры.

Принципиально значимым событием стало обнаружение аномального увеличения толщины слоя ЦГВ на всех разрезах полигона в той части области материкового склона, где не сказалось влияние процессов, связанных с АСФ,

т. е. заглуплением ядер АЗВ и ЦГВ и развитием сложной мезомасштабной структуры. Увеличение мощности слоя ЦГВ проявилось в значительном подъеме к поверхности океана как верхней границы, так и теплого ядра ЦГВ и, как следствие, подъема холодного ядра АЗВ. Так, предыдущие реализации разреза по 70° в. д., выполненные в период с 2004 по 2016 год, показали глубину залегания ядра АЗВ в диапазоне глубин 80–130 м (среднее 100 м), а глубины положения теплого ядра ЦГВ — в диапазоне 550–680 м (среднее 640 м). В 2023 году эти значения уменьшились практически в 2 раза: первое значение составляло 60 м, а второе 310 м. При этом заметно изменились и характеристики слоя АЗВ. Средняя по 9 реализациям температура этого слоя составила  $-1,81\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соленость  $34,29\text{ psu}$ .

В 2023 году соответствующие значения были  $-1,63\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $34,23\text{ psu}$ . Было наблюено и потепление в ядре ЦГВ: средняя температура за предыдущий период наблюдений составила  $0,70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (диапазон  $0,64\text{--}0,83\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), соленость  $34,68\text{ psu}$  (диапазон  $34,67\text{--}34,69$ ), а в 2023 году соответственно  $0,82\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $34,68\text{ psu}$  (максимальное значение  $0,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

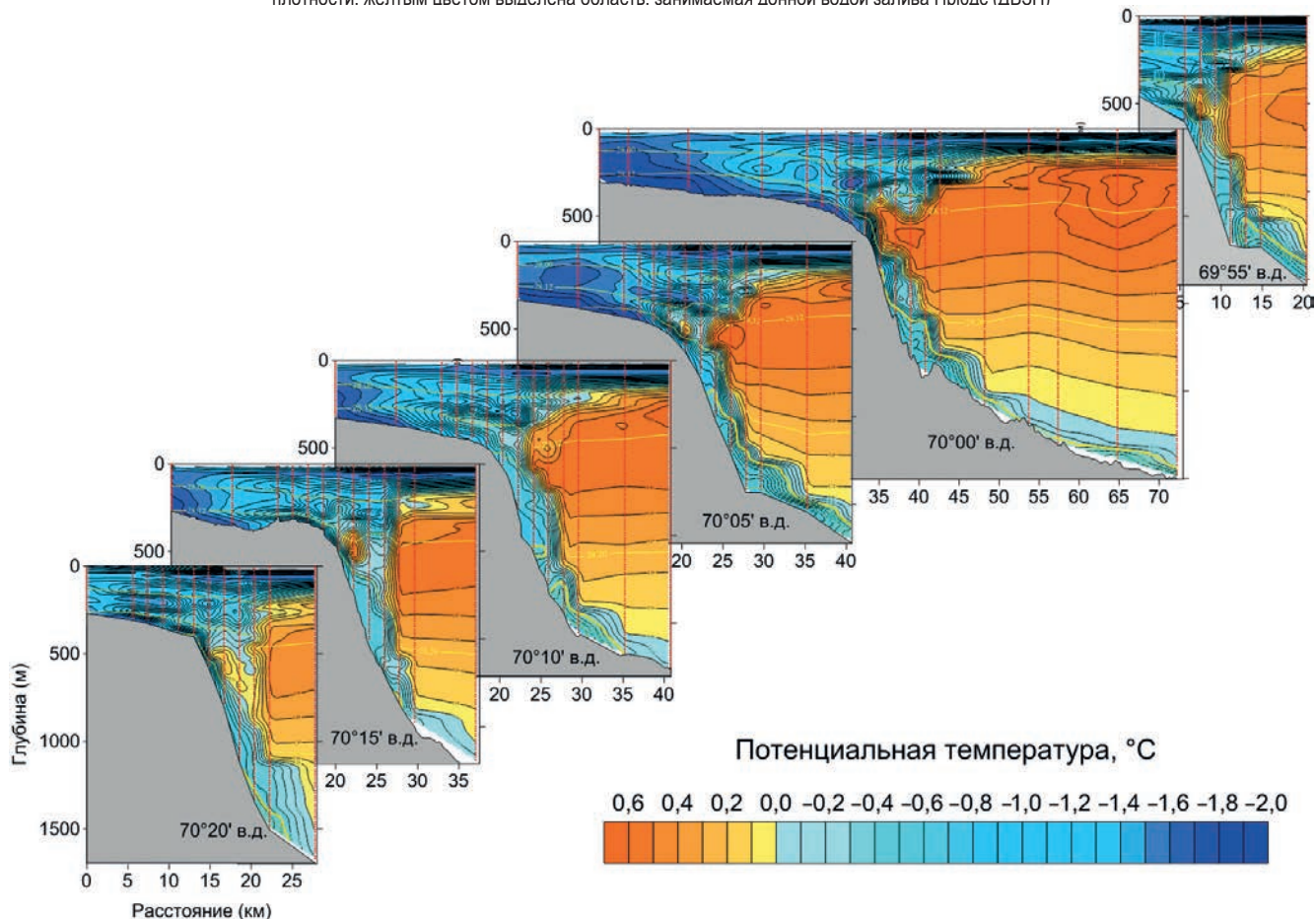
Таким образом, обнаруженный в 2023 году подъем верхней границы ЦГВ приблизительно на 300 м как существенно уменьшил глубину зимней конвекции, так и привел к вовлечению в поверхностные слои теплой воды, что проявилось не только в заметном потеплении в ядре АЗВ, но и в потеплении слоя антарктической поверхностной воды. Наблюдения показали, что в предыдущие годы поверхностная вода обычно имела отрицательную температуру (в конце января от  $-0,2$  до  $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), тогда как в 2023 году — положительную (до  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), что позволяет связать аномально легкую ледовую обстановку в том числе с влиянием океанического тепла.

В качестве одного из последствий значительного подъема ядра ЦГВ можно было ожидать увеличения поступления тепла на шельф, поскольку бровка шельфа в районе разреза находится на глубине около 600 м, а слой  $T_{\text{макс}}$  в 2023 году поднялся до 300 м. В средних условиях, как отмечено выше, он залегает на глубинах ниже бровки антарктического шельфа, т. е. глубже 600 м. Но непосредственно на шельфе в области полигона данные наблюдений не показали потепления МЦГВ. Более того, температура МЦГВ на всех разрезах полигона на шельфе в среднем оказалась в 2023 году ниже, чем на тех же разрезах полигона, выполненного в 2016 году. Возможно следующее объяснение этого кажущегося противоречия. Интенсификация поступления ЦГВ в район бровки шельфа ведет к обострению горизонтальных градиентов в области АСФ, т. е. усилению его роли как барьера для прямого поступления ЦГВ на шельф. В то же время усиление бароклинности ведет к неустойчивости фронта и, как следствие, к интенсификации процессов образования вихрей, которые и являются в этом случае механизмами обмена свойствами между водными массами шельфа и склона.

Увеличение интенсивности поступления ЦГВ является следствием изменчивости климатического масштаба в режиме АЦТ и в 2023 году проявилось в аномально низкой ледовитости не только района моря Содружества, но и Южного океана в целом. В свою очередь, климатическим следствием роста поступления ЦГВ на шельф является наблюдаемая (в основном для Западной Антарктиды) интенсификация таяния шельфовых ледников, ведущая к дестабилизации ледового щита Антарктиды.

В настоящее время выявлена тенденция к уменьшению массы ледников не только для Западной (что

Потенциальная температура на разрезах полигона, выполненного в январе 2023 года. Желтыми изолиниями показаны характерные значения нейтральной плотности, желтым цветом выделена область, занимаемая донной водой залива Пюкдс (ДВЗП)



известно давно и связано в значительной степени с теплыми водами циркумполярного происхождения, заполняющими придонные слои шельфа морей Амундсена и Беллинсгаузена), но и для Восточной Антарктиды. Главной причиной таяния шельфовых ледников является поступление относительно теплой воды к их основанию, и ускорение процесса таяния вызывается увеличением объема и температуры поступающей из области материкового склона на шельф модифицированной ЦГВ. Для определения существующего состояния и перспектив необходимо понимать, за счет каких механизмов происходит поступление этой воды на шельф и какова изменчивость этих механизмов. Именно поэтому сегодня важнейшей задачей исследователей режима вод и льдов антарктического шельфа и материкового склона является изучение не только процессов формирования АДВ, но и особенностей структуры и изменчивости процессов в области АСТ (и неразрывно связанного с ним АСФ), в значительной степени регулирующих водообмен между шельфом и склоном.

Исследования показали, что за последние четыре десятилетия вклад от таяния ледяного покрова Восточной Антарктиды в повышение уровня океана увеличился (см.: Herraiz-Borreguero L., Naveira Garabato A. Poleward shift of Circumpolar Deep Water threatens the East Antarctic Ice Sheet // Nature Climate Change. 2022. Vol. 12. P. 728–734).

Однако, в отличие от Западной Антарктиды, причины потери массы льда в Восточной Антарктиде слабо изучены. Некоторые исследования показывают, что это может быть связано с потеплением водных масс для районов материкового склона и шельфа Восточной Антарктиды. Одной из причин этого явления считается недавно обнаруженное устойчивое смещение западных ветров к полюсу над Южным океаном в секторе 80–160° в. д. (и, как следствие, смещение к югу южных ветвей АЦТ). Поскольку этот сдвиг, по прогнозам, сохранится и в XXI веке, поступление тепла из океана в Восточную Антарктиду может продолжать усиливаться, угрожая будущей стабильности ледяного покрова.

На наш взгляд, наблюдаемые и описанные выше изменения в глубине залегания и характеристиках по-

верхностных и глубинных вод как раз связаны со смещением в сторону полюса южной границы АЦТ. Подобная топография ядер (глубины залегания) характерна для области Южного океана, расположенной севернее (как показал разрез по 70° в. д., выполненный в 2007 году, северная станция которого находилась на 65° ю. ш.). Таким образом, наблюдения 2023 года подтвердили важный факт смещения к югу южной границы АЦТ (определенный ранее по данным спутниковых наблюдений) и указали на возможно больший сектор по долготе, чем определено в работе, этому посвященной (в работе использованы данные по 2018 год, поэтому возможны некоторые отличия, связанные с дальнейшим смещением АЦТ).

Наряду с отмеченными особенностями структуры вод, в очередной раз получено подтверждение существования в летний период процессов формирования и каскадинга плотных вод на шельфе и материковом склоне, определены их характеристики. Обнаруженные на разрезе по 70° в. д. ДВЗП в 2023 году имели объем, почти в 2 раза меньший, чем в 2016 году. Так же в меньших объемах обнаружена АШВ, достигающая области бровки. Сделанный по данным предыдущих наблюдений вывод о тенденции к росту объема формирующихся в заливе Прюдс донных вод не подтвердился, а для получения более обоснованных выводов требуется продолжение натурных исследований.

Уникальные и достаточно неожиданные результаты наблюдений, выполненных в заливе Прюдс в январе–феврале 2023 года, станут хорошей базой для продолжения фундаментальных исследований процессов формирования АДВ в данном районе, изучения структуры и изменчивости Антарктического склонового фронта.

*Авторы выражают благодарность экипажу НЭС «Академик Федоров» во главе с капитаном А.В. Алексеевым за профессиональное и ответственное отношение к выполнению программы океанологических наблюдений.*

*Н.Н. Антипов, С.В. Кашин, М.С. Молчанов (АНИИ)*

Потенциальная температура на разрезе по 70° в. д., выполненном в 2016 и 2023 годах. Желтым цветом выделена область, занимаемая донной водой залива Прюдс (ДВЗП)

