

УДК 551.466

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВОД В БАССЕЙНЕ ПАУЭЛЛА В ЯНВАРЕ–ФЕВРАЛЕ 2022

© 2023 г. Р. З. Мухаметьянов^{1, 4}, А. М. Селиверстова¹, Е. Г. Морозов^{1, 2, 4, *},
Д. И. Фрей^{1, 2, 4}, В. А. Кречик^{1, 3}, О. А. Зувев¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Морской гидрофизический институт, РАН, Севастополь, Россия

³Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*e-mail: egmorozov@mail.ru

Поступила в редакцию 06.11.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

В январе–феврале 2022 года в антарктической экспедиции на научно-исследовательском судне “Академик Мстислав Келдыш” был выполнен CTD/LADCP разрез с гидрохимическими наблюдениями через бассейн Пауэлла в море Уэдделла. Разрез простирался от Антарктического полуострова до Южных Оркнейских островов, тем самым пересекая круговорот Уэдделла в его северо-западной части. В ходе проведенного разреза были получены новые данные о гидрологической и гидрохимической структуре и динамике вод в этом районе. В работе представлены результаты анализа этих данных, касающиеся структуры круговорота Уэдделла, формирования Антарктической донной воды, а также изменчивости гидрофизических и гидрохимических характеристик вод в бассейне Пауэлла. В структуре круговорота Уэдделла было обнаружено лишь два из трех течений — Антарктическое прибрежное течение и течение Антарктического склонового фронта, скорости в которых составляли 10–15 см/с. Структура вод была характерной для моря Уэдделла, но в слое Теплой глубинной воды зафиксировано изменение в максимуме температуры.

Ключевые слова: бассейн Пауэлла, водные массы, CTD/LADCP разрез, кислород, силикаты

DOI: 10.31857/S0030157423040147, **EDN:** YIGHQE

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн Пауэлла расположен на северо-западной окраине моря Уэдделла, которое в свою очередь омывает берега Антарктиды в Атлантическом секторе Южного океана. Северную границу бассейна Пауэлла можно очертить по хребту Саут Скотия (South Scotia Ridge), который простирается от Южных Шетландских островов до Южных Оркнейских островов. К западу от бассейна расположен пролив Брансфилда.

Бассейн Пауэлла играет немаловажную роль в распространении Антарктической донной воды (ААДВ), которая осуществляет вентиляцию абиссали Мирового океана [18, 26]. Образованная в море Уэдделла ААДВ течет в море Скотия через проходы в хребте Саут Скотия и распространяется далее в Атлантический океан. Вынос холодных вод из моря Уэдделла был, в частности, подтвержден в 2020 г. в 79-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”. В одном из четырех прохо-

дов хребта Саут Скотия, а именно в проходе Филипп, вынос холодных вод оказался незначительным [7]. Основным же проходом для потока Антарктической донной воды в Атлантику является самый глубокий Оркнейский проход [24, 30].

Бассейн Пауэлла также является связующим звеном между водами моря Уэдделла, пролива Брансфилда и моря Скотия как с точки зрения динамики вод в этом районе и процессов водообмена между указанными акваториями [16, 32], так и с биологической точки зрения. В частности, в этом районе происходит распространение и локализация антарктического крыла [9], ценнейшего биоресурса Антарктики и важнейшего звена трофической цепи данной экосистемы. Учитывая вышесказанное, бассейн Пауэлла вполне можно считать весьма важным районом для изучения Антарктики, и, соответственно, проведение океанологических наблюдений представляется необходимым для лучшего понимания происходящих

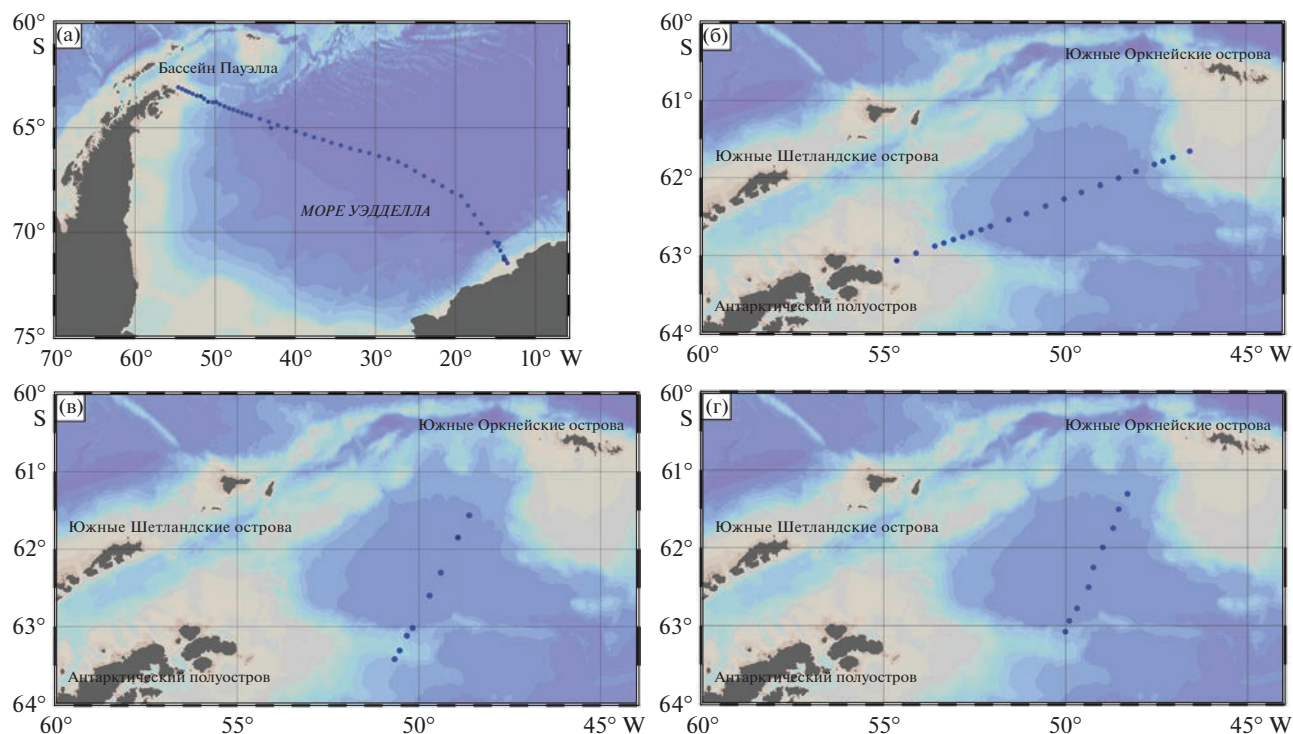


Рис. 1. Разрез SR04 (в данном случае представлен разрез за 2005 г.) (а) и три разреза, выполненные в бассейне Пауэрла на судах: “Polarstern” (2005 г.) (б); “Polarstern” (1998 г.) (в) и “Nathaniel B. Palmer” (1997 г.) (г).

там процессов, в частности, процесса формирования и распространения ААДВ.

Тем не менее, этому району было уделено меньше внимания, чем в целом морю Уэдделла, в котором исследования во многом затрудняли тяжелые ледовые условия [4]. В бассейне Пауэрла, по данным World Ocean Database 2018 [10], было проведено всего лишь три полноценных STD-разреза (не считая отдельных станций), а остальные разрезывались в других частях моря Уэдделла (самым повторяемым является разрез SR04 от Антарктического полуострова (острова Жуэнвиль) на юго-восток до мыса Капп-Норвегия на континенте). Что же касается бассейна Пауэрла, то два из трех разрезов были проведены почти меридионально (это разрезы, выполненные на судах “Nathaniel B. Palmer” и “Polarstern” в 1997 и 1998 гг. соответственно), а третий, последний, был проведен от Антарктического полуострова до Южно-Оркнейского плато (“Polarstern”, 2005 г.). Схема разрезов представлена на рис. 1.

Несмотря на малое количество океанографических разрезов через бассейн Пауэрла, в нем проведены многочисленные мультидисциплинарные исследования [19, 22, 29, 30, 32]. В том числе, исследования выполнялись в январе–февра-

ле 2020 г. в 79-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” [5]. Было выполнено несколько океанографических станций в бассейне Пауэрла. Для продолжения этих исследований в 87-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в феврале 2022 г. был выполнен подробный STD/LADCP разрез с гидрохимическими наблюдениями через бассейн Пауэрла [6]. Целью данной работы является представление результатов этих исследований и оценка изменчивости гидрологических и гидрохимических характеристик района, которые ранее исследовались в работах [23, 31].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В январе–феврале 2022 г. в экспедиции в Атлантический сектор Южного океана на НИС “Академик Мстислав Келдыш” (НИС “АМК”) в 87-м рейсе был выполнен океанографический разрез через бассейн Пауэрла (море Уэдделла) от Антарктического полуострова до Южных Оркнейских островов (подобный тому, что был выполнен на судне “Polarstern” в 2005 г.). Схема расположения станций на разрезах показана на рис. 2.

В 2022 г. на разрезе было выполнено 16 станций, на которых проводилось погружение кассетного пробоотборника General Oceanics 1018 (по-

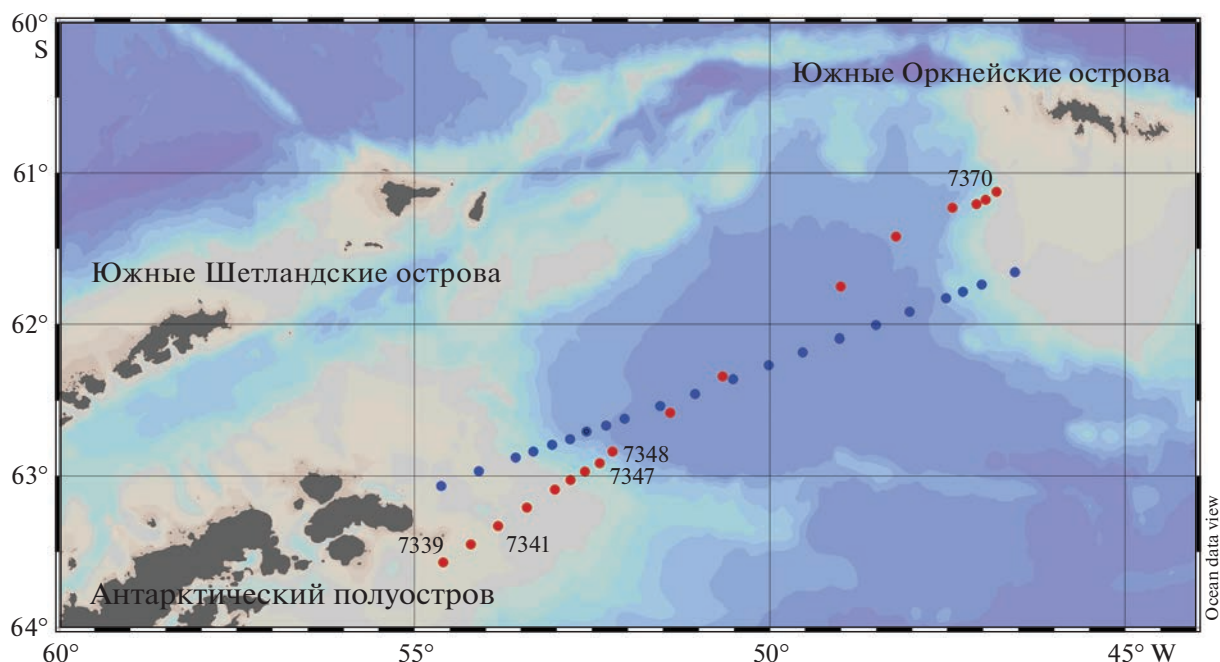


Рис. 2. Схема расположения станций на разрезе в бассейне Пауэлла в 87-м рейсе НИС “АМК” (красный цвет, подписаны номера станций, о которых будет упомянуто особо далее по тексту) и станции разреза судна “Polastern” 2005 г. (синий цвет).

зетта) с размещенным на нем оборудованием. Профилирование розеткой проводилось от поверхности до дна. На самой розетке размещалось следующее оборудование: CTD зонд Idronaut Ocean Seven 320Plus и LADCP TRDI WorkHorse Monitor 300 kHz для получения гидрологических данных; альтиметр и пингер для обеспечения безопасного погружения (т.к. профилирование выполнялось почти до самого дна) и батометры для отбора проб воды.

Пробы воды для гидрохимических анализов отбирались пластиковым батометром на станциях, в специально подготовленные стеклянные и пластиковые бутылки в соответствии с ГОСТ Р 51 592–2000, ГОСТ 17.1.5.04–81 и методиками, используемыми для анализа. Пробы для определения растворенного кислорода отбирались через силиконовые шланги со стеклянными трубками, позволявшими контролировать отсутствие пузырька воздуха при заполнении склянок. Растворенный кислород в морской воде анализировался с помощью метода Винклера, модифицированного Карпентером в 1965 г. (микрометод) [12]. Определение растворенного неорганического кремния (силикатов) проводилось по методу Королева [8] с образованием голубого молибденового комплекса.

Для обработки и визуализации CTD- и LADCP-данных использовался программный пакет Ocean

Data View [28]. Для учета вклада приливных скоростей использовалась региональная модель CATS2008 [27]. На переходах между станциями проводились измерения течений в верхних 600–800 м при помощи встроенного судового профилографа течений (SADCP), данные от которого также использовались при обработке данных LADCP. Помимо данных, полученных непосредственно в ходе 87 рейса “АМК”, были использованы данные из открытой базы данных World Ocean Database 2018 [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водные массы

Гидрологическая структура вод на разрезе была следующей: верхний слой занимала Антарктическая поверхностная вода (АПВ); далее шел слой Теплой глубинной воды (как известно, единственная водная масса, поступающая извне в море Уэдделла и именуемая также Циркумпольярной глубинной водой); под слоем Теплых глубинных вод (ТГВ) располагались Глубинные воды моря Уэдделла (УГВ) и Донные воды моря Уэдделла (УДВ), которые относят к Антарктической донной воде. Отдельно можно выделить шельфовые воды, которые схожи с АПВ, но при этом являются более холодными и, что важнее, самыми плотными водами. Во время ледообразо-

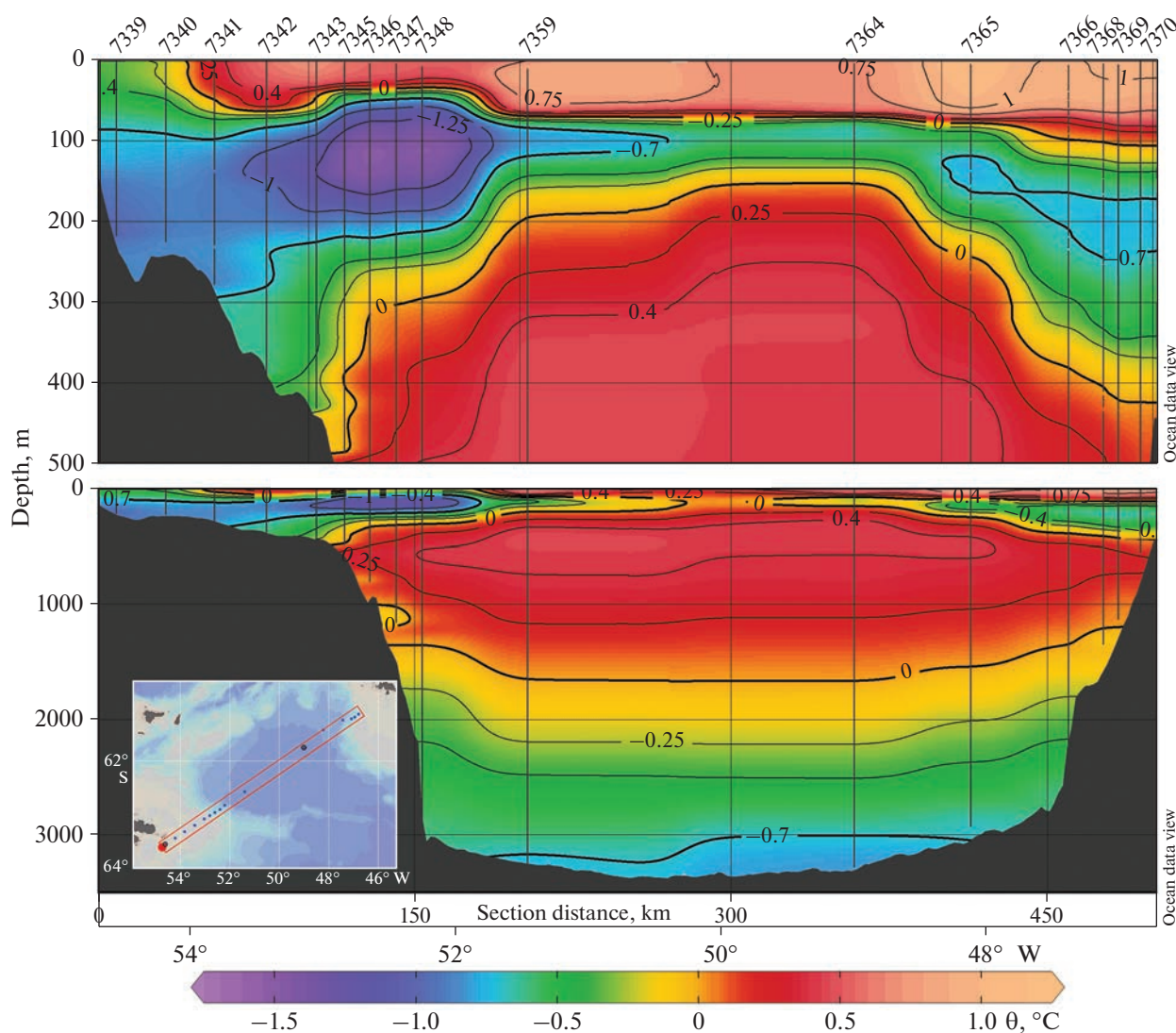


Рис. 3. Распределение потенциальной температуры на разрезе через бассейн Пауэлла по данным 87 рейса НИС «АМК». В верхней части рисунка показаны только верхние 500 м, в нижней — вся водная толща от поверхности до дна.

вания они становятся еще более плотными за счет осолонения и опускаются на глубину, чтобы стать потом основой будущей ААДВ. При дальнейшем стекании этих экстремально плотных вод по континентальному склону происходит смешение с ТГВ [21, 25], а также с АПВ. В результате смешения всех трех вышеперечисленных водных масс образуется Антарктическая донная вода.

Слой УГВ обычно выделяют по характеристикам потенциальной температуры от -0.7 до 0°C , и, соответственно, слой УДВ — по изотермам ниже -0.7°C [29, 33].

Донные воды моря Уэдделла на выполненном разрезе занимали глубины более 3000 м. Глубинные воды моря Уэдделла занимали промежуточное положение между УДВ и ТГВ, нижняя грани-

ца которой опускалась в центральной части разреза до глубин более 1500 м. Верхняя граница варьировалась вдоль разреза от 150 м в центральной части до 450 м в районе склона (на шельф она, как известно, уже не проникает, по крайней мере, в море Уэдделла, чем и обусловлена возможность образования ААДВ). Такой прогиб изолиний вверх в центре бассейна Пауэлла характерен для циклонической циркуляции, которая, собственно и присутствует в море Уэдделла. Выше слоя ТГВ располагалась АПВ. АПВ занимает поверхностный слой в несколько сотен метров, из которых 50–100 м прогреваются в летнее время, что видно на разрезе (рис. 3).

Под слоем прогретой воды с поверхности предполагается холодный подповерхностный слой

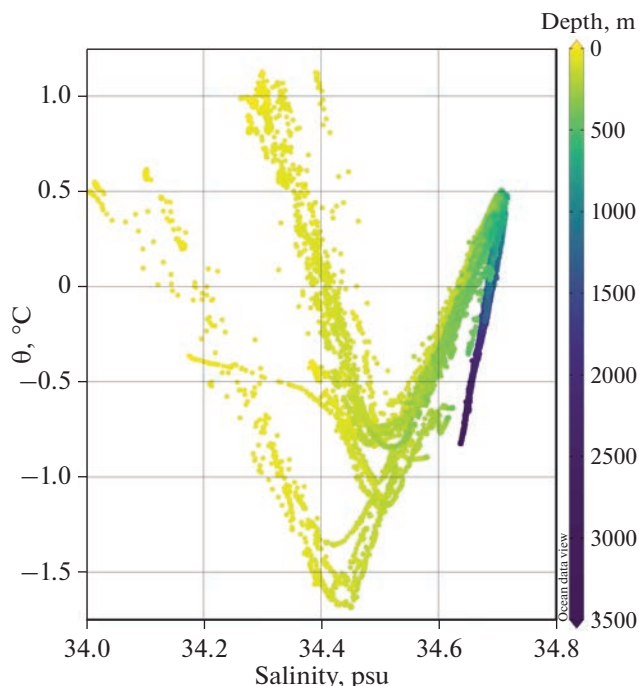


Рис. 4. θ, S -кривые на разрезе через бассейн Пауэлла по данным 87 рейса НИС “АМК”.

зимнего выхолаживания. В западной части бассейна Пауэлла он более глубокий из-за выноса холодных вод южной части моря Уэдделла циклоническим круговоротом течений.

Значения температуры в прогревом верхнем слое достигают 1°C в восточной части разреза. Положительные значения температуры, помимо верхнего слоя АПВ, имеют также Теплые глубинные воды (собственно этот подповерхностный слой и выделяют по нулевой изотерме [11]). На нашем разрезе 2022 г. максимум потенциальной температуры в слое ТГВ составлял 0.51°C , что можно видеть по θ, S -кривым (рис. 4).

Максимальные значения температуры в слое Теплой глубинной воды на всех разрезах (как на предыдущих разрезах в бассейне Пауэлла, так и на нашем разрезе) отличаются, но при этом данные предыдущих разрезов ближе между собой (максимум потенциальной температуры составлял 0.66°C в 1997 г., 0.62°C в 1998 г. и 0.74°C в 2005 г.). По данным наших измерений в 79-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2020 г. в точке $62^{\circ}29.0'$ ю.ш., $50^{\circ}57.4'$ з.д. (станция 6654), максимальная потенциальная температура была 0.65°C . По данным нового разреза в 2022 г., максимальная температура достигала всего лишь 0.51°C , что заметно отличается от предыдущих данных. В этом районе нами было проведено еще одно измерение зондом AML до глубины 500 м, которое не было включено в данные на разрезе, чтобы строить

разрез по однородным данным одного прибора. По данным AML в точке $62^{\circ}20.0'$ ю.ш., $50^{\circ}39.0'$ з.д., максимальная потенциальная температура в слое ТГВ была 0.55°C , что заметно холоднее всех предыдущих измерений. Возможно, наш разрез не пересек ядро самой теплой воды, но скорее максимальные значения температуры в слое ТГВ в бассейне Пауэлла изменяются от года к году в пределах 0.2 от 0.55° до 0.74°C . Мы допускаем, что ядро самой высокой температуры в Теплой воде моря Уэдделла меняет свое пространственное положение с течением времени и отдельные станции выполняются не в точке с максимальной температурой ядра. Максимум температуры находится на глубине около 400 м. На основании наших измерений можно считать, что 2022 год был аномально холодным для Теплой глубинной воды моря Уэдделла в бассейне Пауэлла.

На разрезе температуры, выполненном в 2022 г., обнаруживается слой опресненной воды в районе склона и линза очень холодной воды с температурными характеристиками ниже -1°C (потенциальная температура достигает -1.69°C) (рис. 3). Линза расположена в подповерхностном слое (на глубинах примерно от 50 до 200 м) над склоном. На разрезе солёности эта особенность не проявляется (рис. 5), и, как будет показано ниже, ее нет и на разрезе кислорода.

Непосредственно над этой линзой имеется сильно опресненный участок с солёностью ниже

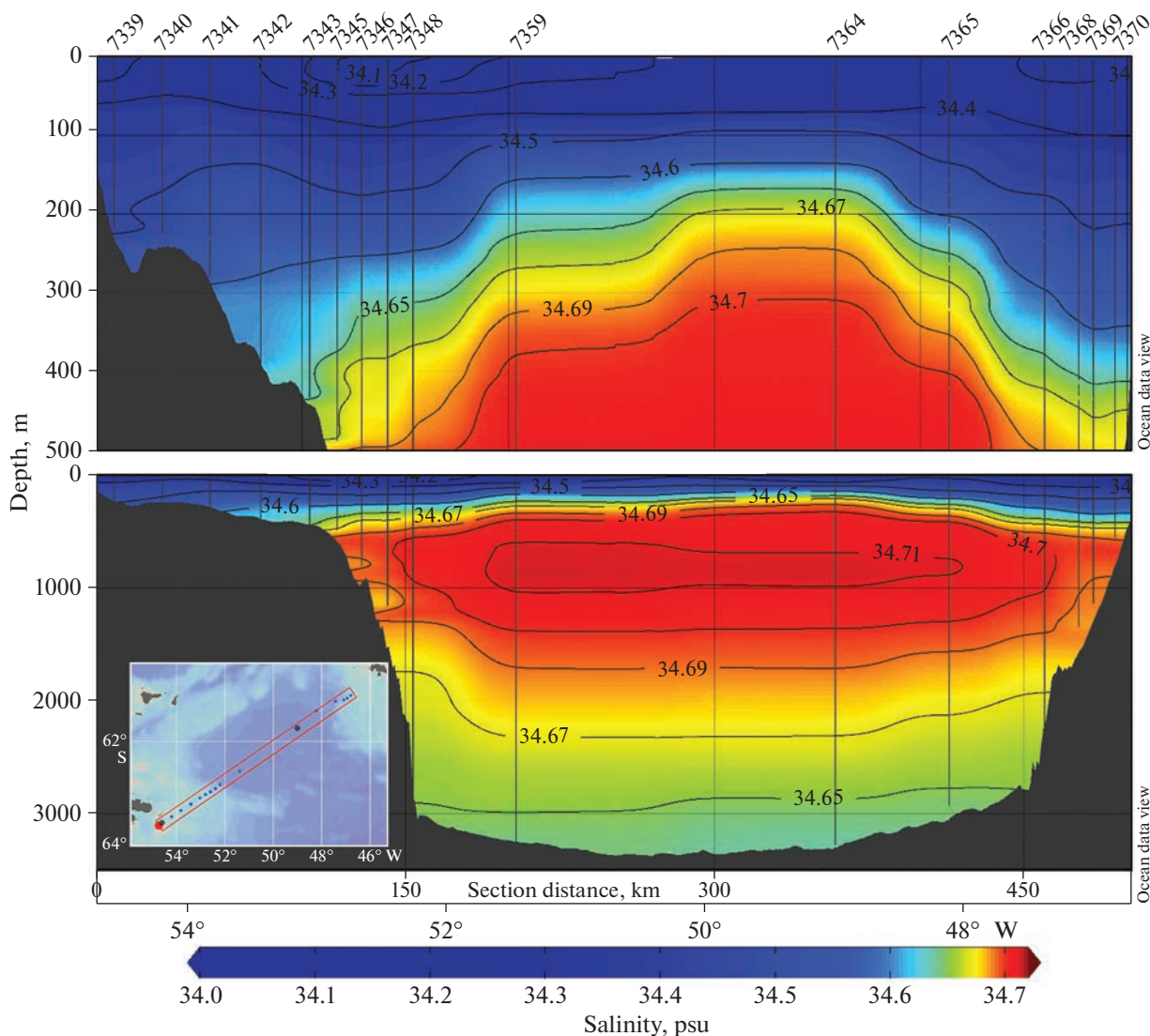


Рис. 5. Разрез солёности в бассейне Пауэлла по данным НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2022 г. В верхней части рисунка показаны только верхние 500 м, а в нижней — вся водная толща от поверхности до дна.

34.2 psu. Линза и слой холодной воды образуются за счет зимнего выхолаживания и летнего прогрева поверхностного слоя. Поэтому она не проявляется по солёностным характеристикам. Слой опресненной воды образуется за счет таяния большого количества льда, который выносится из южной части моря Уэдделла. Опреснение льдом может достигать 33.6 psu [20].

На разрезе по STD-данным, выполненном в 87-м рейсе НИС “АМК”, так же, как и на разрезе судна “Polarstern” 2005 г. (рис. 6), не обнаруживается явного стекания вод по континентальному склону вниз.

Известно, что формирование ААДВ за счет такого каскадинга в море Уэдделла происходит по

всему краю шельфа к западу примерно от 30° з.д. [17]. На STD-разрезах от Антарктического полуострова на юго-восток в сторону мыса Капп-Норвегия (мыс Капп-Норвегия расположен в юго-восточной части моря Уэдделла на континенте) опускание плотных вод, как правило, проявляется (рис. 7).

Важным фактором при обнаружении стекания холодной воды с высоким содержанием кислорода по континентальному склону является температура поверхности воды. На разрезе судна “Polarstern” в 2005 г. температура воды на поверхности была -1.44°C . Во время наших измерений в 2022 г. граница льда отступила на юг более чем на 150 км (рис. 8). По данным антарктической экспедиции 2020 г., ледяное поле было встречено на

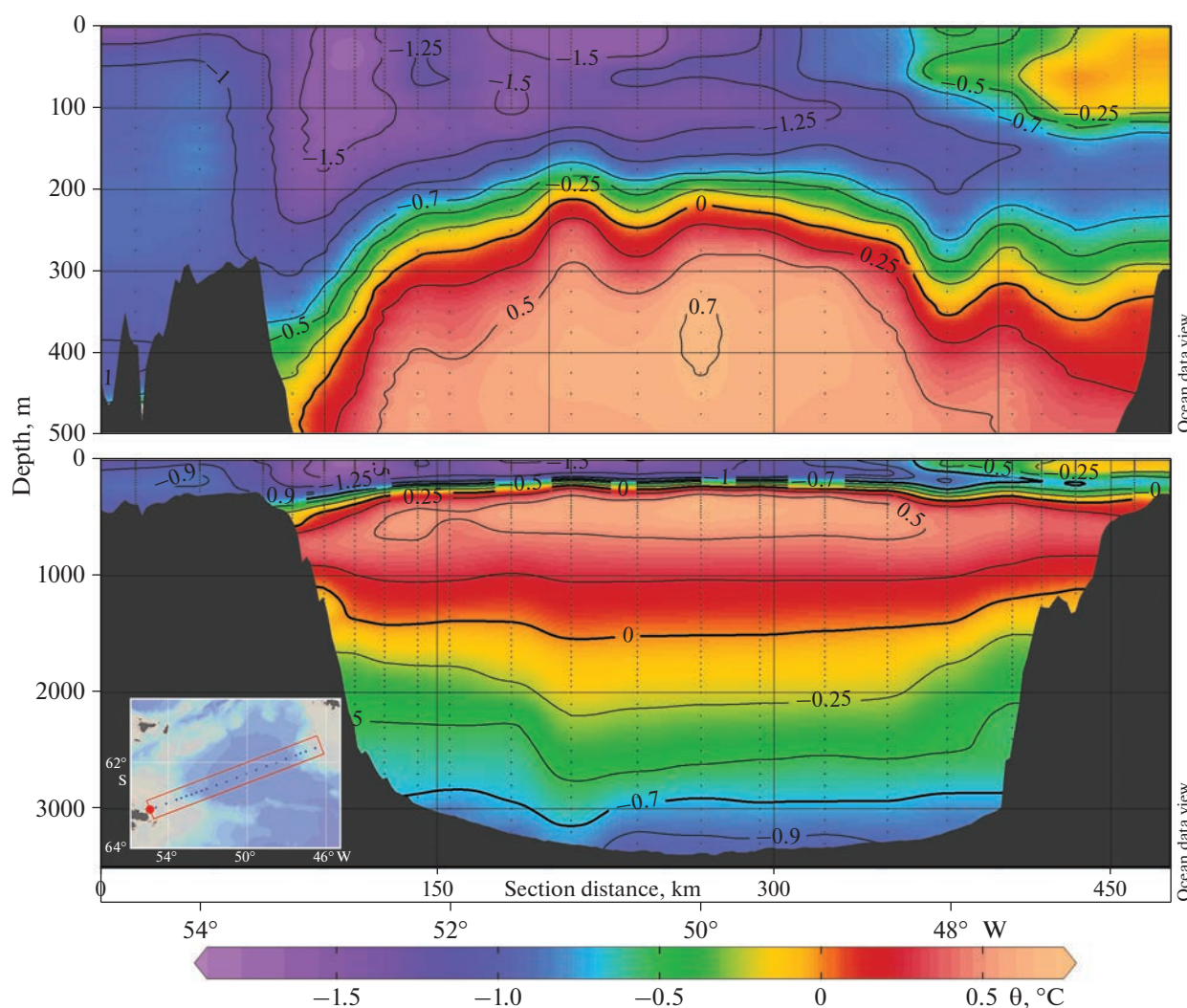


Рис. 6. Распределение потенциальной температуры на разрезе через бассейн Пауэлла, выполненном в 2005 г. на судне “Polarstern”. Стеkanie плотных вод вдоль континентального склона не проявляется. В верхней части рисунка показаны только верхние 500 м, а в нижней — вся водная толща от поверхности до дна.

62° ю.ш. в бассейне Пауэлла, а на широте 63° уже нельзя было работать. В 2022 г. самая южная станция на разрезе была беспрепятственно выполнена на 63° ю.ш. Самая южная станция экспедиции была на 64°30' ю.ш. На шельфовых станциях нашего разреза температура верхнего слоя была -0.45°C . Этого недостаточно для обеспечения воды высокой плотности и каскадинга потока вниз по склону.

Распределение скоростей течений на разрезе

Известно, что в акватории моря Уэдделла имеется огромный круговорот циклонической направленности: Weddell Gyre [13]. В северо-западной его части обычно выделяют три основных фронта: Фронт Уэдделла (Weddell Front), Антарк-

тический склоновый фронт (Antarctic Slope Front) и фронт Антарктического прибрежного течения (Antarctic Coastal Current). Фронт Уэдделла обычно связывают с изобатами в 2500–3000 м [32]. Антарктический склоновый фронт ассоциируют с верхней частью материкового склона в районе изобаты 800 м [32], а Антарктическое прибрежное течение не привязано к какой-либо конкретной изобате и локализуется на шельфе [34], за внешнюю границу которого в Антарктике обычно принимают изобату 500 м [4], а сам фронт часто ассоциируют с кромкой льда.

На выполненном в 87-м рейсе НИС “АМК” разрезе через бассейн Пауэлла можно видеть единое течение, охватывающее почти весь шельф и часть склона (рис. 9). Стоит отметить, что скоро-

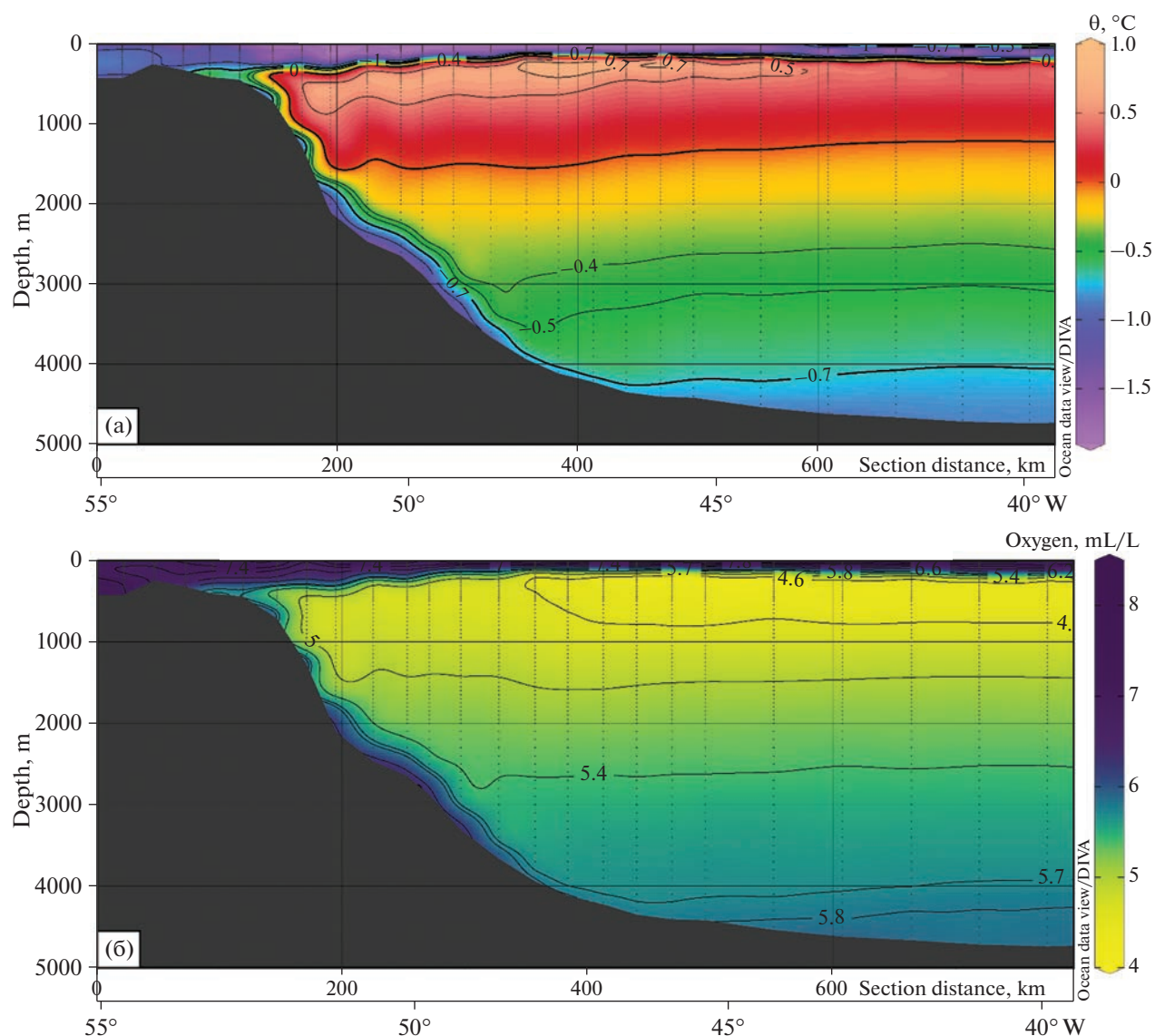


Рис. 7. Распределение потенциальной температуры (а) и содержания кислорода (б) на разрезе SR04 (представлена только часть разреза от полуострова), выполненном в 2005 г. на судне “Polarstern”. Стеkanie холодных плотных вод вниз по континентальному склону проявляется как по потенциальной температуре, так и по кислороду.

сти подверглись обработке для учета вклада приливных скоростей при помощи региональной модели CATS2008 [27].

Разграничение на Антарктическое прибрежное течение и Антарктический склоновый фронт можно провести по станции 7343, расположенной на бровке шельфа. Скорости в верхней части склона составляют 10–15 см/с. На шельфе скорости составляют те же 10–15 см/с, несмотря на то что, согласно литературным данным, Антарктическое прибрежное течение должно быть менее интенсивным по сравнению с Антарктическим склоновым фронтом [34]. К тому же на шельфе имеется станция (7339), скорости на которой су-

щественно отличаются от скоростей на остальных станциях, как шельфовых, так и склоновых (рис. 10).

Во всей толще на этой станции скорости не опускались ниже 30 см/с, а максимальные значения достигали 55 см/с. Вероятно, что это всего лишь ошибка региональной модели для оценки скорости прилива. По имеющимся данным невозможно определить, какая из моделей лучше: региональная [27] или глобальная [14]. С другой стороны, диапазон скоростей на этой (7339) станции составляет 25 см/с, то есть даже если бы прилив максимально уменьшил скорости на этой станции, в придонном слое все равно были бы

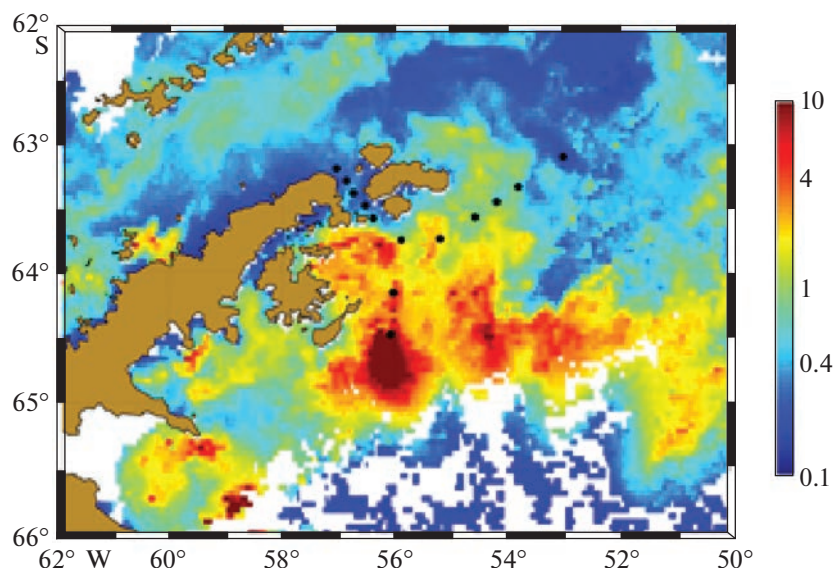


Рис. 8. Спутниковые оценки концентрации хлорофилла-а (красные и зеленые тона, мкг/л) по эмпирическому алгоритму OC4 с радиометров OLCI: композит за 17 января 2022 г. Ледовые поля показаны синим цветом южнее 65° ю.ш. Композит составлен П.А. Салюком.

весьма значительные скорости, превосходящие как скорости Антарктического прибрежного течения, так и скорости Антарктического склонового фронта.

Профиль скорости на крайней станции со стороны Южных Оркнейских островов (на шельфе, станция 7370) также несколько выделялся от окружающих станций (рис. 11). В слое нижних 300 м скорости не опускались ниже 15 см/с.

На представленных выше профилях скоростей можно отметить еще две выделяющиеся станции с интересными особенностями, а именно станции 7347 и 7348, расположенные на склоне. На профилях скоростей этих станций можно видеть увеличение скорости в придонном слое относительно всего остального профиля скорости (рис. 11). На станции 7347 в придонном слое скорости достигают 31 см/с, а на станции 7348 они немного меньше (24 см/с). Это может говорить о том, что опускание плотных вод все-таки происходит, но, по всей видимости, не столь интенсивно, как на разрезах от Антарктического полуострова до мыса Капп-Норвегия. Связать не столь интенсивное образование и стекание донных вод можно еще и со временем проведения работ. Ледообразование, которое является своего рода катализатором образования плотных вод, происходит в осенне-зимний период, а разрез в бассейне Пауэлла проводился уже в летний сезон.

Что касается фронта Уэдделла, известного по литературным данным, то он не наблюдается по данным LADCP. Возможно, это связано с тем,

что переходы между станциями на больших глубинах оказались слишком большими и получившееся разрешение не позволило обнаружить его.

По данным SADCP фронт Уэдделла также не обнаруживается. Распределение скоростей на выполненном разрезе в бассейне Пауэлла по данным судового профилографа течений представлено на рис. 12.

По данным SADCP так же, как и по данным LADCP, обнаруживаются течения на шельфе и склоне со стороны Антарктического полуострова. На склоне, как и на шельфе, скорости составляют 10–15 см/с.

В целом, картины распределения скоростей по данным обоих профилографов неплохо согласуются и тем самым подтверждают друг друга.

Растворенный кислород

Содержание растворенного кислорода на разрезе составляло от 4.75–7.95 мл/л (59–101% насыщения). Наибольшие изменения наблюдались в верхнем 200-м слое на шельфовых станциях разреза и в верхнем 50-м слое на глубоководных станциях. Максимальное содержание растворенного кислорода отмечено на подповерхностных горизонтах станций 7340 и 7342, минимальное — в толще воды 200–1000 м всех склоновых и глубоководных станций разреза от 7347 до 7369 (содержание растворенного кислорода здесь не достигало 5 мл/л) (рис. 13).

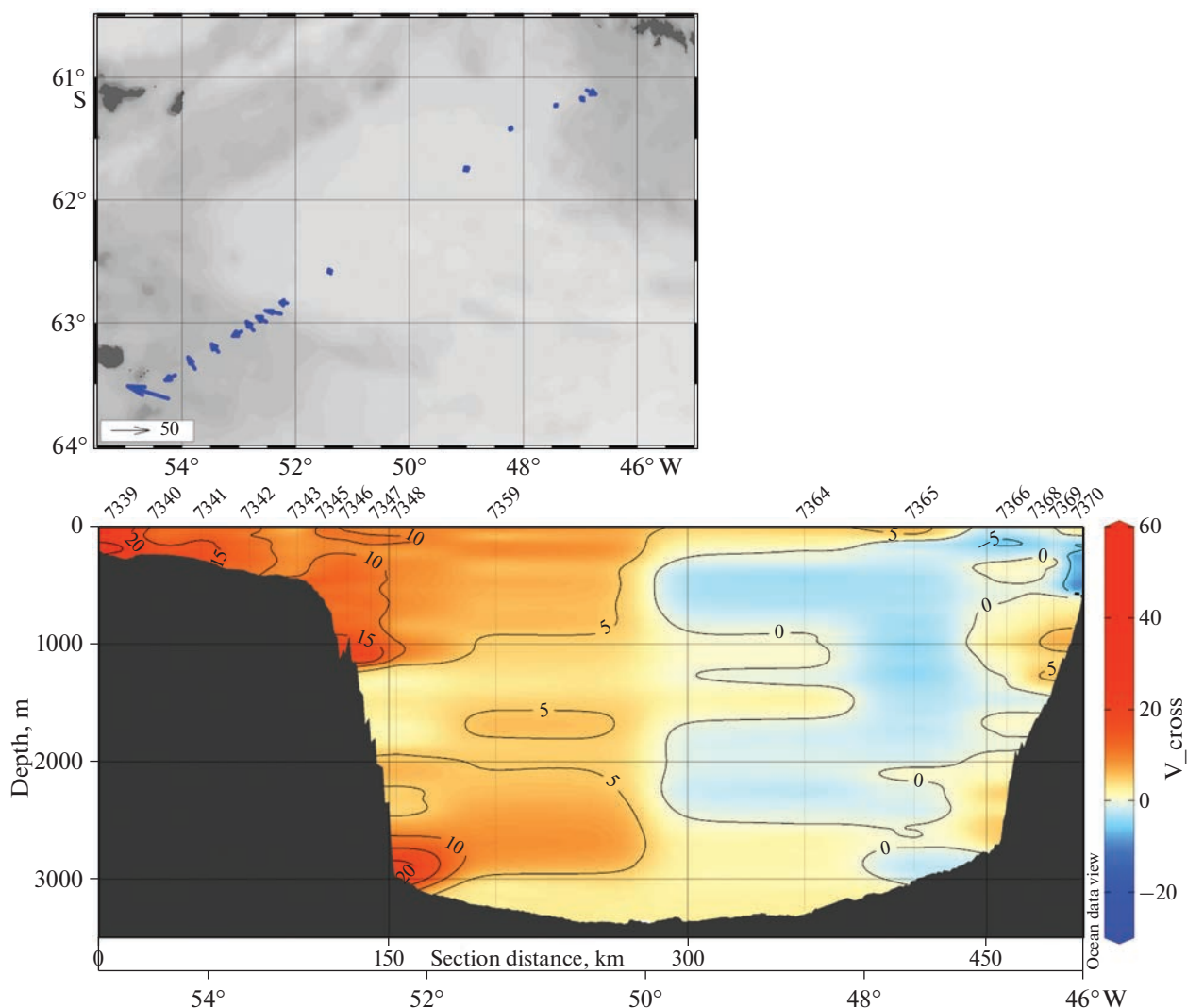


Рис. 9. Распределение величины скорости, спроецированной перпендикулярно разрезу, в бассейне Пауэлла в 2022 г. по данным LADCP. В верхней части рисунка на карте показаны осредненные вектора скоростей на станциях. Показан масштаб вектора скорости 50 см/с.

Растворенный кремний

Содержание растворенного кремния на разрезе составляло 53.58–117.74 μM . Минимальные значения наблюдались в верхних 50 м шельфовых станций 7342–7347 и 7366–7370. Максимальные значения растворенного кремния отмечены в слое вод 700–2500 м (106.53–117.73 μM) на глубоководных станциях 7359–7366 (рис. 14).

По гидрохимическим параметрам четко выделяются четыре слоя вод, отмеченных на разрезе в 2022 г.: Антарктическая поверхностная вода, Теплая глубинная вода, Глубинные воды и Донные воды моря Уэдделла (табл. 1).

Наибольшая изменчивость наблюдается в слое Антарктической поверхностной воды, она харак-

теризуется низкими значениями растворенного кремния (в среднем – 64.42 μM) и высокими – кислорода (в среднем – 7.32 мл/л при 91% насыщения). Стоит отметить, что толщина этого слоя заметно отличалась на шельфовых и глубоководных станциях: на шельфе АПВ занимала практически всю толщу вод от поверхности до дна и составляла около 200 м, на глубоководных станциях же была значительно тоньше – порядка 50 м, что является следствием циклонической циркуляции вод моря Уэдделла и поднятием Теплых глубинных вод. Слой ТГВ, расположенный под слоем АПВ, до горизонта в 1500 м характеризуется самым низким на разрезе содержанием растворенного кислорода (в среднем 5.04 мл/л при 62% насыщения) и более высоким, по сравнению с АПВ, –

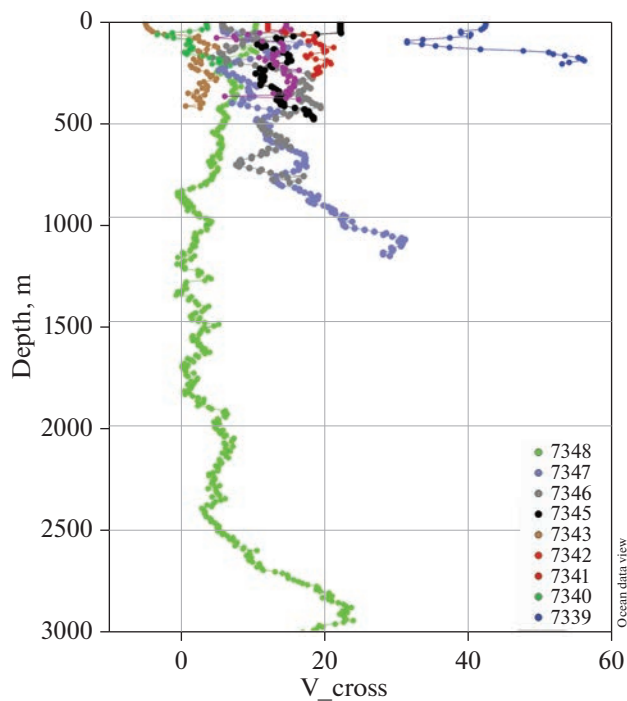


Рис. 10. Профили величины скорости течений, спроецированной перпендикулярно выполненному разрезу, на станциях разреза через бассейн Пауэлла. Показаны лишь профили для станций разреза, расположенных на шельфе и склоне Антарктического полуострова.

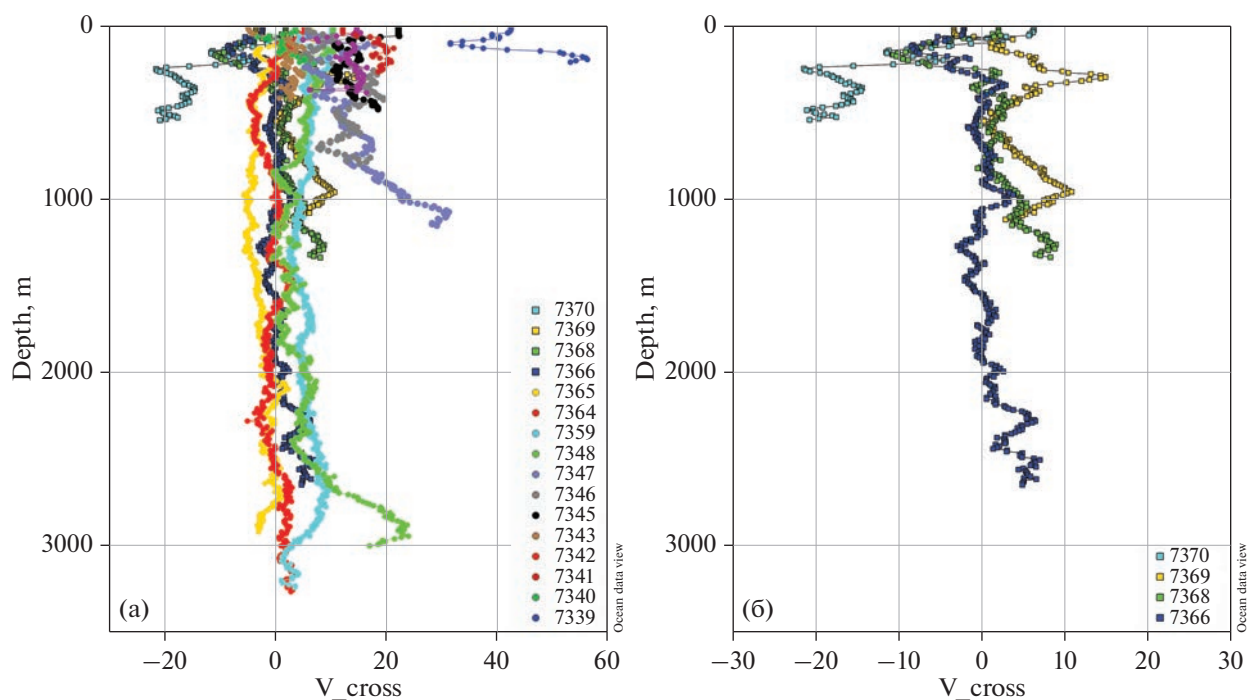


Рис. 11. Профили величины скорости, спроецированной перпендикулярно выполненному разрезу, на станциях разреза через бассейн Пауэлла. Слева (панель а) показаны профили для всех станций разреза, справа (панель б) — отдельно для крайних четырех станций со стороны Южных Оркнейских островов.

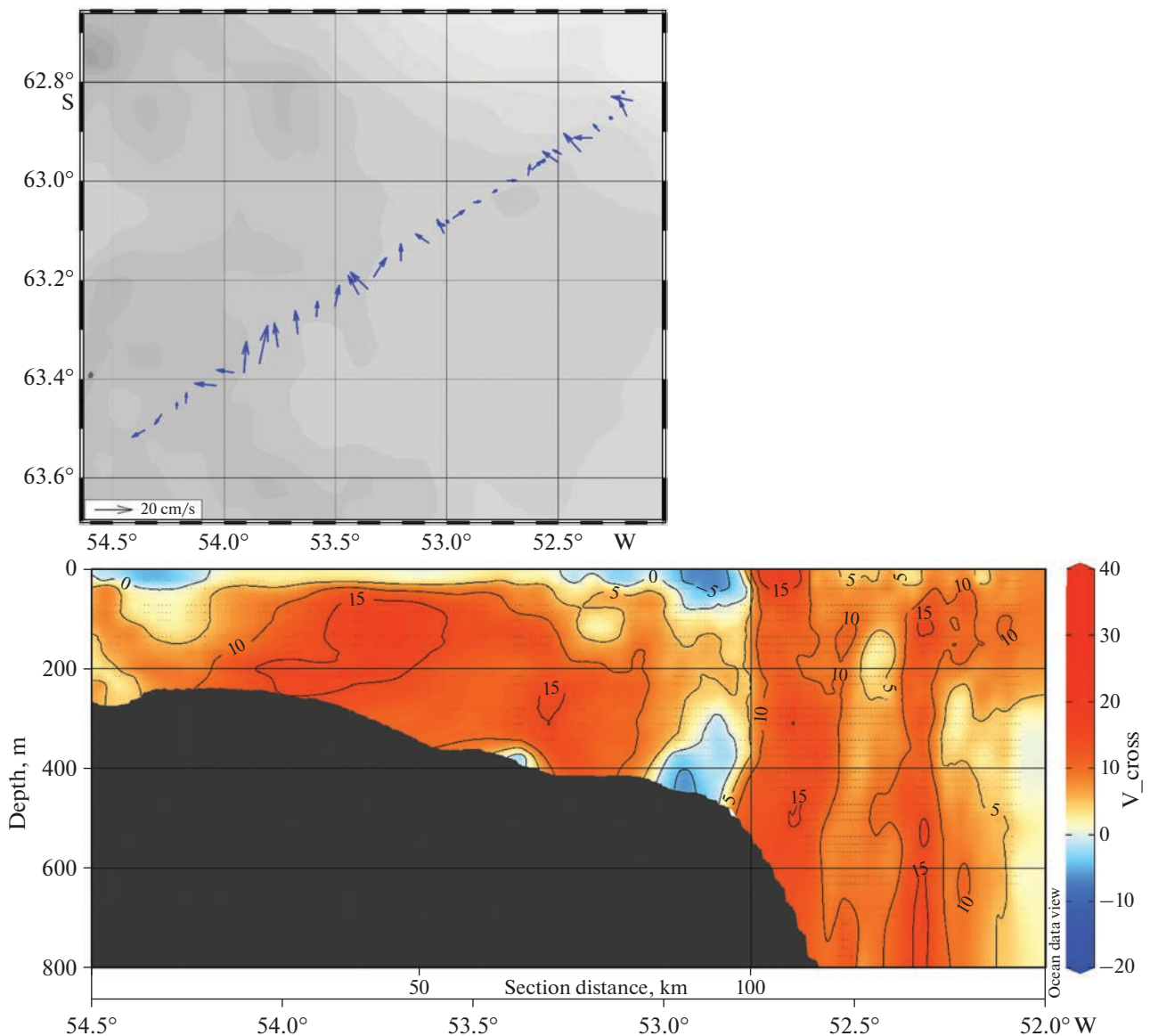


Рис. 12. Распределение величины скорости, спроецированной перпендикулярно выполненному разрезу, в бассейне Пауэлла в 2022 г. по данным SADCР. Показана только часть разреза от Антарктического полуострова. В верхней части рисунка на карте отмечены осредненные по всей водной толще направления скоростей. Показан масштаб вектора скорости 20 см/с.

растворенного кремния (в среднем — $102.19 \mu\text{M}$). Слой УГВ (1500–3000 м) отмечен наибольшими концентрациями растворенного кремния на разрезе — до $114.80 \mu\text{M}$ (в среднем — $105.73 \mu\text{M}$) и увеличением растворенного кислорода с 5.04 до 5.63 мл/л (при степени насыщения 69%). Ниже 3000 м, в слое УДВ, содержание растворенного кислорода увеличивается до 6 мл/л (степень насыщения — 73%), а кремния — снижается до $92.17 \mu\text{M}$.

ВЫВОДЫ

В целом гидрологическая структура вод в бассейне Пауэлла соответствовала имеющимся пред-

ставлениям. Но при этом значения температуры отличались от данных прошлых разрезов. Максимум потенциальной температуры слоя ТГВ составлял 0.51°C , при том, что предыдущие измерения показывали значения от 0.62 до 0.74°C .

На разрезе по температуре был обнаружен подповерхностный опресненный слой и линза холодной воды толщиной примерно 150 м в подповерхностном слое над склоном с минимумом температуры -1.69°C . Эта особенность не проявляется ни по солености, ни по кислороду.

На проведенном разрезе по данным STD не было обнаружено стекания вод с шельфа по конти-

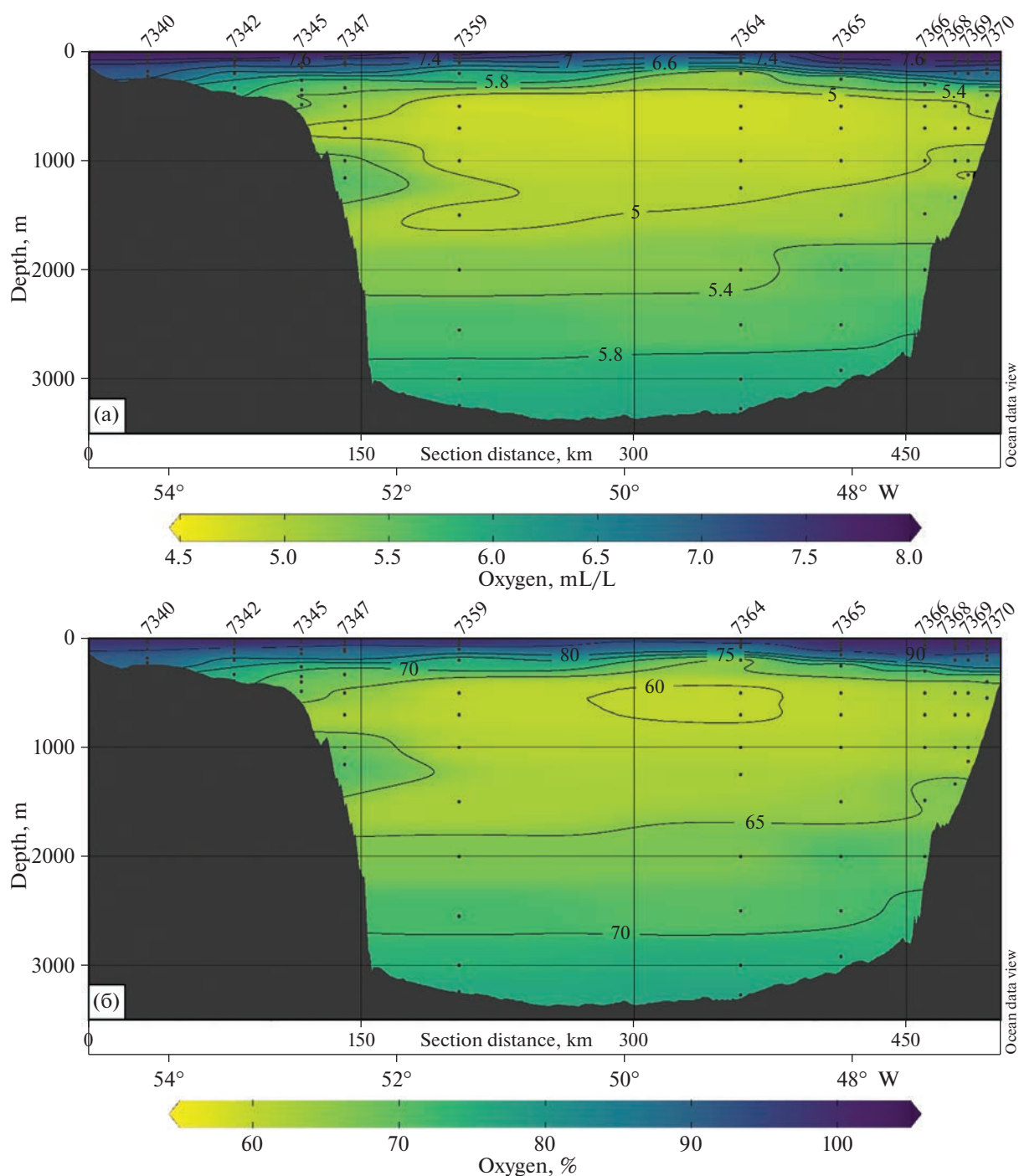


Рис. 13. Содержание растворенного кислорода (O_2 , мл/л) и степени насыщения кислородом (O_2 , %) на разрезе через море Уэдделла.

нентальному склону, но при этом на разрезах скоростей обнаруживаются повышенные скорости в придонном слое на склоне, что может говорить о том, что стекание вод все-таки происходит, но не столь интенсивно, как в осенне-зимний период (или, быть может, потому не столь интенсивно, что это уже пограничная территория, где еще форми-

руются донные воды). Отметим, что во время наших измерений в 2022 г. северная граница плавучих льдов сместилась на юг приблизительно на 100 км и температура поверхностных вод в юго-западной части бассейна Пауэлла была выше нормы.

Известные по литературным данным Антарктическое прибрежное течение и Антарктиче-

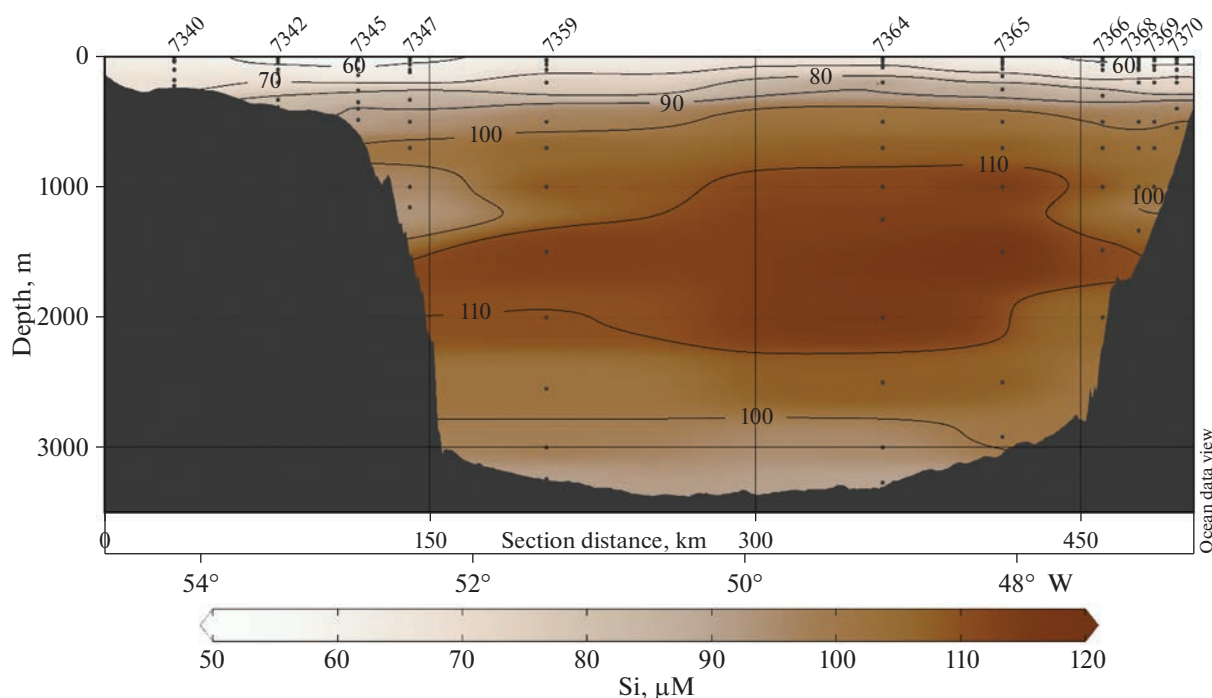


Рис. 14. Распределение растворенного кремния (Si, μM) на разрезе через море Уэдделла.

Таблица 1. Распределение гидрохимических параметров для водных масс моря Уэдделла

Водная масса		O_2 , мл/л	O_2 , %	Si, μM
АПВ	Среднее	7.32	91	64.42
	Ст. откл.	0.67	9.6	7.68
	Минимум	5.65	69	53.58
	Максимум	7.96	101	83.36
ТГВ	Среднее	5.04	62	102.19
	Ст. откл.	0.25	2.7	8.03
	Минимум	4.75	59	88.05
	Максимум	5.63	69	117.74
УГВ	Среднее	5.63	69	105.73
	Ст. откл.	0.20	2.2	5.03
	Минимум	5.30	66	98.45
	Максимум	5.91	72	114.80
УДВ	Среднее	6.00	73	92.17
	Ст. откл.	0.06	0.6	2.67
	Минимум	5.94	73	90.17
	Максимум	6.06	74	95.20

Примечание. O_2 , мл/л – растворенный кислород, O_2 , % – степень насыщения кислородом, Si – силикаты. АПВ – Антарктическая поверхностная вода, ТГВ – Теплая глубинная вода моря Уэдделла, УГВ – Глубинная вода моря Уэдделла, УДВ – Донная вода моря Уэдделла.

ский склоновый фронт наблюдались на шельфе и верхней части склона соответственно. Интенсивность обоих течений была одинакова, несмотря на то, что, согласно литературным данным, Антарктическое прибрежное течение должно быть менее интенсивным. Скорости в обоих течениях составляли 10–15 см/с как по данным погружного, так и по данным бортового профилографа течений.

Фронт Уэдделла, также известный по литературным данным по повышенным скоростям течений, не удалось обнаружить ни по данным погружного, ни по данным судового профилографа течений. Можно предположить, что в районе наших работ он сливается со склоновым течением.

Распределение гидрохимических параметров хорошо отражает термохалинную структуру вод. По распределению растворенного кислорода и кремния, как и по распределению температуры и солености четко выделяются границы водных масс, присутствующих на разрезе. Данные, полученные нами в ходе экспедиции в феврале 2022 года, согласуются с литературными [1, 2, 3, 15, 31].

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания № FMWE-2021-0002 (сбор и обработка натурных данных) и при поддержке гранта РНФ 21-77-20004 (анализ данных измерений и баз данных и интерпретация).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанова Н.В. Гидрохимические показатели фронтальных зон в Южной Атлантике // Изд-во ВНИРО. 1990. Т. 2. С. 12–20.
2. Артамонова К.В., Гангнус И.А., Масленников В.В., Торгунова Н.И. Гидрохимические исследования в водах Антарктики в 59-й Российской Антарктической экспедиции // Океанология. 2015. Т. 55. № 5. С. 866–866.
3. Батрак (Артамонова) К.В. Гидрохимическая характеристика различных модификаций антарктических вод // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 349–356.
4. Клепиков В.В. Гидрология моря Уэдделла // Труды Сов. Антарктической Экспедиции 1963. Т. 17. С. 45–93.
5. Морозов Е.Г., Спиридонов В.А., Молодцова Т.Н. и др. Исследования экосистемы атлантического сектора Антарктики (79-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 823–825. <https://doi.org/10.31857/S0030157420050172>
6. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М. и др. Гидрофизические и экосистемные исследования в атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 825–827. <https://doi.org/10.31857/S003015742205015X>
7. Морозов Е.Г., Фрей Д.И., Тараканов Р.Ю. Поток Антарктической донной воды через восточную часть прохода Филипп в море Уэдделла // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 680–684.
8. Современные методы гидрохимических исследований океана. Бордовский О.К., Иваненков В.Н. (ред.). М.: ИОАН СССР, 1992. 198 с.
9. Спиридонов В.А., Залота А.К., Яковенко В.А., Горбатенко К.М. Состав популяции и транспорт молоди антарктического криля в районе бассейна Пауэлла (северо-западная часть моря Уэдделла) в январе 2020 г. // Труды ВНИРО. 2020. Т. 181. С. 33–51.
10. Boyer T.P., Baranova O.K., Coleman C. et al. World Ocean Database 2018. A.V. Mishonov, Technical Editor. NOAA Atlas NESDIS 87.
11. Carmack E.C., Foster T.D. On the flow of water out of the Weddell Sea // Deep-Sea Research. 1975. V. 22. P. 711–724.
12. Carpenter J.H. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method // Limnol. Oceanogr. 1965. V. 10. P. 141–143.
13. Deacon G.E.R. The Weddell gyre // Deep Sea Res. Part I. 1979. V. 26 (9). P. 981–995.
14. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. V. 19. № 2. P. 183–204.
15. Fedotova A.A., Stepanova S.V. Water mass transformation in the Powell Basin // In: “Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean, Advances in Polar Ecology”, E.G. Morozov et al. (eds.). https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_11. ISBN 978-3-030-78927-5
16. Frey D.I., Krechik V.A., Morozov E.G. et al. Water exchange between deep basins of the Bransfield Strait // Water 2022. V. 14. P. 3193. <https://doi.org/10.3390/w14203193>
17. Gill A.E. Circulation and bottom water formation in the Weddell Sea // Deep-Sea Research. 1973. V. 20. P. 111–140.
18. Gordon A.L., Visbeck M., Huber B. Export of Weddell Sea deep and bottom water // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № C5. P. 9005–9018.
19. Heywood K.J., Garabato A.C.N., Stevens D.P., Muench R.D. On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. C06021. <https://doi.org/10.1029/2003JC002053>
20. Izhitskiy A., Romanova N., Vorobieva O., Frey D. Impact of ice melting on oceanographic and hydrobiological characteristics of surface waters in the Powell Basin, Weddell Sea, in January–February 2020 // Oceanology. 2022. V. 62. P. 439–446.
21. Klatt O., Fahrbach E., Hoppema M., Rohardt G. The transport of the Weddell Gyre across the Prime Meridian // Deep-Sea Res. Part II. 2005. V. 52 (3–4). P. 513–528.
22. Meijers A.J.S., Meredith M.P., Abrahamsen E.P. et al. Wind driven export of Weddell Sea slope water // J. Geophys. Res. Oceans. 2016. V. 121. P. 7530–7546. <https://doi.org/10.1002/2016JC011757>
23. Morozov E.G., Frey D.I., Krechik V.A. et al. Water masses, currents, and phytoplankton in the Bransfield Strait in January 2020 // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean, Advances in Polar Ecology. Springer, 2021. V. 6. P. 55–64. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_4
24. Morozov E.G., Frey D.I., Zuev O.A. et al. Hydraulically controlled bottom flow in the Orkney Passage // Water MDPI. 2022. V. 14 (19). P. 3088. Doi: <https://doi.org/10.3390/w14193088>
25. Orsi A.H., Nowlin W.D., Whitworth T. III. On the circulation and stratification of the Weddell Gyre // Deep-Sea Research, Part I. 1993. V. 40. P. 169–203.
26. Orsi A.H., Smethie W.M., Bullister J.L. On the total input of Antarctic Waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements // J. Geophys. Res. 2002. 107(C8). 3122. <https://doi.org/10.1029/2001JC000976>
27. Padman L., Erofeeva S.Y., Fricker H.A. Improving Antarctic tide models by assimilation of ICESat laser altimetry over ice shelves // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L22504. <https://doi.org/10.1029/2008GL035592>
28. Schlitzer R. Data analysis and visualization with Ocean Data View // CMOS Bulletin SCMO. 2015. V. 43. № 1. P. 9–13.

29. Schröder M., Hellmer H.H., Absy J.M. On the near-bottom variability in the northwestern Weddell Sea // *Deep-Sea Res. Part II*. 2002. V. 49. P. 4767–4790.
30. Schodlok M., Hellmer H., Beckmann A. On the transport, variability and origin of dense water masses crossing the South Scotia Ridge // *Deep-Sea Res. Part II*. 2002. V. 49. P. 4807–4825.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00160-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00160-1)
31. Stepanova S.V., Polukhin A.A., Borisenko G.V. et al. Hydrochemical structure of waters in the Northern Weddell Sea in Austral Summer 2020 // In: “Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean, Advances in Polar Ecology”, E.G. Morozov et al. (eds.), Springer, 2021. V. 6. P. 159–174.
32. Thompson F., Heywood K. Frontal structure and transport in the northwestern Weddell Sea // *Deep-Sea Research Part I*. 2008. V. 55. P. 1229–1251.
33. Wang Q., Danilov S., Fahrbach E. et al. On the impact of wind forcing on the seasonal variability of Weddell Sea Bottom Water transport // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L06603.
<https://doi.org/10.1029/2012GL051198>
34. Youngs M.K., Thompson A.F., Flexas M.M., Heywood K.G. Weddell Sea export pathways from surface drifters // *J. Phys. Oceanogr.* 2015. V. 45 (4). P. 1068–1085.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0103.1>

Hydrological Structure and Water Dynamics in the Powell Basin in January–February 2022

R. Z. Mukhametianov^{a, d}, A. M. Seliverstova^a, E. G. Morozov^{a, b, d, #},
D. I. Frey^{a, b, d}, V. A. Krechik^{a, c}, O. A. Zuev^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

^c*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

^d*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

[#]*e-mail: egmorozov@mail.ru*

In January–February 2022, a CTD/LADCP section across the Powell Basin in the Weddell Sea with hydrochemical observations was carried out in the Antarctic expedition of the R/V “*Akademik Mstislav Keldysh*”. Transect was located from the Antarctic Peninsula to the South Orkney Islands; thus, it crossed the Weddell Gyre in its northwestern part. As a result, we collected new data about hydrological structure and water dynamics in this area. In this study, we present new results on the data analysis related to the structure of the Weddell Gyre, Antarctic Bottom Water formation, as well as variability of hydrophysical and hydrochemical characteristics of waters in the Powell Basin. Only two of the three currents, Antarctic Coastal Current and Antarctic Slope Front, were identified in the structure of the Weddell Gyre. Velocities of these currents were about 10–15 cm/s. The structure of waters was typical for the Weddell Sea, but a change in the temperature maximum was recorded in the layer of Warm Deep Water.

Keywords: Powell Basin, water masses, CTD/LADCP section, oxygen, silicates