

УДК 551.465

СТРУКТУРА СТРУЙ И ФРОНТОВ К ЮГУ ОТ АФРИКИ ПО ДАННЫМ РАЗРЕЗА SR02 В ДЕКАБРЕ 2009 г.

© 2014 г. Р. Ю. Тараканов, А. М. Гриценко

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

e-mail: rtarakanov@gmail.com

Поступила в редакцию 24.12.2012 г.

Исследуется структура фронтов в районе к югу от Африки на основе STD- и SADCР-измерений на гидрофизическом разрезе SR02, выполненном на НИС “Академик Иоффе” в декабре 2009 г. от мыса Доброй Надежды до 57° ю.ш. на нулевом меридиане. На разрезе были выделены одиннадцать струй в зоне Антарктического циркумполярного течения (АЦТ). В их числе – шесть струй Субантарктического течения (САТ), три струи Южного полярного течения (ЮПТ) и две струи Южного антарктического течения (ЮАТ). Кроме того, была выделена струя, объединяющая фронт Уэдделла и Южную границу АЦТ. При этом по данным прямых измерений скорости все струи ЮПТ были слиты в единую “суперструю”, а остальные струи выделялись локальными максимумами скорости в поверхностном слое океана. Воды Субтропической зоны на линии разреза, от Южного субтропического фронта до Шельфово-склонового фронта у берега Африки, были представлены почти полностью водами Индийского океана (Агульясского меандра), лишь модифицированными смещением с менее солеными водами юго-восточной периферии субтропической Атлантики.

DOI: 10.7868/S0030157414030137

1. ВВЕДЕНИЕ

Южные оконечности Австралии, Южной Америки и Африки образуют вместе с Антарктидой ряд последовательных континентальных ворот, обеспечивающих водообмен между Индийским, Тихим и Атлантическим океанами. Отличительной особенностью района к югу от Африки является наличие, помимо восточно-направленного Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), крупномасштабных циркуляционных систем на обеих перифериях этого течения – приполярного циклонического круговорота Уэдделла и смыкающихся друг с другом субтропических антициклонических круговоротов Атлантического и Индийского океана.

Антарктическое циркумполярное течение представляет собой наиболее мощное течение не только в Южном, но и во всем Мировом океане. АЦТ, проникающее практически до дна и опоясывающее с запада на восток антарктический континент, состоит из отдельных струй (динамических фронтов), с которыми совпадают наиболее резкие градиенты температуры, солености и плотности, а также, как правило, гидрохимических свойств воды [1, 22]. В связи с этим, распределения указанных свойств на меридиональных разрезах, пересекающих зону западных ветров в умеренных широтах Южного полушария, характеризуются ступенчатым подъемом изолиний с севера на юг, особенно сильным на фронтах. Помимо динамического

фронта, в океанографических исследованиях часто используется понятие гидрологического фронта – линии, разделяющей вертикальные структуры водных масс. Следует отметить, что динамические и гидрологические фронты могут не совпадать. В дальнейшем термин “фронт” будет использоваться в отношении именно гидрологических фронтов, и “струя” или “течение” – в отношении динамических фронтов.

Долгое время в зоне АЦТ было принято выделять всего две струи и связанных с ними фронтов – Субантарктический фронт (САФ) и Полярный фронт (ПФ), располагающийся к югу от САФ. Зону к северу от САФ называют Субантарктической зоной (САЗ), зону между ПФ и САФ – Южной полярной фронтальной зоной (ЮПФЗ), а зону к югу от ПФ вплоть до Склонового антарктического фронта, отделяющего воды открытого океана от несколько более однородных вод антарктического шельфа – Антарктической зоной (ААЗ). Впервые на существование дополнительных слабых струй в АЦТ южнее ПФ было указано Бурковым [1] на основе анализа данных гидрологических измерений. Независимо от Буркова, Орси и др. [22], также на основе данных гидрологии, показали, что внутри ААЗ располагается третья, слабая струя АЦТ, которую они назвали Южным фронтом АЦТ (ЮФАЦТ). Кроме того, эти авторы выделили Южную границу АЦТ (ЮГАЦТ), связав ее с южным пределом распространения под-

поверхностной Верхней циркумполярной глубинной воды. Отметим, что ЮФАЦТ не принято связывать с каким-либо гидрологическим фронтом, т.е. он является сугубо динамическим фронтом, в то время как ЮГАЦТ определяется именно как гидрологический фронт. На сегодняшний день трехструйная классификация АЦТ, предложенная Орси и др. [22], считается классической. Соглашаясь с терминологией, предложенной в работе [2], ЮФАЦТ и динамические фронты, связанные с ПФ и САФ, будем называть соответственно Южным антарктическим (ЮАТ), Южным полярным (ЮПТ) и Субантарктическим (САТ) течениями.

На протяжении 1990–2000-х гг. в целом ряде работ (например, [15, 17, 20, 21, 25, 26]) указывалось, что в зоне АЦТ отмечается большее количество струй, чем это предполагается описанной выше классической классификацией [22]. Анализируя фронтальную структуру Южного океана на основе данных спутниковой альтиметрии, данных трансокеанских гидрологических разрезов, климатологии WOCE и данных поплавков Argo, Соколов и Ринтол [29–32] предложили более сложную, девятиструйную классификацию АЦТ. Они выделили по три струи, соответствующие (в нашей терминологии) САТ и ЮПТ, и две ЮАТ, а также рассмотрели ЮГАЦТ в качестве самостоятельной струи. Отметим, что классические ПФ и САФ соответствуют северной струе ЮПТ и средней струе САТ. Многоструйность АЦТ особенно хорошо выражена в тех районах, где течение расширяется, проходя через обширные глубокие котловины [29, 31]. В районах сужения АЦТ, например, в проливе Дрейка или при пересечении подводных хребтов, струи сливаются, образуя несколько “суперструй”.

В атлантическом секторе Южного океана на южной периферии АЦТ выделяются фронты Скотия и Уэдделла. Фронт Скотия ограничивает с юга АЦТ, т.е. тождествен ЮГАЦТ, а фронт Уэдделла связывается с северной периферией круговорота Уэдделла [23]. Зона между ними соответствует ядру экстремально холодных и распресненных вод пролива Брансфилд, распространяющихся на восток от оконечности Антарктического п-ова [23]. Однако уже непосредственно к востоку от Южных Сандвичевых о-вов эта зона теряет свои характерные экстремальные характеристики [19]. В районе нулевого меридиана указанные фронты не разрешаются отдельными “ступенями” гидрофизических свойств даже на современных меридиональных разрезах с достаточно частой сеткой станций [19].

К числу главных фронтов Южного океана, помимо фронтов АЦТ, можно также в известной степени относить Субтропический фронт (СТФ), который представляет собой границу между зонами распространения в поверхностном слое теп-

лых, соленых вод Субтропической зоны (СТЗ) с севера и распресненных и более холодных вод САЗ с юга. Определяемый таким образом СТФ является гидрологическим фронтом. На основе анализа гидрологических данных в работе [8] было показано, что переход между водами САЗ и СТЗ на большей части протяженности СТФ осуществляется, по меньшей мере, в две ступени. Основываясь на этом, в указанной работе были выделены и картированы Южный (ЮСТФ) и Северный (ССТФ) субтропические фронты, причем в районе к югу от Африки был выделен только ЮСТФ.

Из-за низкоширотного расположения южной оконечности Африки (м. Игольный, рис. 1), Южно-Атлантический и Южно-Индийский субтропические круговороты практически смыкаются. Причем, в силу западной интенсификации течений, Южно-Индийский круговорот образует вытянутый на запад в Атлантический океан “длинный меандр” (Agulhas Retroflexion), состоящий из направленных на запад Агульясского течения (АТ) (течения м. Игольный) и на восток – Агульясского возвратного течения [10, 28]. Этот меандр генерирует антициклонические вихри, которые дрейфуют в Атлантический океан в генеральном северо-западном направлении [9, 27] и прослеживаются примерно до 10° – 15° з.д. [16]. Помимо антициклонических, формируются также и циклонические вихри АТ, в частности, на западном склоне банки Агульяс (рис. 1), а также в процессе разделения антициклонов АТ [9, 27]. Эти вихри дрейфуют в основном в юго-западном направлении, хотя могут и перемещаться в северо-западном направлении вместе с антициклонами, особенно те, которые оказываются в районе к северу от м. Доброй Надежды (рис. 1) [9, 27]. С АТ связывается Агульясский фронт (АФ), отделяющий более теплые соленые воды юго-западной периферии Южно-Индийского субтропического круговорота от более холодных и распресненных вод юго-восточной периферии Южно-Атлантического круговорота.

Восточную периферию Атлантического субтропического круговорота вдоль материкового склона Африки образует Бенгельское течение, формирующееся из субтропических вод Атлантики, агульясских и субантарктических вод [12]. Над юго-западным материковым склоном Африки выделяют Шельфово-склоновый фронт (ШСФ) [7], отделяющий прибрежную зону от области смешения вод двух субтропических круговоротов. Воды прибрежной зоны представляют собой апвеллинговые воды, модифицированные за счет прогрева, превышения осадков над испарением и речного стока (например, [11]).

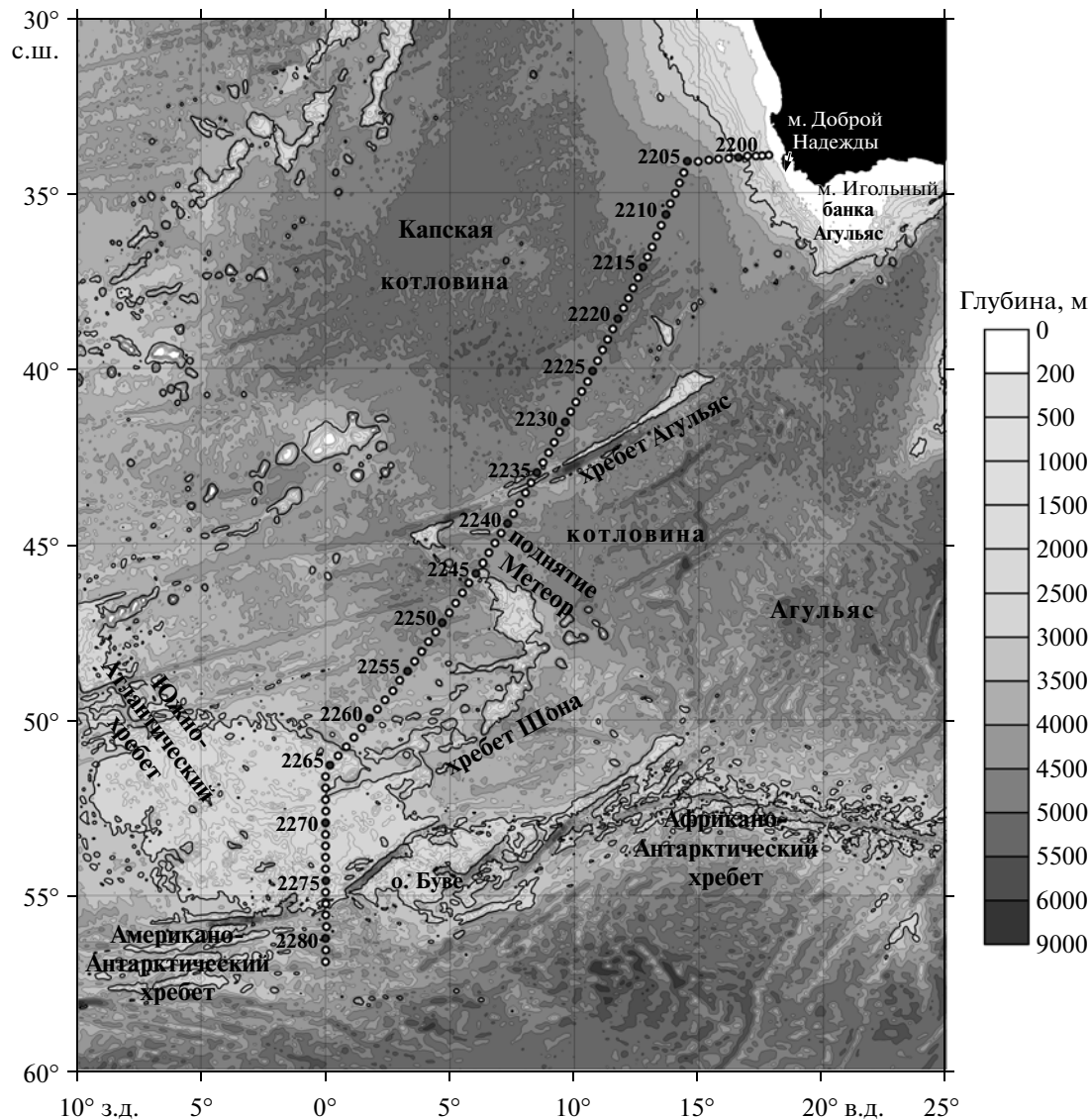


Рис. 1. Рельеф дна океана в районе к югу от Африки. Жирной линией показана изобата 3000 м. Кружками отмечено положение станций. Номера приведены для станций, обозначенных темными кружками.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ДАННЫЕ

Изогипсы (изолинии Абсолютной динамической топографии, АДТ) на поверхности океана по своей сути являются линиями тока геострофических течений поверхностной интенсификации. При этом сгущение изогипс, очевидно, показывает положение отдельных струй крупномасштабных океанских течений, чему в силу их преимущественно геострофической природы должен соответствовать увеличенный наклон изоповерхностей в толще океана. Это обстоятельство делает возможным исследование структуры океанских течений на основе данных прямого зондирования океана в комбинации с данными спутниковых альтиметрических наблюдений.

Настоящая статья является первой в цикле из двух статей, посвященных анализу структуры фронтов и струй в районе к югу от Африки по данным гидрофизического разреза SR02 (номенклатура WOCE; рис. 1), выполненного Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН 1–22 декабря 2009 г. на НИС “Академик Иоффе” в развитие экспедиционных работ 2004 [13], 2005 и 2006 гг., а также по спутниковым данным по АДТ (DT-Global-MADT-Upd product) французского агентства CLS (Collecte Localisation Satellites), публикуемым на сайте <http://avis.oceanobs.com>. Пример карты такой АДТ (далее АДТ-AVISO) на 11 декабря 2009 г. – дату, среднюю за период выполнения разреза, приведен на рис. 2. Цикл статей является продолжением исследования [4] с

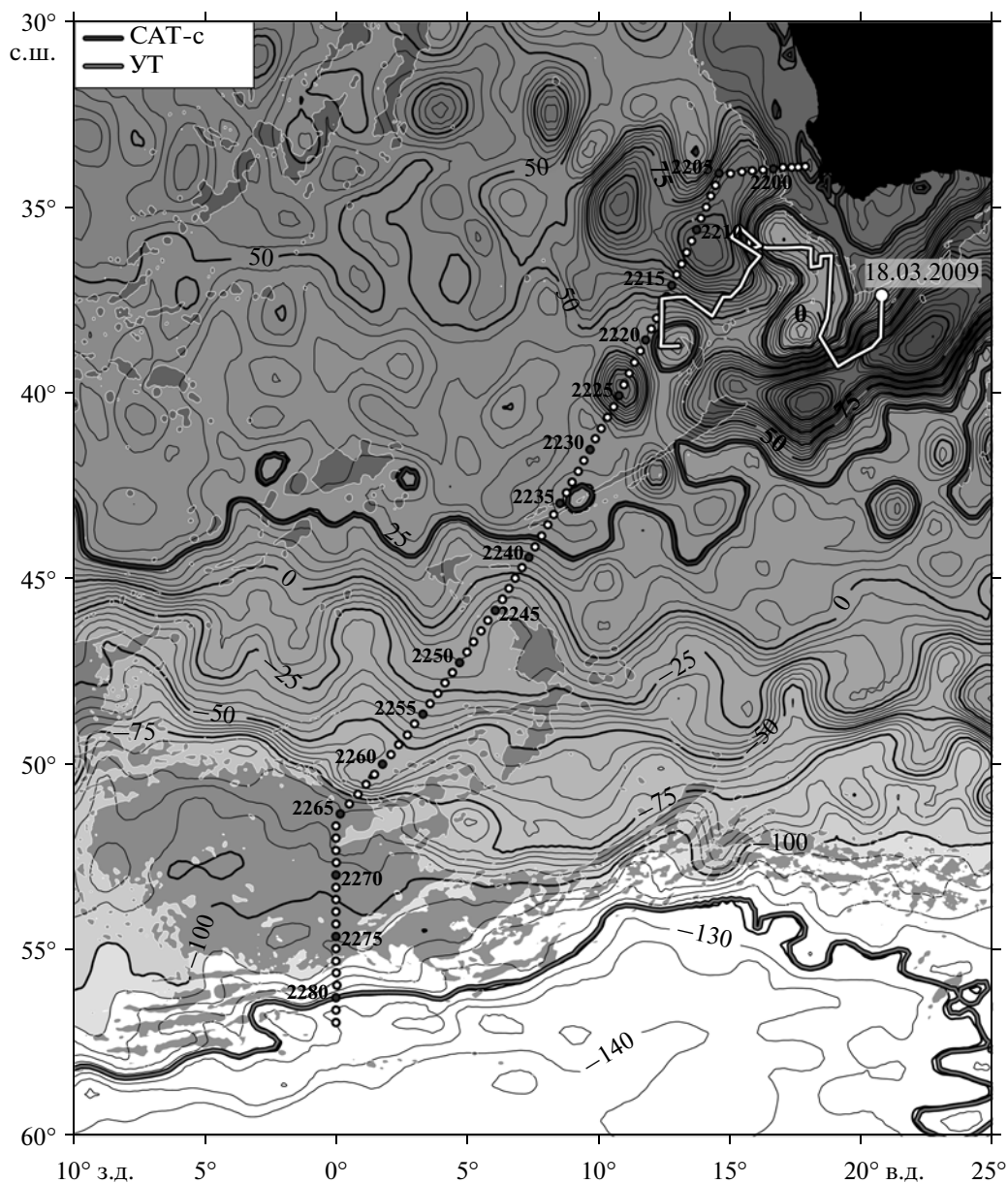


Рис. 2. Карта АДТ-AVISO, ζ (см) (DT-Global-MADT-Upd product) для района к югу от Африки на 11.12.2009 г. Затенены области с глубинами менее 3000 м. Показаны дата зарождения и траектория движения циклонического вихря, сформировавшегося на южном склоне банки Агульяс и наблюдавшегося на линии разреза. Жирными линиями выделены изогипсы, соответствующие ядрам северной струи Субантарктического течения и струи, объединяющей фронт Уэдделла и Южную границу АЦТ (по результатам работы [5]). Остальное – см. рис. 1.

привлечением дополнительных данных. В настоящей работе основное внимание уделяется анализу данных измерений, выполненных с борта судна, а в работе [5] исследуется структура струй АЦТ в районе к югу от Африки на основе 19-ти летней серии еженедельных спутниковых альтиметрических данных по АДТ-AVISO.

Разрез SR02 в 2009 г. состоял из трех участков. Первый, квазизональный участок начинался на африканском склоне в районе м. Доброй Надежды (рис. 1). Второй участок был ориентирован на

юго-запад. Третий участок, проходивший по нулевому меридиану, пересекал Африкано-Антарктический хребет и заканчивался уже на северной периферии круговорота Уэдделла (рис. 1). Расстояние между станциями разреза в открытом океане составляло 20 морских миль с небольшим учащением станций на африканском склоне. Всего было выполнено 87 станций. На каждой станции осуществлялось зондирование океана до дна STD (электропроводность-температура-глубина) – зондом SeaBird-911+. На станциях и на переходах

между ними выполнялись измерения температуры и электропроводности в поверхностном слое с помощью проточной системы, вмонтированной в днище судна и оборудованной CTD-зондом SBE-21, а также проводились измерения скорости течений судовым доплеровским акустическим профилографом течений (SADCP, TRDI Ocean Surveyor, 38 kHz). CTD-данные обрабатывались стандартной программой SBE Data Processing, version 7.18, данные SADCP – с помощью системы обработки CODAS, дающей на выходе, в качестве одного из вариантов представления результатов, профили скорости, осредненные за пятнадцатиминутные интервалы, с десятиметровой дискретностью по глубине в слое от 50 до 850 м.

После первичной обработки SADCP-данные сглаживались по вертикали с целью подавления мелкомасштабного шума скользящим косинус-фильтром (фильтром Тьюки) с базой 200 м, а затем усреднялись отдельно за время выполнения станций и за время переходов. На рис. 3 представлены полученные таким образом векторы горизонтальной скорости течения на горизонте 150 м для трех перекрывающих друг друга участков разреза. На рис. 3 показаны также фрагменты синоптических карт АДТ-AVISO на даты, средние за период выполнения каждого из участков. Данные проточной системы верифицировались CTD-данными на глубине 3 м, получаемыми при подъеме зондирующего комплекса (указанная глубина соответствует расположению ниже ватерлинии входного отверстия проточной системы). В результате было выявлено систематическое занижение солености зондом SBE-21 на 0.023 епс. Уже скорректированные данные проточной системы были затем сглажены встроенным в пакет обработки SBE Data Processing косинус-фильтром с базой 20 минут. При максимальной скорости судна на переходе между станциями в 10 узлов этот временной интервал соответствует примерно 3.3 милям. Полученные таким образом распределения температуры T , солености S и потенциальной плотности σ_θ вдоль разреза SR02 показаны на рис. 4. Данные CTD-зондирования на станциях сглаживались по глубине фильтром Тьюки с базой 40 м. Распределения потенциальной температуры θ ($^\circ\text{C}$), солености S (епс), нейтральной плотности γ^n [18] и нормальной к разрезу составляющей скорости течения U_n по данным измерений SADCP на разрезе в верхнем 1500-метровом слое океана приведены на рис. 5а–5г.

3. СПОСОБЫ ВЫДЕЛЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУЙ И ФРОНТОВ

На сегодняшний день наиболее полный обзор критериев идентификации фронтов Южного океана, в их классической классификации, включающей фронт Скотия, ПФ, САФ, Южный и Север-

Критерии определения положения фронтов АЦТ. См. также рис. 5а

Струи АЦТ	Критерий определения	По данным Argo, $^\circ\text{C}$ [31]	Наст. работа, $^\circ\text{C}$
CAT-с	θ на $p = 400$ дб	6.06 ± 0.79	4.40–5.20
CAT-5	θ на $p = 400$ дб		
CAT-сп	θ на $p = 400$ дб	4.06 ± 0.35	3.10–3.23
CAT-3	θ на $p = 400$ дб		
CAT-ю	θ на $p = 400$ дб	2.78 ± 0.15	2.52–2.68
CAT-1	θ на $p = 400$ дб		
ЮПТ-с	θ на $p = 200$ дб	1.98 ± 0.14	2.25 \pm 0.07
ЮПТ-сп	θ в подповерхностном θ_{\max}		
ЮПТ-ю	θ в подповерхностном θ_{\max}	2.11 ± 0.09	1.93 \pm 0.16
ЮАТ-с	θ в подповерхностном θ_{\max}		
ЮАТ-ю	θ в подповерхностном θ_{\max}	1.59 ± 0.28	

ный СТФ, АФ, представлен в работе [8]. По мере развития представлений о многоструйности АЦТ, для вновь выделяемых струй и фронтов стали появляться, соответственно, и дополнительные методы и способы их определения. В частности, в работе [22] были выделены ЮФАЦТ и ЮГАЦТ и предложены методы их идентификации. В работе [31] для струй АЦТ были сформулированы несколько групп температурных критериев, которые были получены с использованием статистического анализа климатического массива WOCE [14] и базы данных поплавок Argo. При этом анализ был выполнен по отдельности для каждого из массивов данных. Для южных струй АЦТ, основываясь на особенностях вертикального распределения температуры к югу от ПФ, авторами указанной работы были предложены критерии идентификации, связывающие струи с пределом распространения какой-либо конкретной изотермы в слоях подповерхностного минимума или максимума температуры. В настоящей работе используется группа критериев, которая основывается (для струй к югу от ПФ) на свойствах подповерхностного максимума температуры и получена по результатам анализа массива Argo (таблица). Такой выбор обусловлен выводами работы [3], в которой было показано, что, во-первых, критерии на основе свойств подповерхностного минимума температуры не могут быть получены целиком для всего циркумполярного круга, из-за сильной зависимости свойств зимнего поверхностного слоя от локальных условий формирования этого минимума, а, во-вторых, база данных Argo по отношению к массиву WOCE отража-

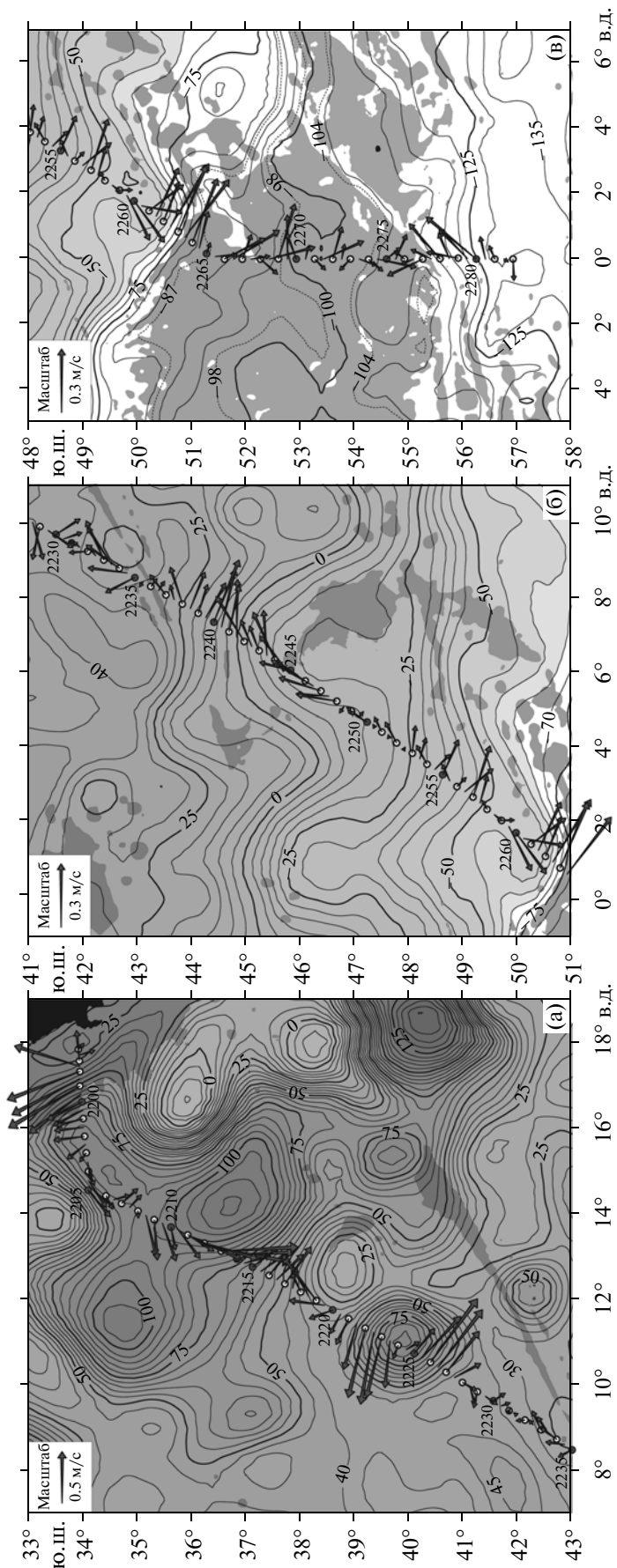


Рис. 3. АДТ-AVISO, ζ (DT-Global-MADT-Prd product) и векторы скорости течений на глубине 150 м по данным измерений SADCР на трех участках разреза: (а) – северный участок и карта на 05.12.2009 г., (б) – средний участок и карта на 14.12.2009 г. и (в) – южный участок и карта на 19.12.2009 г. Остальное – см. рис. 1 и 2.

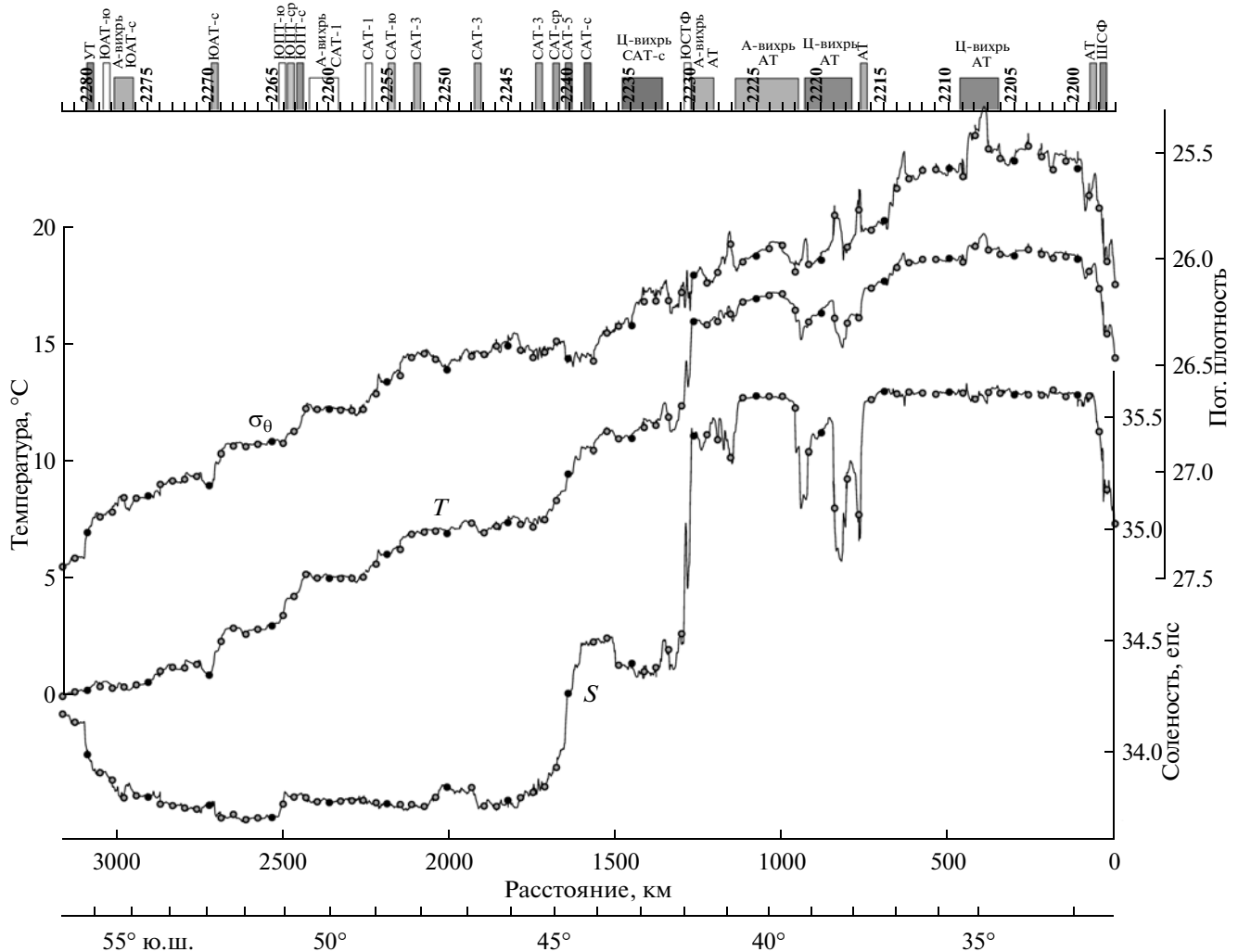


Рис. 4. Температура, соленость и условная потенциальная плотность вдоль разреза SR02 (01–22.12.2009 г.) по данным проточной системы. Кружки показывают значения этих величин в точках станций. Темные кружки соответствуют нумерованным на верхней оси станциям. Засечки с аббревиатурами на верхней шкале отмечают положение фронтов и осей течений, а также выделяемых вихрей. Расшифровку аббревиатур см. в тексте.

ет температурный тренд к потеплению (примерно на 0.1°C) в слое максимума температуры в зоне каждой из южных струй АЦТ, имевший место, по крайней мере, с середины 1990-х до середины 2000-х гг. Напомним, что исследуемый разрез был выполнен в 2009 г., проект Argo получил развитие в середине 2000-х гг., а полевая фаза программы WOCE закончилась в первой половине 1990-х гг. Критерии идентификации фронтов на разрезе SR02 в зоне к северу от АЦТ будут указаны по ходу дальнейшего изложения.

Для идентификации отдельных струй течений на разрезе SR02, в дополнение к приведенным в таблице температурным критериям для зоны АЦТ, использовался также и анализ θ, S -кривых верхнего 500–800-метрового слоя океана (рис. 6). На рис. 6 слева приведены θ, S -кривые для трех участков разреза, сгруппированные по сходству формы в верх-

нем слое океана. Каждая группа показана в своем оттенке серого. Расположение соответствующих станций приведено на рис. 6 справа кружками в тех же оттенках. Кроме того, схематично показаны отдельные элементы структуры течений в районе разреза – фронты, оси струй и вихри.

Существенным моментом для выделения струй течений в настоящей работе является использование данных прямых измерений скорости течений с помощью SADCР, причем не только на станциях, но и на переходах между ними. Это позволило, во-первых, выделить струи, ориентированные под острым углом к направлению разреза, и, во-вторых, выявить более тонкую, чем это предполагается классификацией [31], структуру струй АЦТ. В зоне САТ, в дополнение к южной (САТ-ю), средней (САТ-ср) и северной (САТ-с) струям, было выделено еще три струи: самая южная струя – САТ-1, САТ-3 – между

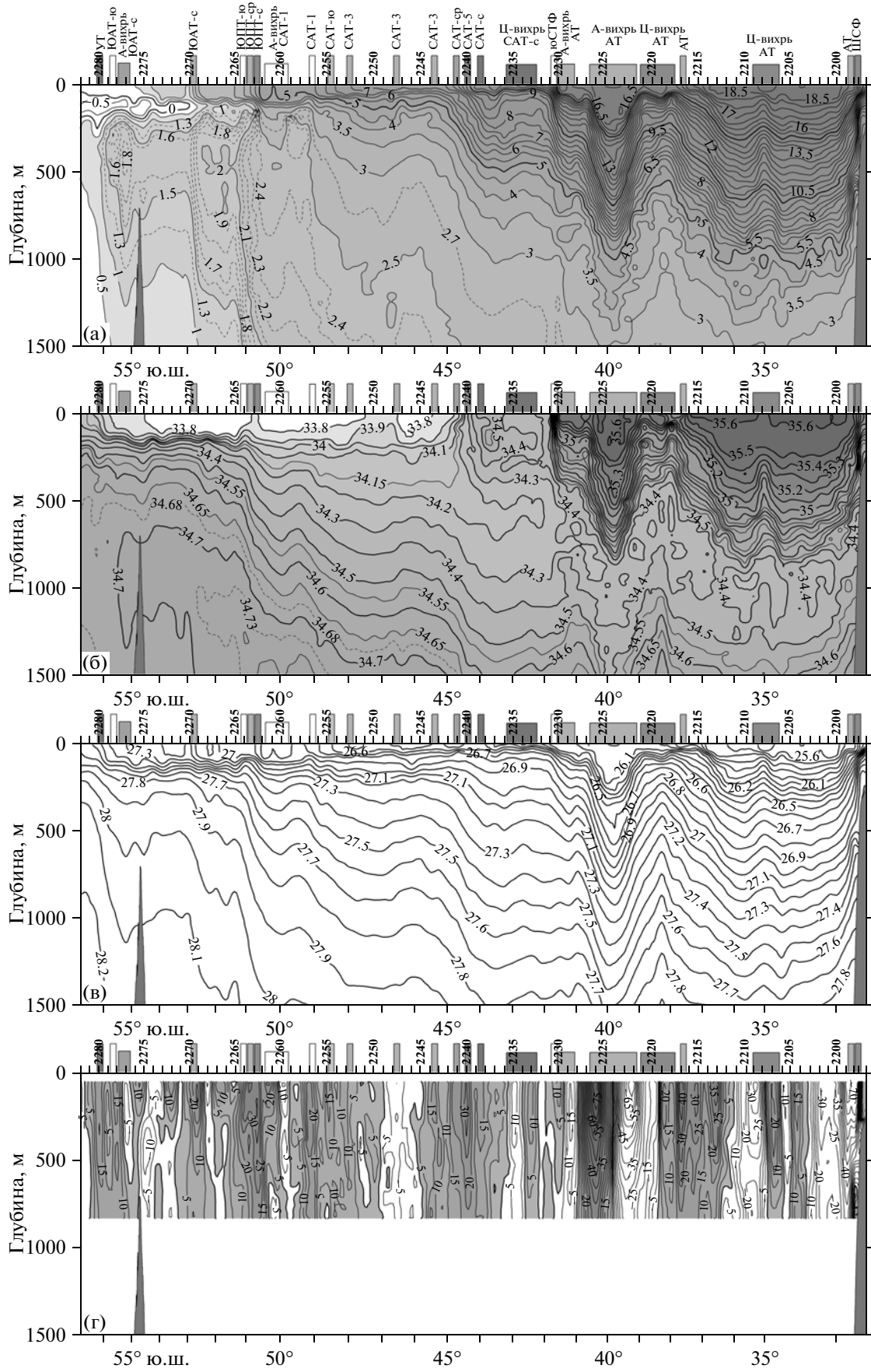


Рис. 5. Распределения в верхнем 1500-м слое потенциальной температуры (а), солёности (б), нейтральной плотности [18] (в) и нормальной составляющей скорости течения U_n по данным измерений с помощью SADCP (г) на разрезе SR02 (01–22.12.2009 г.). Остальное – см. рис. 4.

САТ-ю и САТ-ср, и САТ-5 – между САТ-ср и САТ-с (рис. 5г). Для вновь выделенных струй САТ в таблице, следуя принципу построения температурных критериев [31], приведены интервалы θ , наблюдавшиеся на горизонте 400 дб в ядрах этих струй на разрезе. В зоне ЮПТ отдельные по классификации [31] южная (ЮПТ-ю), средняя (ЮПТ-ср) и северная (ЮПТ-с) струи были слиты в единую струю (рис. 5г). Отдельно друг от друга, как и в [31], были выделены две струи ЮАТ – северная (ЮАТ-с) и южная (ЮАТ-ю). Кроме того, в качестве самостоятельной была выделена струя, объединяющая ЮГАЦТ и фронт Удделла (далее течение Удделла, УТ) (рис. 5г). Необходимо отметить, что столь тонкая структура АЦТ в районе к югу от Африки, проявившаяся в расщеплении зоны САТ на шесть струй, нашла свое подтверждение и в результатах анализа многолетней серии данных спутниковой альтиметрии АДТ-AVISO [5]. На рис. 2 выделены две изогипсы АДТ-AVISO, соответствующие по результатам этого анализа ядрам САТ-с и УТ. Эти две изогипсы дают представление о широтном распространении АЦТ в районе к югу от Африки.

4. СТРУКТУРА СТРУЙ И ФРОНТОВ НА РАЗРЕЗЕ SR02

Шельфово-склоновый фронт (ШСФ) на интервале станций 2197–2198 отделял зону прибрежного апвеллинга вблизи юго-западного побережья Африки от вод Агульясского меандра (рис. 5). Воды прибрежной зоны по отношению к водам открытого океана характеризовались пониженными значениями температуры и солёности как на поверхности океана (рис. 4), так и на изопикнических поверхностях. Последнее обстоятельство видно из отклонения θ, S -кривых станций 2196 и 2197 в сторону меньших солёностей в слое с θ выше примерно 11°C (рис. 6а). Течение в прибрежной зоне было направлено в основном на юго-восток с относительно небольшими скоростями до 15 см/с (рис. 3а, 5г).

Особенностью синоптической ситуации ноября–декабря 2009 г. к югу от Африки был отрыв большого сегмента Агульясского меандра (рис. 2, 3а) и его постепенное разделение на несколько антициклонических вихрей. Разрез SR02 пересекал этот сегмент на участке от станций 2198 до 2216, а также его часть, уже оформившуюся в самостоятельный вихрь, на участке, включающем станции 2222–2226 (рис. 4, 5, 6а). Внутренняя термохалинная структура агульясских вод неоднородна. Наиболее солёный и, следовательно, наименее трансформированный смещением с атлантическими водами тип вод составляет указанный изолированный вихрь. Кроме того, этот же тип вод

наблюдается на двух участках разреза 2200–2207 и 2209–2212 в пределах сегмента (рис. 5, 6а). Несколько распреснённый тип (в слое $\theta > 11^\circ\text{C}$) встречается на африканском склоне на станциях 2198 и 2199 в зоне сильного северо-западного течения, обозначенного на рис. 4 и 5 как АТ (**Агульясское течение**) и характеризуемого скоростями на поверхности океана более 70 см/с, и на участке 2213–2214 с такими же высокими скоростями (рис. 3а, 5, 6а). Наиболее пресный тип агульясских вод отмечается на южной периферии сегмента (станции 2215–2217), где мы выделили возвратную ветвь АТ в районе ст. 2217 со скоростями у поверхности океана до 45 см/с (рис. 3а, 5, 6а), а также в ядре небольшого циклонического вихря (на ст. 2208), сформировавшегося в процессе разделения сегмента на отдельные антициклонические вихри (рис. 5, 6а и векторы на рис. 3а). Пониженные значения солёности двух перечисленных типов вод могут быть обусловлены влиянием как вод прибрежной зоны Африки, так и вод юго-восточной периферии атлантического субтропического круговорота. Вероятнее всего, воды АТ у побережья Африки опресняются за счет первого из указанных источников, а воды южной периферии сегмента – за счет второго. Упомянутый выше циклонический вихрь не разрешается данными АДТ-AVISO (рис. 3а). Однако экстремально высокие значения температуры на поверхности океана в ядре вихря на ст. 2208 (рис. 4), в сочетании с практически постоянной солёностью на поверхности океана (около 35.6 епс) в пределах описываемого сегмента Агульясского меандра, в т.ч. и на ст. 2208 (рис. 4), указывают на обособленность этого вихря от циклонических вихрей, формирующихся на западном склоне африканского континента и расположенных к северо-западу и к юго-востоку от линии разреза (рис. 3а), т.е. на его формирование внутри сегмента.

Разрез SR02 на интервале станций 2218–2221 пересекал циклонический вихрь АТ, сформированный на склоне банки Агульяс (рис. 3а, 4, 5, 6а). На рис. 2 показана траектория его движения от места зарождения до места пересечения разрезом 7 декабря 2009 г. Циклонический вихрь такого же происхождения был зафиксирован на трассе разреза SR02 в феврале 2008 г. [6]. В таких вихрях значения АДТ часто попадают в диапазон, характерный для зоны АЦТ, что хорошо иллюстрируется рис. 2. По ходу своего дрейфа эти вихри могут связываться с зоной АЦТ коридором пониженных значений АДТ, образующимся в процессе отрыва антициклонических вихрей Агульясского меандра. В результате через этот коридор может происходить закачка вод северной окраины АЦТ на внешнюю периферию указанных циклонических вихрей. Как показывает карта на рис. 2 и 3а,

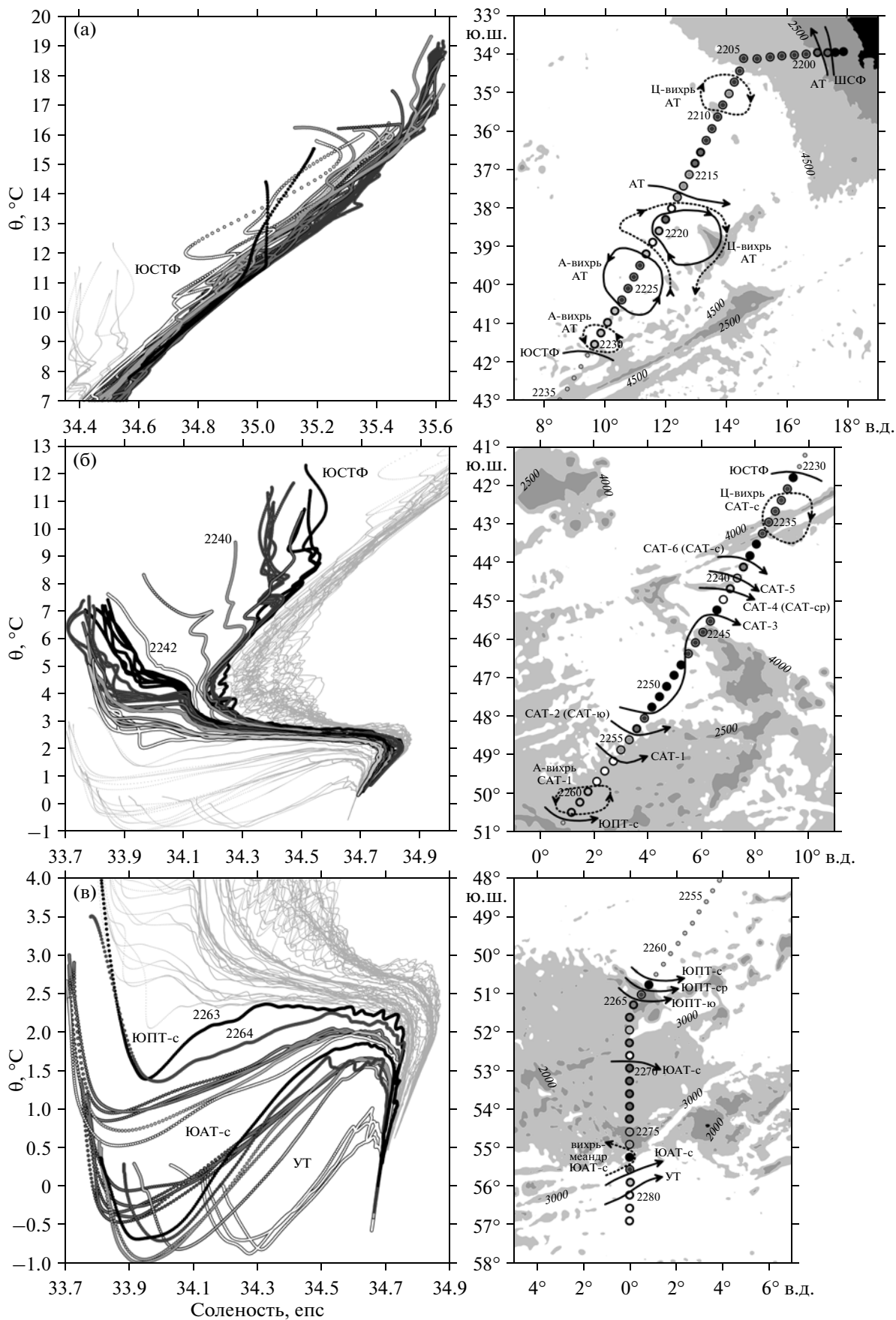
именно такая ситуация сложилась в первых числах декабря 2012 г., что подтверждается также и особенностями термохалинной структуры циклонического вихря АТ на линии разреза. Форма θ, S -кривой ядра вихря (ст. 2219) повторяет формы θ, S -кривых в зоне АТ на африканском склоне (рис. 6а). Форма θ, S -кривой ст. 2220 сходна с θ, S -кривыми северной окрестности ЮСТФ (рис. 6а), а периферийные станции 2221 и 2218 содержат включения вод с экстремально низкими для всей части разреза к северу от ЮСТФ значениями солёности в слое $\theta > 10^\circ\text{C}$ (рис. 6а). На поверхности океана вихрь характеризуется относительно низкими значениями солёности и температуры (рис. 4).

Еще один антициклонический вихрь на станциях 2229–2230 с орбитальными скоростями около 15 см/с следует классифицировать как вихрь АТ, сформированный в результате расщепления и меандрирования внешней периферии уже упомянувшегося мощного вихря АТ на станциях 2222–2226, со скоростями более 70 см/с (рис. 5). На южном краю вихря на станциях 2230–2231 наблюдался резкий фронт (рис. 4, 5), характеризуемый на поверхности океана практически полностью скомпенсированными по плотности перепадами температуры с 12 до 16°C и солёности с 34.50 до 35.45 епс (рис. 4). Таким образом, этот фронт, очевидно, разделял субантарктические воды с юга и субтропические с севера. Исходя из этого, его можно классифицировать как **Южный субтропический фронт** (ЮСТФ), хотя, согласно некоторым работам (например, [10]), ЮСТФ Атлантического океана в исследуемом районе не выделяется, поскольку происходит его разрыв антициклоническими вихрями АТ. Действительно, столь высокие значения солёности на северном фланге ЮСТФ (35.35–35.45 епс), как следует из данных, приведенных в работе [8], не характерны для ЮСТФ юго-восточной периферии Атлантического океана, а анализ спутниковых карт АДТ-AVISO показал смещение одного из антициклонов АТ на северной стороне хребта Агульяс (рис. 1) на юг почти до 43° ю.ш., произошедшее за несколько недель до времени выполнения разреза. Этот вихрь с динамическими высотами более 45 см, образованный за счет разделения более крупных вихрей, виден в левом нижнем углу карты на рис. 3а. Таким образом, субтропические воды на линии разреза были представлены почти полностью водами Индийского океана (Агульясского меандра), лишь модифицированными смешением с атлантическими водами.

Северная струя САТ (САТ-с) на разрезе SR02 2009 г. характеризовалась слабо выраженным относительно фоновых значений локальным максимумом скорости до 20 см/с в поверхностном слое океана на интервале между станциями 2238 и 2239 (рис. 3б, 5г, 6б). Такое положение оси САТ-с находилось в очень хорошем соответствии с выбранным нами температурным критерием ее положения (таблица). На участке, включающем станции 2233–2235, разрез пересекал западную периферию циклонического вихря САТ-с, содержащего квазиоднородный слой Субантарктической модовой воды на глубинах примерно от 50 до 300 м (рис. 3б, 5, 6б). Как показал анализ серии карт АДТ-AVISO, еще за несколько недель до времени проведения измерений указанный вихрь непосредственно к западу от линии разреза представлял собой циклонический меандр САТ-с, просуществовавший к тому моменту несколько месяцев, начиная примерно с июля 2009 г. Восточнее этого меандра, т.е. практически на линии разреза, САТ-с образовывал антициклонический меандр, в пределах которого в зимний период, очевидно, и формировался упомянутый квазиоднородный слой. После отрыва от САТ-с циклонический вихрь стал смещаться вдоль хребта Агульяс (рис. 1) на северо-восток, по всей вероятности, увлекая квазиоднородные воды по своей периферии. На разрезе на станциях 2237 и 2238, т.е. в промежутке между САТ-с и его циклоническим вихрем, отмечалось вторжение более соленых и менее однородных вод южного фланга ЮСТФ, наблюдавшихся также на ст. 2231 (рис. 5, 6б). Указанные три станции образуют единую группу θ, S -кривых на рис. 6б.

Струя САТ-5 характеризовалась наиболее высокими для всей зоны САТ на разрезе SR02 2009 г. скоростями в поверхностном слое (более 30 см/с), наблюдавшимися в районе ст. 2240 (рис. 3б, 5г, 6б). **Средняя струя САТ** (САТ-ср) отмечалась слабо выраженным максимумом скорости (около 25 см/с по абсолютному значению) между станциями 2241 и 2242 (рис. 3б). Из-за направленности течения под довольно острым углом к линии разреза и достаточно больших значений скорости между ядрами САТ-5 и САТ-ср (более 20 см/с), в распределении нормальной к разрезу составляющей скорости течения U_n этот максимум отсутствует (рис. 5г). Температурный критерий из таблицы и классический критерий — заглупление минимума солёности с поверхности океана в промежуточный слой [24] — определяют положение связанного с этой струей САФ в районе ст. 2241 (рис. 4, 5, 6б). По

Рис. 6. θ, S -кривые (слева) и схемы течений (справа) верхнего слоя океана на трех участках разреза SR02 (01–22.12.2009 г.): северном (а), среднем (б), южном (в). θ, S -кривые и кружки соответствующих станций показаны в одних и тех же оттенках серого. А-вихрь и Ц-вихрь — вихри с антициклоническим и циклоническим направлением вращения. На рисунках слева названия струй соответствуют промежуткам между θ, S -кривыми.



первому критерию САФ смещен на север от указанной станции, по второму — на юг.

Участок разреза, включающий станции от 2243 до 2253, находился в зоне **струи САТ-3**, образовывавшей “S”-образный меандр, что проявляется в виде немоногоного подъема изопоикн с севера на юг в глубинной части разреза (рис. 5в). Меандр, вероятно, является квазипостоянной особенностью поля течений в этом районе, обусловленной обтеканием течением возвышенностей в южной части хребта Агульяс (примерно на 45° ю.ш., рис. 1) и поднятия Метеор (рис. 1). На указанном участке разреза θ, S -кривые верхнего 500–800-метрового слоя разбиваются на две группы, соответствующие, очевидно, северному (станции 2243, 2248–2252) и южному (станции 2244–2247, 2253) флангам САТ-3 (рис. 6б). Таким образом, разрез пересекал ядро САТ-3 три раза, с учетом наличия локальных максимумов скорости — на промежутках между станциями 2243 и 2244, 2247 и 2248, а также в районе ст. 2253 (рис. 4, 5, 6б). В первых двух случаях скорости в ядре составляли более 15 см/с в поверхностном слое, в последнем — около 10 см/с (рис. 3б). Во втором (среднем) пересечении течение было направлено под очень острым углом к линии разреза, поэтому в распределении нормальной к разрезу составляющей скорости U_n соответствующий ему максимум выражен слабо (рис. 5г). Локальные слабые максимумы скорости до 10 см/с (по абсолютным значениям) между южным и средним пересечением, совпадающие с точками станций 2250, 2251 и 2252 (рис. 3б), вероятно, связаны с расщеплением САТ-3 на еще более тонкие струи в зоне значительного расширения этой струи перед поднятием Метеор (рис. 1).

Южная струя САТ (САТ-ю) характеризовалась максимальной скоростью более 15 см/с в поверхностном слое на ст. 2255 (рис. 5г). Температурный критерий (по данным Argo в таблице) определяет положение ядра этой струи между станциями 2254 и 2255. Максимальная скорость в поверхностном слое в **струе САТ-1** составляла около 25 см/с на ст. 2257 (рис. 3б). На участке разреза, включавшем станции 2260–2262, наблюдался очень интенсивный антициклонический вихрь САТ-1 (рис. 4, 5, 6б), т.е. вихрь с орбитальными скоростями, близкими к скорости в самом САТ-1 (до 25 см/с, рис. 3б). Вихрь был вплотную прижат к зоне ЮПТ. Все струи ЮПТ были сосредоточены на участке разреза между станциями 2262 и 2265, где ЮПТ образовывало единую широкую струю со скоростями до 35 см/с (рис. 3в, 5г). При этом отдельные струи не выделялись явными локальными максимумами скорости. По температурным критериям (таблица) оси **северной (ЮПТ-с), средней (ЮПТ-ср) и южной (ЮПТ-ю) струй ЮПТ** располагались на интервалах станций 2262–2263, 2263–2264 и 2264–2265 соответственно.

Максимальные скорости течения в поверхностном слое в **северной струе ЮАТ (ЮАТ-с)**, составлявшие более 25 см/с, наблюдались на ст. 2269 (рис. 3в, 5г). По температурному критерию (таблица) ось струи смещена в сторону ст. 2270. Разрез пересекал также антициклонический вихрь-меандр ЮАТ-с, в пределы которого попала только одна ст. 2277 (рис. 5, 6в). Вихрь-меандр хорошо выражен на разрезе локальным повышением потенциальной температуры в поверхностном слое максимума θ до 1.85°C (рис. 5а). Проведенный нами анализ разрезов, которые были выполнены вдоль нулевого меридиана и данные которых доступны теперь по базе данных WOD09 (http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD09/pr_wod09.html), показал наличие такого меридионального максимума температуры на той же широте практически на всех разрезах. Таким образом, этот вихрь-меандр является квазипостоянной особенностью поля течений на нулевом меридиане. Наличие антициклонического образования на широте ст. 2277 западнее линии разреза видно также на карте АДТ-AVISO (рис. 3в). Описанный вихрь-меандр ЮАТ-с был вплотную прижат на линии разреза к **южной струе ЮАТ (ЮАТ-ю)**, ось которой по температурному критерию (таблица) располагалась на промежутке между станциями 2278 и 2279. Максимальные скорости (до 25 см/с) в поверхностном слое в этой струе были зафиксированы на ст. 2278 (рис. 3в).

В зонах между ядрами ЮПТ-ю, ЮАТ-с, ЮАТ-ю и вихрем-меандром ЮАТ-с в поверхностном слое наблюдались разнонаправленные течения с довольно высокими скоростями (в отдельных случаях превосходившими 20 см/с), которые мы не классифицировали в качестве отдельных элементов (струй) и образованных ими вихрей) геострофического по своей природе АЦТ. В распределении U_n повышенные значения скорости (более 15 см/с) отмечались на участке разреза, включавшем станции 2266 и 2267, на ст. 2272 и в ее окрестности и на промежутке между станциями 2275 и 2276 (рис. 5г). При этом следует отметить уменьшение значений U_n на этих участках практически до нулевых значений уже на глубине 300–350 м (рис. 5г). Столь же значительные вертикальные градиенты U_n в верхнем слое океана наблюдались еще на нескольких участках в южной части разреза — в промежутках между станциями 2261 и 2262, 2274 и 2275. Такие вертикальные градиенты U_n , как показали проведенные нами расчеты, не наблюдались в геострофических профилях. Таким образом, в формировании поля скорости на участке разреза SR02, от ЮАТ-ю до ЮПТ включительно, существенную роль играют негеострофические составляющие, обусловленные, судя по всему, расположением указанной зоны над сильно расчлененным рельефом дна обширного поднятия (Буве), об-

разованного в месте тройственного сочленения Южно-Атлантического, Африкано-Антарктического и Американско-Антарктического хребтов (рис. 1). Поднятие характеризуется наличием многочисленных возвышенностей с глубинами над ними менее 1500 м. В частности, такие возвышенности располагаются как на линии разреза (районы ЮПТ и вихря-меандра ЮАТ-с), так и к западу от него (рис. 1, бв).

Южная граница АЦТ (ЮГАЦТ) и фронт Уэдделла по формальным критериям (в подповерхностном слое максимума температуры – южный предел распространения изотерм $\theta = 1.5^\circ\text{C}$ [22] и $\theta = 0.8^\circ\text{C}$ [19]) располагались на промежутках станций 2279–2280 и 2280–2281 соответственно (рис. 3в). По данным измерений скорости течений эти два гидрологических фронта объединяла одна струя, классифицированная нами как **Течение Уэдделла** и характеризовавшаяся скоростями до 35 см/с, которые были зафиксированы в поверхностном слое на ст. 2280 (рис. 3в).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных разреза SR02 (1–22 декабря 2009 г., рис. 1), включавших STD-измерения на станциях и измерения скорости течений судовым ADCP (SADCP) на станциях и на перегонах между ними, выявил более тонкую, чем это предполагается девятиструйной классификацией [31], структуру струй Антарктического циркумполярного течения (АЦТ). Были выделены одиннадцать струй в зоне АЦТ. В их числе – шесть струй Субантарктического течения (САТ), три струи Южного полярного течения (ЮПТ) и две струи Южного антарктического течения (ЮАТ) (рис. 2, 4, 5, 6). Кроме того, была выделена струя, объединяющая фронт Уэдделла и Южную границу АЦТ. При этом по данным прямых измерений скорости на разрезе SR02 все струи ЮПТ были слиты в единую “суперструю”, а остальные струи выделялись локальными максимумами скорости в поверхностном слое.

Воды Субтропической зоны на линии разреза, от Южного субтропического фронта до Шельфово-склонового фронта у берега Африки, были представлены почти полностью водами Индийского океана (Агульясского меандра), лишь модифицированными смещением с менее солеными водами юго-восточной периферии субтропической Атлантики. В этой зоне разрез пересекал большой, распадающийся на отдельные вихри сегмент Агульясского меандра, два самостоятельных антициклонических вихря Агульясского течения (АТ) и два циклонических вихря АТ, один из которых сформировался на южном склоне банки Агульяс (рис. 1).

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 10-05-00200а и 12-05-00277а) и программы № 23 фундаментальных исследований Президиума РАН. Экспедиция 2009 г. проводилась в рамках межведомственного проекта “Меридиан-плюс”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков В.А. Антарктические струи // Океанология. 1994. Т. 34. № 2. С. 169–177.
2. Кошляков М.Н., Гладышев С.В., Тараканов Р.Ю., Федоров Д.А. Течения в западной части пролива Дрейка по данным наблюдений в январе 2010 г. // Океанология. 2011. Т. 51. № 2. С. 197–209.
3. Тараканов Р.Ю. Южные струи антарктического циркумполярного течения в восточной части тихоокеанской Антарктики // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 627–638.
4. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Структура фронтов в районе к югу от Африки по данным разреза SR02 в декабре 2009 г. и спутниковой альтиметрии // Электронный журнал “Исследовано в России”. 2011. Т. 14. С. 672–684. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2011/053.pdf>
5. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Тонкая струйная структура Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // Океанология. 2014. Т. 54. № 6 (в печати).
6. Arhan M., Speich S., Messenger C. et al. Anticyclonic and cyclonic eddies of subtropical origin in the subantarctic zone south of Africa // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C11004, doi:10.1029/2011JC007140.
7. Belkin I.M., Cornillon P.C. Fronts in the World Ocean's Large Marine Ecosystems // International Council for the Exploration of the Sea. ICES CM 2007/D:21.
8. Belkin I.M., Gordon A.L. Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C2. P. 3675–3696.
9. Boebel O., Lufjeharms J.R.E., Schmid et al. The Cape Cauldron: a regime of turbulent inter-ocean exchange // Deep-Sea Res. II. 2003. V. 50 № 1. P. 57–86.
10. Dencausse G., Arhan M., Speich S. Is there a continuous Subtropical Front south of Africa? // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C02027, doi:10.1029/2010JC006587.
11. Duncombe Rae C.M. A demonstration of the hydrographic partition of the Benguela upwelling ecosystem at $26^\circ 40' \text{S}$ // Afr. J. Mar. Sci. 2005. V. 27. № 3. P. 617–628.
12. Garzoli S.L., Gordon A.L. Origins and variability of the Benguela Current // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C1. P. 897–906.
13. Gladyshev S., Arhan M., Sokov A., Speich S. A hydrographic section from South Africa to the southern limit of the Antarctic Circumpolar Current at the Greenwich meridian // Deep-Sea Res I. 2008. V. 55. № 10. P. 1284–1303.
14. Gouretski V.V., Koltermann K.P. WOCE global hydrographic climatology // Ber. Bundesamtes Seeschiffahrt Hydrogr. 2004. V. 35. P. 1–52.
15. Hallberg R.W., Gnanadesikan A. The role of eddies in determining the structure and response of the wind

- driven Southern Hemisphere overturning: Results from the modeling eddies in the Southern Ocean project // *J. Phys. Oceanogr.* 2006. V. 36. № 12. P. 2232–2252.
16. *Höflich O.* Climate of the South Atlantic // *Climate of the oceans.* Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 1–191.
 17. *Hughes C.W., Ash E.R.* Eddy forcing of the mean flow in the Southern ocean // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № C2. P. 2713–2722.
 18. *Jacket D.R., McDougall T.J.* A Neutral Density Variable for the World's Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27. № 2. P. 237–263.
 19. *Klatt O., Fahrbach E., Hoppema M., Rohardt G.* The transport of the Weddell Gyre across the Prime Meridian // *Deep-Sea Res. II.* 2005. V. 52. № 2. P. 513–528.
 20. *Maltrud M.E., Smith R.D., Semtner E.J., Malone R.C.* Global eddy-resolving ocean simulations driven by 1985–1984 atmospheric winds // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № C13. P. 30825–30853.
 21. *Niiler P.P., Maximenko N.A., McWilliams J.C.* Dynamically balanced absolute sea level of the global ocean derived from near-surface velocity observations // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 22. P. 2164, doi: 10.1029/2003GL018628.
 22. *Orsi A.H., Whitworth Th. III, Nowlin W.D. Jr.* On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // *Deep-Sea Res.* 1995. V. 42. № 5. P. 641–673.
 23. *Patterson S.L., Sievers H.A.* The Weddell-Scotia confluence // *J. Phys. Oceanogr.* 1980. V. 10. № 10. P. 1584–1610.
 24. *Peterson R.G., Whitworth T.* The Subantarctic and Polar Fronts in relation to deep water masses through the southwestern Atlantic // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № C8. P. 10817–10838.
 25. *Pollard R.D., Read J.F., Allen J.T. et al.* On the physical structure of a front in the Bellingshausen Sea // *Deep-Sea Res. II.* 1995. V. 42. № 4–5. P. 955–982.
 26. *Read J.F., Pollard R.D., Morrison A.I., Symon C.* On the southerly extent of the Antarctic Circumpolar Current in the southeast Pacific // *Deep-Sea Res. II.* 1995. V. 42. № 4–5. P. 933–954.
 27. *Richardson P.L.* Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters // *Deep-Sea Res. I.* 2007. V. 54. P. 1361–1389.
 28. *Richardson P.L., Garzoli S.L.* Characteristics of intermediate water flow in the Benguela current as measured with RAFOS floats // *Deep-Sea Res. II.* 2003. V. 50. № 1. P. 87–118.
 29. *Sokolov S., Rintoul S.R.* Structure of Southern ocean fronts at 140° E // *J. Mar. Syst.* 2002. V. 37. № 1–3. P. 151–184.
 30. *Sokolov S., Rintoul S.R.* Multiple Jets of the Antarctic Circumpolar Current South of Australia // *J. Phys. Oceanogr.* 2007. V. 37. № 5. P. 1394–1412.
 31. *Sokolov S., Rintoul S.R.* The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part A: Mean circumpolar paths // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C11018, doi: 10.1029/2008JC005108.
 32. *Sokolov S., Rintoul S.R.* The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part B: Variability and relationship to sea surface height // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C11019, doi: 10.1029/2008JC005248.

The Frontal and Jet Structure South of Africa Based on the Data of the SR02 Section in December 2009

R. Yu. Tarakanov, A. M. Gritsenko

The frontal structure in the region south of Africa is investigated on the basis of CTD- and SADCP measurements along the hydrophysical section SR02 carried out onboard R/V “Akademik Ioffe” in December 2009 from the Good Hope Cape to 57° S at the Prime Meridian. Eleven jets of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) were revealed. These were six jets of the Subantarctic Current, three jets of the South Polar Current (SPC), and two jets of the South Antarctic Current. The jet combining the Weddell Front and the Southern Boundary of the ACC was also revealed. All jets of the SPC were joined in a single “super-jet”. The others were manifested by the local velocity maxima in the surface layer. The subtropical water along the section from the Southern Subtropical Front to the Shelf-Slope Front near the African shore was represented by the Indian Ocean (Agulhas Retroflexion) water modified by mixing with the fresher water of the south-eastern periphery of the Subtropical Atlantic.