

УДК 551.465

## ТОНКАЯ СТРУЙНАЯ СТРУКТУРА АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ К ЮГУ ОТ АФРИКИ

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

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

e-mail: rtarakanov@gmail.com

Поступила в редакцию 01.04.2013 г.

На основе статистического анализа еженедельных данных спутниковой альтиметрии французского агентства CLS (DT-Global-MADT-Upd product, <http://aviso.oceanobs.com>) и анализа данных гидрофизического разреза SR02, выполненного на НИС “Академик Иоффе” в декабре 2009 г., исследована струйная структура Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) к югу от Африки. В этом районе океана было выделено двенадцать струй АЦТ, в их числе – шесть струй Субантарктического течения, четыре струи Южного полярного течения и две струи Южного антарктического течения. Кроме того, была выделена струя, соответствующая течению Уэдделла. Перепад абсолютных динамических высот через каждую из струй составлял 10–15 см. Показано, что оси струй сохраняют присущие им значения абсолютной динамической топографии на промежутках времени до полугода–года, включающих период выполнения разреза SR02. На линии разреза наблюдалось хорошее соответствие осей струй, определенных авторами ранее по данным прямых гидрофизических измерений на разрезе и в настоящей работе по данным альтиметрии.

DOI: 10.7868/S003015741405013X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

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, градиентов гидродинамических свойств воды [1, 11]. 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, а “струя” или “течение” – в отношении динамических фронтов.

Долгое время в зоне АЦТ было принято выделять всего две струи и два связанных с ними фронта – Субантарктический фронт (САФ) и Полярный фронт (ПФ), располагающийся к югу от САФ. Зону к северу от САФ называют Субантарк-

тической 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). Бурковым [1] было показано наличие дополнительных слабых струй к югу от ПФ. Независимо от Буркова, Орси и др. [11] выделили третью, слабую струю АЦТ, которую они назвали Южным фронтом АЦТ (ЮФАЦТ). Кроме того, эти авторы выделили Южную границу АЦТ (ЮГАЦТ), связав ее с южным пределом распространения подповерхностной 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. [11], считается классической. Согласно 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.

Соколов и Ринтол [14–17], анализируя фронтальную структуру Южного океана на основе данных спутниковой альтиметрии, данных трансоке-

анских гидрологических разрезов, климатологии WOCE и данных поплавков Argo, 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 [14, 16]. 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 [12]. В районе нулевого меридиана указанные фронты не разрешаются отдельными “ступенями” гидрофизических свойств даже на современных меридиональных разрезах с достаточно частой сеткой станций [9].

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ДАННЫЕ

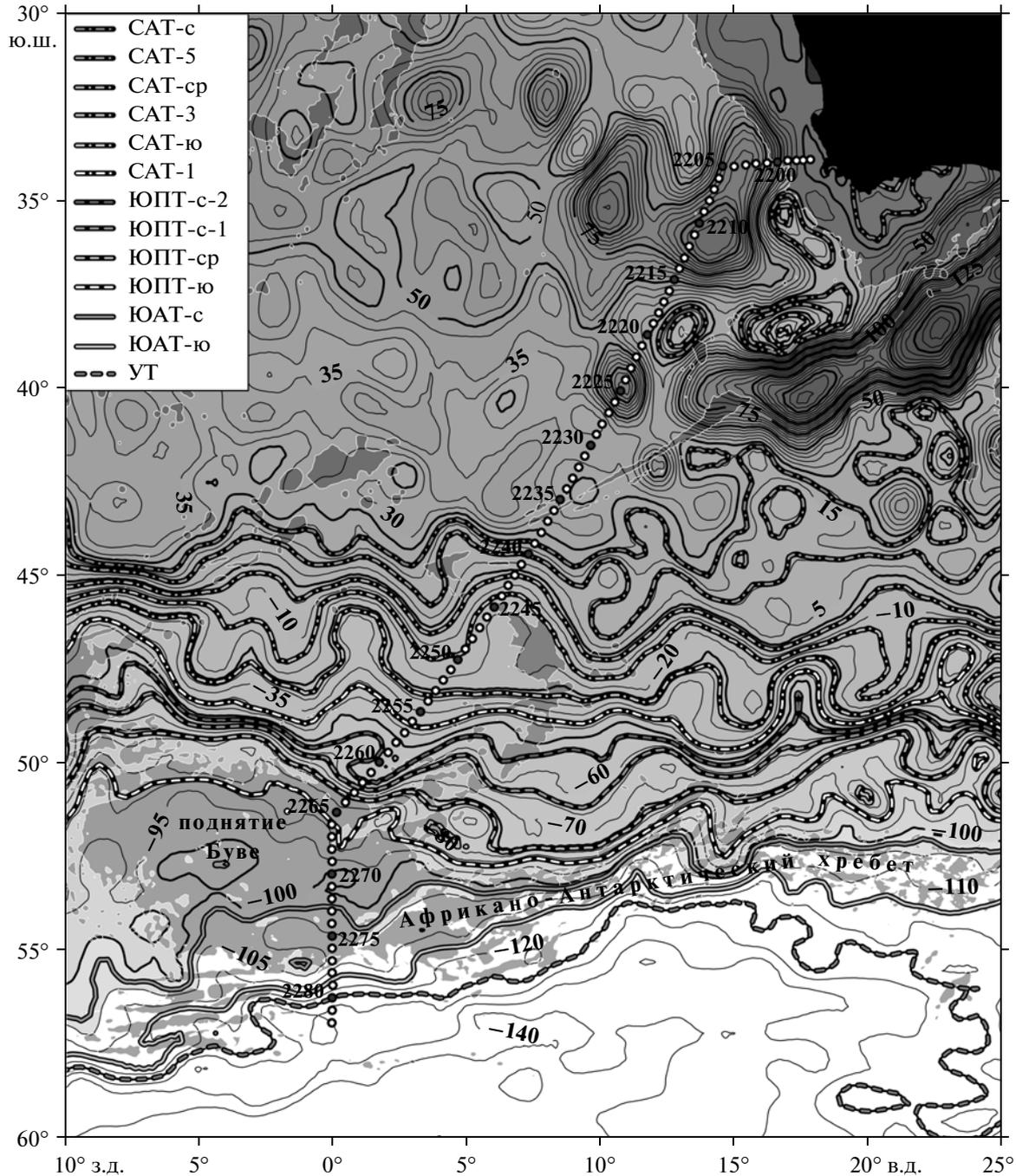
Изогипсы (изолинии абсолютной динамической топографии, АДТ) на поверхности океана по своей сути являются линиями тока геострофических течений поверхностной интенсификации. При этом сгущение изогипс, очевидно, показывает положение отдельных струй крупномасштабных океанских течений, чему, в силу их преимущественно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

Необходимо отметить, что спутник позволяет измерять только аномалию уровня океана относительно некоторой средней (по времени) ровной поверхности. При этом ни изолинии самой этой поверхности, ни изолинии аномалии уровня не являются синоптическими линиями тока геострофических течений. Таким образом, восстановление синоптического распределения АДТ требует определения средней АДТ и ее аномалии с привлечением дополнительных данных. Низкая обеспеченность пространства океана данными прямыми наблюдениями (гидрофизические разрезы, измерители скорости течения, поплавки Argo и т.д.) приводит к недостаточной точности восстановления средней АДТ, а ошибки в оценках приливного течения и дискретность самих спут-

никовых измерений по времени и пространству – к ошибкам в аномалиях АДТ. В результате использование восстановленной синоптической АДТ нередко приводит к ошибкам, как в количественном, так и в качественном описании локальной картины течений (такие примеры рассмотрены в ряде работ [2, 6]). Следует также отметить, что на сегодняшний день существует несколько версий средней АДТ [10, 13, 16]. Указанное выше несовершенство АДТ (и аномалии, и средней) требует, с одной стороны, дальнейшей ее (АДТ) доработки на основе данных прямого зондирования океана, с другой – осторожного отношения к интерпретации результатов, полученных на основе анализа по данным АДТ.

Настоящая статья – вторая из цикла работ, посвященных анализу структуры фронтов и струй в районе к югу от Африки на основе данных гидрофизического разреза SR02 (номенклатура WOCE; рис. 1), выполненного Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) 1–22 декабря 2009 г. на НИС “Академик Иоффе”, и данных по АДТ французского агентства CLS (Collecte Localisation Satellites), публикуемых на сайте <http://avisooceanobs.com>. Измерения на разрезе SR02 2009 г. проводились в развитие экспедиционных работ 2004 [8], 2005 и 2006 гг. в этом районе. Цикл статей является продолжением исследования [5] с привлечением дополнительных данных. В первой работе цикла [4] преимущественно анализировались данные измерений гидрофизических параметров, выполненных с борта судна вдоль всего разреза. В настоящей работе основное внимание уделяется исследованию структуры струй АЦТ в районе к югу от Африки (рис. 1) статистическими методами на основе еженедельных данных по АДТ агентства CLS и связи полученных результатов с результатами анализа работы [4].

Из публикуемых агентством CLS вариантов временных рядов АДТ, в настоящей работе была использована 19-летняя серия (с 01 января 1993 г. до 31 декабря 2011 г.) еженедельных данных по АДТ (DT-Global-MADT-Upd product) с сеткой  $\frac{1^\circ}{3} \times \frac{1^\circ}{3 \cos \varphi}$  ( $\varphi$  – широта), а также ежедневные данные за период выполнения разреза. Пример карты такой АДТ (здесь и далее АДТ-AVISO,  $\zeta$ ) на 16 декабря 2009 г. (дату, среднюю за период пересечения АЦТ разрезом SR02 2009 г.) показан на рис. 1. Далее именно эти данные будут упоминаться нами как спутниковые альтиметрические данные или просто как данные альтиметрии. Используемый массив АДТ, в отличие от другого предлагаемого агентством CLS варианта АДТ – DT-Global-MADT-Ref, строится на данных всех работающих на конкретный момент времени альтиметрических спутников (одновременно до четырех), что снижает оценку вероятной ошибки в узлах сетки массива. Отметим, что синоптическая АДТ-AVISO пред-

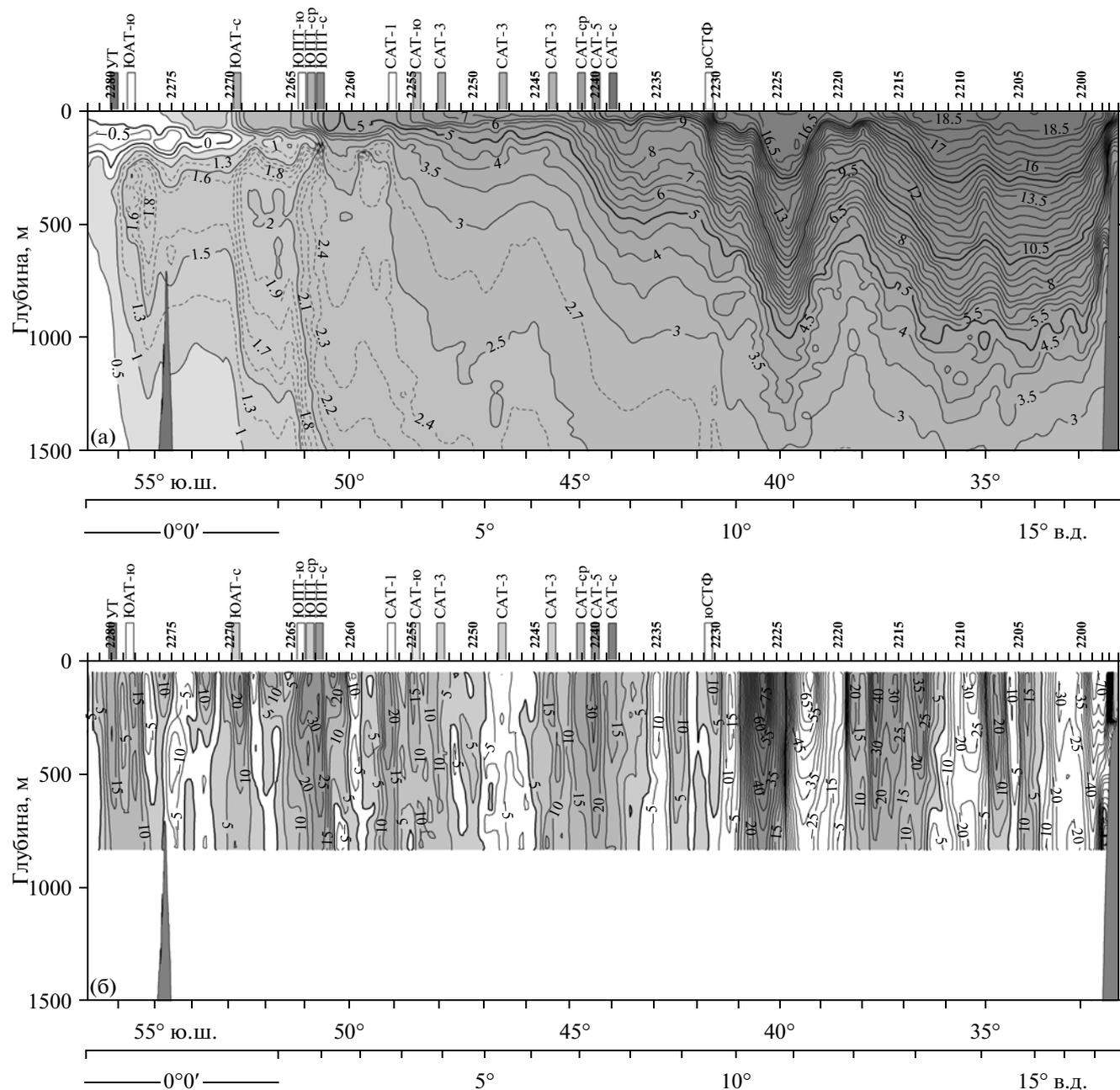


**Рис. 1.** Карта АДТ-AVISO,  $\zeta$  (DT-Global-MADT-Upd product) для района к югу от Африки на 16.12.2009. Затенены области с глубинами менее 3000 м. Кружками отмечено положение станций. Номера приведены для станций, обозначенных темными кружками. Жирными линиями выделены изогипсы, соответствующие ядрам струй АЦТ, перечисленным в легенде.

ставляет собой сумму аномалии уровня океана и средней АДТ версии CNES-CLS09 [13]. Величина средней ошибки картирования аномалии уровня составляет менее 10% дисперсии сигнала (<2 см для Южного океана) [7], а величина ошибки средней АДТ CNES-CLS09 оценивается в Южном оке-

ане в 1–2 см (рис. 13 в [13]). В работе использованы также данные формальной ошибки картирования аномалии уровня океана, соответствующие выбранному варианту АДТ.

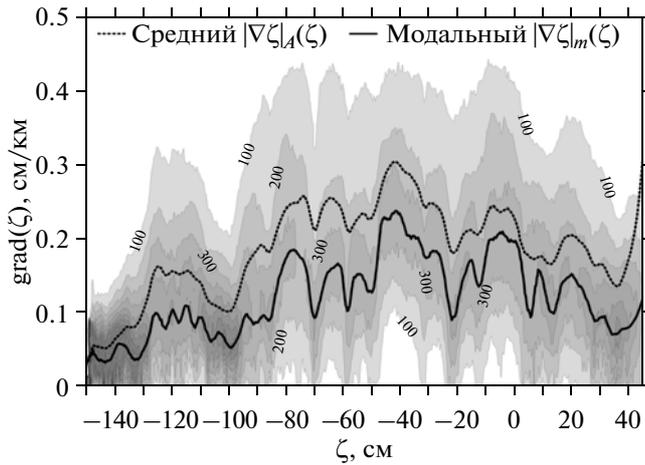
Разрез SR02 в 2009 г. состоял из трех участков. Первый, квазизональный, участок начинался на



**Рис. 2.** Распределения в верхнем 1500-м слое потенциальной температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) (а) и нормальной составляющей скорости течения  $U_n$  (см/с) по данным измерений с помощью SADCP (б) на разрезе SR02 (01–22.12.2009). Засечки с аббревиатурами отмечают положение фронтов и осей течений. ЮСТФ – Южный субтропический фронт. Расшифровку остальных аббревиатур см. в тексте.

африканском склоне в районе м. Доброй Надежды (рис. 1). Вторым, ориентированный на юго-запад участок совпадал с одним из треков альтиметрических спутников Jason-1,2, обеспечивающих высокое временное разрешение конечного продукта агентства CLS. Третий участок, проходивший по нулевому меридиану, пересекал Африкано-Антарктический хребет и заканчивался уже на северной периферии круговорота Уэддел-

ла (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 CTD (электропроводность–температура–глубина) зондом SeaBird-911+. На станциях и на переходах между ними проводились измерения скорости течений судовым доплеров-

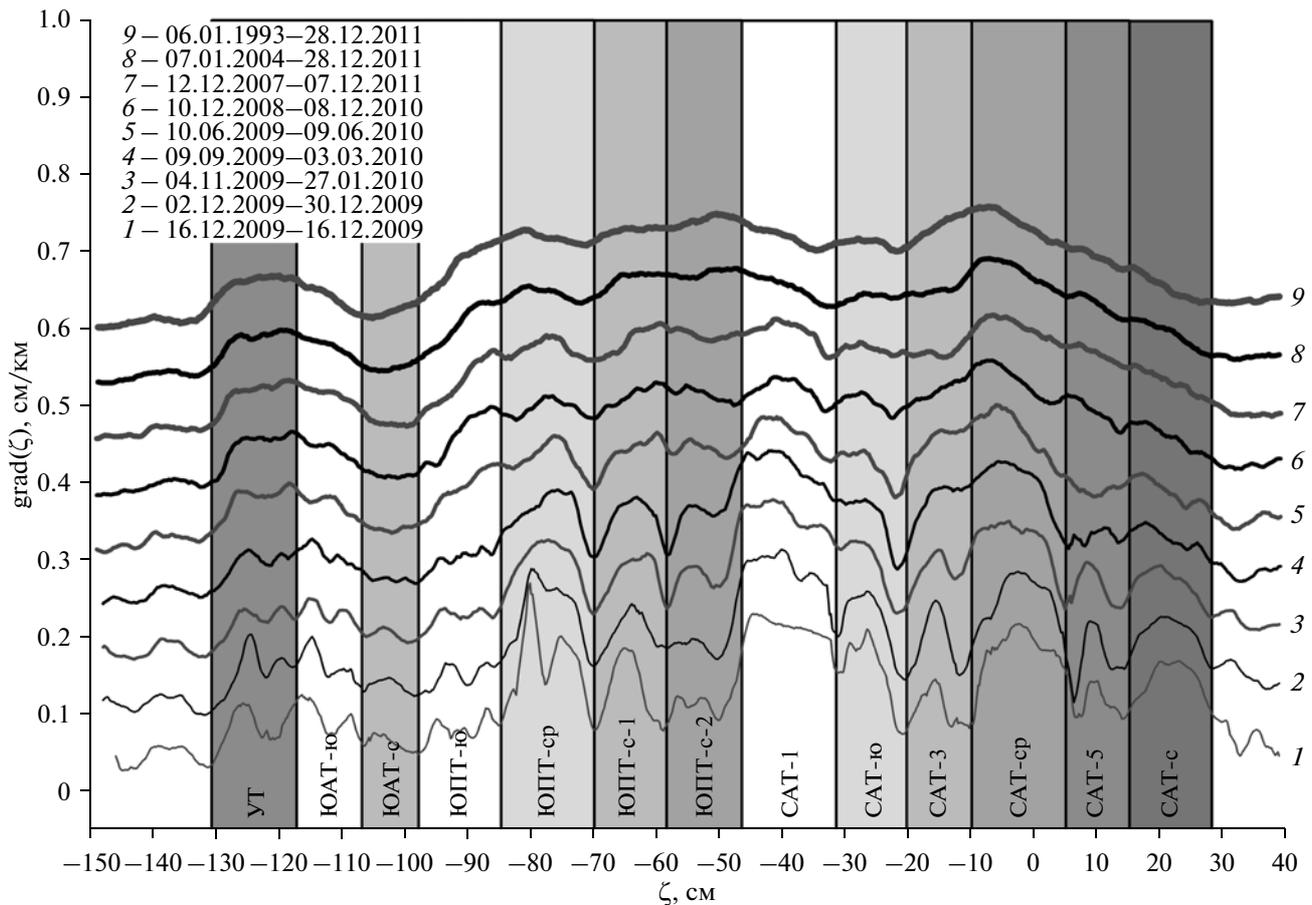


**Рис. 3.** Двумерное распределение повторяемости пар значений  $|\nabla\zeta|$ ,  $\zeta$  за период 04.11.2009 г.–27.01.2010 г., нормированное на единицу градиента. Показаны также кривые модальных и средних значений  $|\nabla\zeta|$  за этот период.

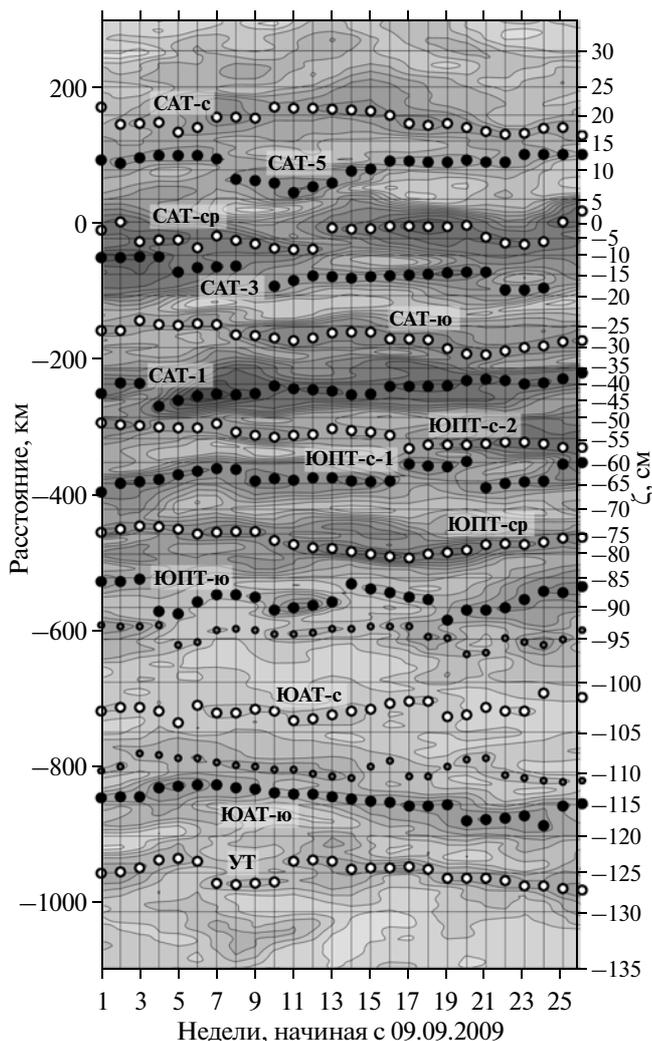
ским акустическим профилографом течений (SADCP, TRDI Ocean Surveyor, 38 kHz). Более подробные сведения о выполненных в рейсе гидрофизических измерениях приведены в работе [4]. На рис. 2 показаны распределения потенциальной температуры в верхнем 1500-метровом слое на разрезе и нормальной разрезе составляющей скорости течения, измеренной судовым ADCP; на верхней оси отмечено также положение ядер струй АЦТ, полученное на основе анализа распределений гидрофизических характеристик [4].

### 3. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ АЛЬГИМЕТРИИ

Согласно выводам Соколова и Ринтула [17], ядра струй АЦТ привязываются во времени и по всему циркумполярному кругу к одним и тем же изогипсам АДТ. Этот вывод предполагает, что зоны повышенных градиентов АДТ, характеризующие ядра отдельных струй, должны быть также устойчиво привязаны во времени и в пространстве (по поверх-



**Рис. 4.** Распределения модальных значений  $|\nabla\zeta|_m$  в зависимости от  $\zeta$  (DT-Global-MADT-Upd product) для промежутков времени от 1 дня до 19 лет по приведенному на рис. 1 сектору океана к югу от  $39^\circ$  ю.ш. Кривые по мере увеличения интервала осреднения смещены вдоль вертикальной оси. Оттенками серого выделены также зоны, соответствующие отдельным струям АЦТ и УТ.



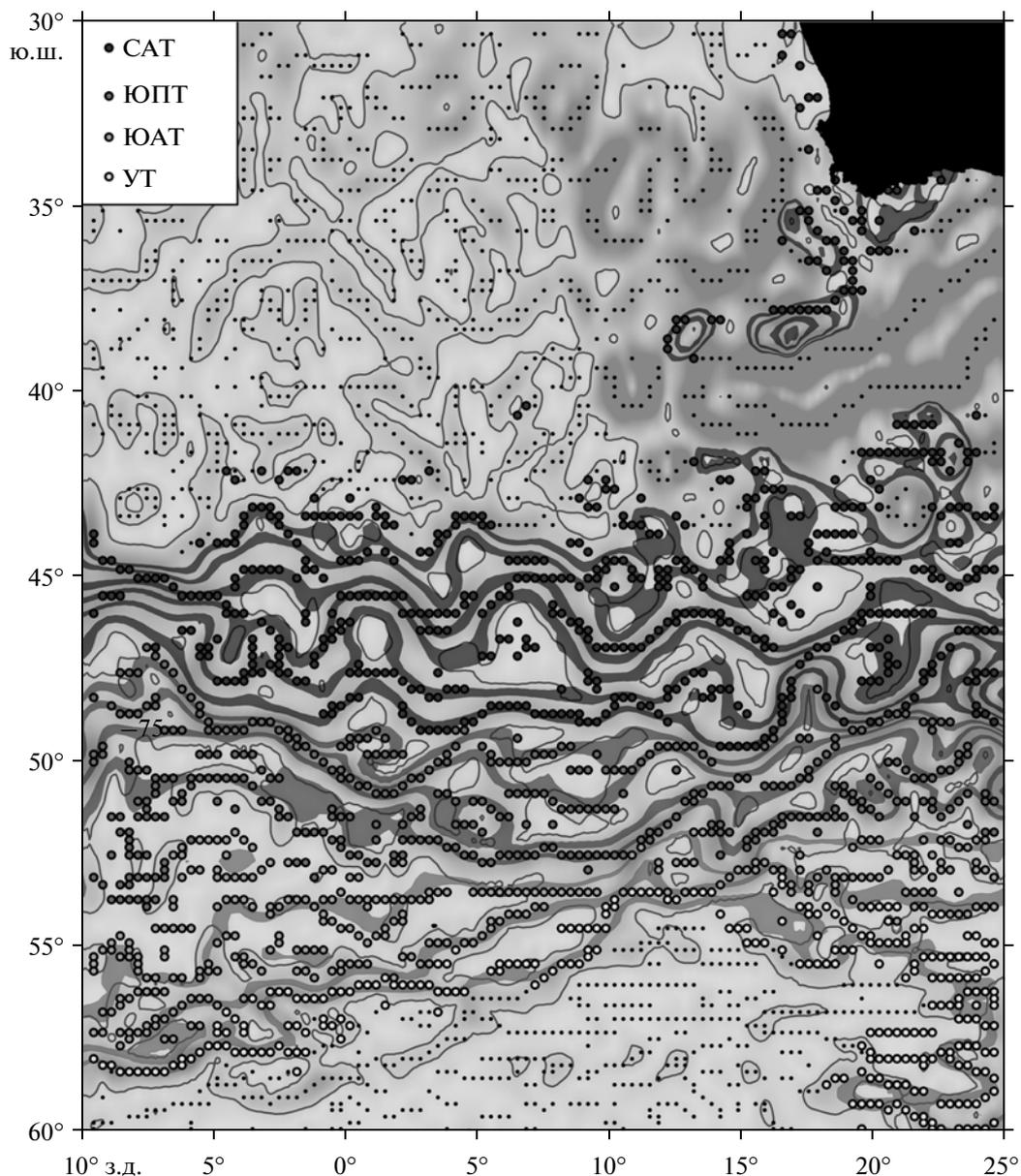
**Рис. 5.** Распределения еженедельных модальных значений  $|\nabla\zeta|_m$  (в оттенках серого) на плоскости  $t, z$ , где  $t$  – время в неделях,  $z$  – условное расстояние от нулевой изогипсы, рассчитываемое как  $z(\zeta) = \sum_{\zeta'=0, \zeta} \Delta\zeta / |\nabla\zeta|_m(\zeta')$ , (здесь  $\Delta\zeta$  – шаг по оси  $\zeta$ , угловые скобки подразумевают осреднение за 26 недель); на вертикальной оси справа приведена шкала  $\zeta$  с оцифровкой каждые 5 см. Темными и белыми кружками показаны еженедельные локальные максимумы  $|\nabla\zeta|_m$ , соответствующие отдельным струям АЦТ и УТ. Более мелкие серые кружки соответствуют двум дополнительным цепочкам максимумов  $|\nabla\zeta|_m$  в зонах ЮПТ-ю и ЮАТ-ю.

ности океана) к определенным интервалам АДТ. Отметим в этой связи, что Соколов и Ринтул устанавливали количество струй и осевые для них значения АДТ по данным альтиметрии с помощью процедуры некоторой оптимизации, результатом которой являлся набор значений АДТ, наилучшим образом аппроксимировавший зоны максимальных градиентов АДТ.

Более естественным способом выявления указанной выше закономерности и определения количества струй представляется совместный статистический анализ градиентов АДТ ( $|\nabla\zeta|$ ) и соответствующих им значений  $\zeta$ . Для исследования структуры струй АЦТ к югу от Африки по данным АДТ-AVISO мы ограничились приведенным на рис. 1 сектором Южного океана южнее  $39^\circ$  ю.ш. Ограничение по широте имело целью отсечь циклонические вихри Агульясского течения, динамические высоты которых попадают в диапазон  $\zeta$ , характерный для АЦТ; наличие именно таких циклонических образований хорошо видно в правом верхнем углу карты в зоне к северу от  $39^\circ$  ю.ш. на рис. 1.

Для упомянутого сектора Южного океана, на основе еженедельных данных по АДТ, был выполнен расчет двумерного распределения вероятности (повторяемости)  $P$  пар значений  $\zeta$  и  $|\nabla\zeta|$  (модуля градиента  $\zeta$  на поверхности океана) для разных промежутков времени от одного дня до 19 лет, включавших дату выполнения разреза. Повторяемость  $P$  для каждой пары значений  $|\nabla\zeta|, \zeta$  нормировалась на количество географических ячеек, попавших в соответствующий этим значениям интервал  $\Delta|\nabla\zeta| \cdot \Delta\zeta$ , и была отнесена к центру этого интервала (на рис. 3 приведен пример такого двумерного распределения  $P$  для промежутка времени 04.11.2009–27.01.2010). По этим двумерным распределениям для каждого временного промежутка от 1 дня до 19 лет определялась кривая модальных (наиболее часто встречающихся) значений  $|\nabla\zeta|_m$  в зависимости от  $\zeta$ . Полученные кривые приведены на рис. 4. Кривые, соответствующие большему временному промежутку, на рис. 4 сдвинуты вдоль вертикальной оси вверх для лучшей наглядности представления результатов. В согласии с предположением о совпадении повышенных градиентов  $\zeta$  со струями течений, точки локальных максимумов  $|\nabla\zeta|_m$  на этих кривых должны соответствовать ядрам таких струй в исследуемом секторе океана, а точки локальных минимумов определяют границы этих струй.

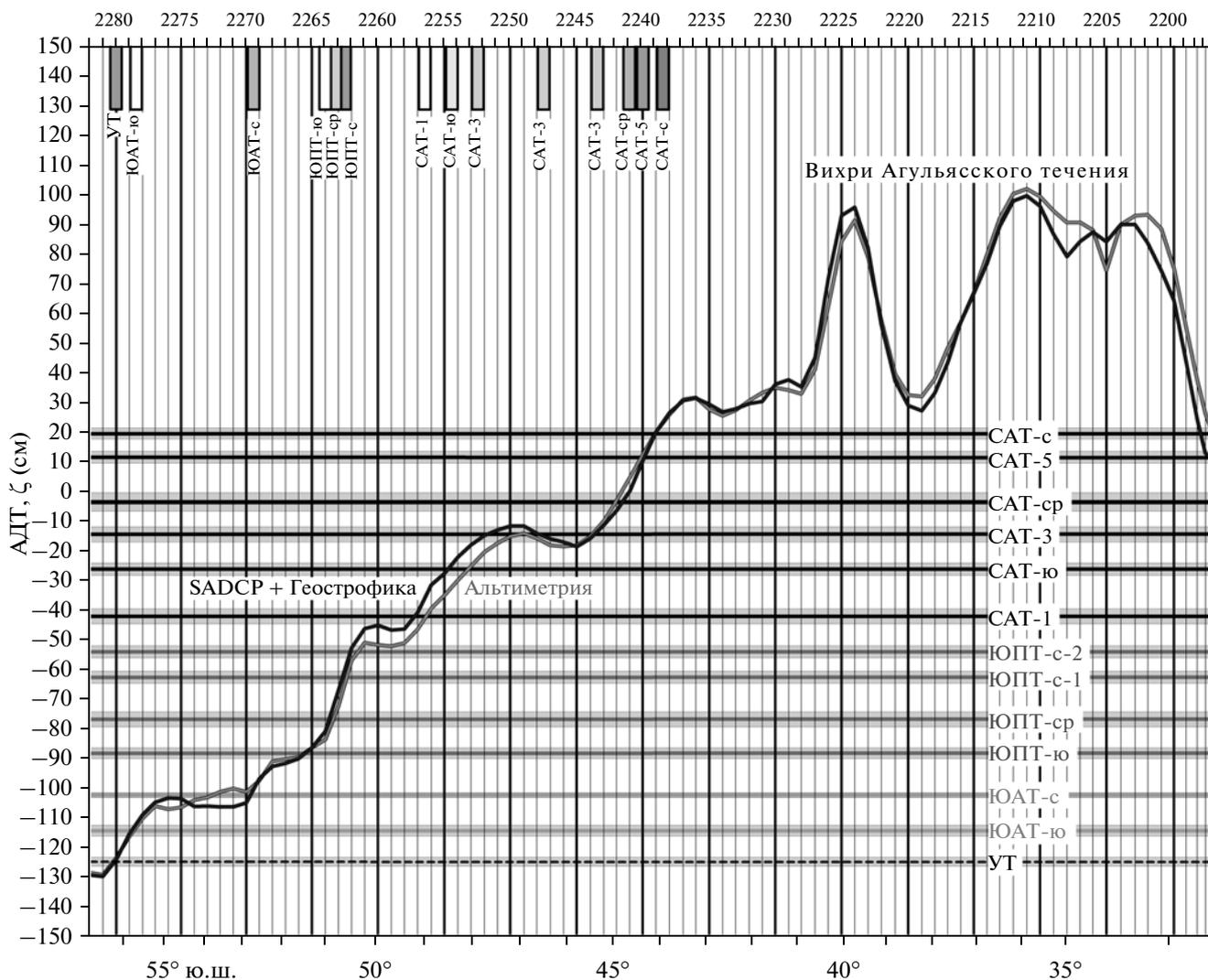
Рис. 4 показывает высокую степень корреляции рассчитанных кривых  $|\nabla\zeta|_m(\zeta)$ , начиная от однодневного и заканчивая 19-летним интервалом. Расчет показал, что последовательные коэффициенты корреляции для этих кривых находятся в диапазоне 0.86–0.97. На рис. 4 зоны повышенных значений  $|\nabla\zeta|_m$  на кривых, соответствующих промежутку времени до полугода–года, хорошо выделяют отдельные струи течений. Количество таких зон оказывается больше девяти струй АЦТ, предполагаемых классификацией [16]. С учетом результатов прямых измерений скорости течений на разрезе SR02 2009 г. (рис. 2б), распределения температуры



**Рис. 6.** Распределения  $|\nabla \zeta|$  (в оттенках серого) и точек локальных максимумов  $|\nabla \zeta|$  по направлению, перпендикулярному изогипсам, в районе к югу от Африки на 16.12.2009 г. Тонкая линия соответствует изолинии  $|\nabla \zeta| = 0.11$  см/км. Крупными кружками отмечено положение точек, попадающих в диапазон  $\zeta$ , характерный для зон АЦТ и УТ. Цветовая кодировка кружков приведена в легенде. Показаны также осевые полосы (диапазон  $\zeta$ , включающий осевые изогипсы  $\pm$  среднеквадратическое отклонение), соответствующие струям АЦТ и УТ (см. таблицу, рис. 1).

на разрезе (рис. 2а) и температурных критериев определения струй, указанных нами в работе [4], а также синоптической картины течений на период выполнения разреза, представленной картами АДТ-AVISO (пример на рис. 1), было выделено и идентифицировано тринадцать зон, шириной 10–15 см (в ед. АДТ) каждая (рис. 4). Двенадцать из выделенных зон представляли собой струи САТ, ЮПТ и ЮАТ, образующих вместе АЦТ, и одна – течение Уэдделла (УТ) (рис. 4). В зоне САТ было выделено шесть струй, как и в работе [4], в

зоне ЮПТ – четыре, а не три (как в [4]), и в зоне ЮАТ – две, как и в [4]. Струи САТ: САТ-1, САТр2, САТ-3, САТ-4, САТ-5 и САТ-6; при этом САТ-2, САТ-4 и САТ-6 на разрезе SR02 2009 г. соответствовали южному САТ (САТ-ю), среднему САТ (САТ-ср) и северному САТ (САТ-с) в классификации [16]. Струи ЮПТ: южное ЮПТ (ЮПТ-ю), среднее ЮПТ (ЮПТ-ср) и две струи северного ЮПТ (ЮПТ-с) – ЮПТ-с-1 и ЮПТ-с-2. Струи ЮАТ: южное ЮАТ (ЮАТ-ю) и северное ЮАТ (ЮАТ-с). Напомним также, что по принятой



**Рис. 7.** Распределения вдоль разреза АДТ-AVISO,  $\zeta$  (DT-Global-MADT-Upd product) и АДТ-SADCP, рассчитанной динамическим методом с баротропной поправкой, определенной по данным измерений скорости течений с помощью SADCP. Горизонтальные линии с серыми полосами показывают положение осевых значений и доверительный интервал  $\zeta$  для каждой из струй по результатам статистического анализа данных альтиметрии (рис. 3). Засечки наверху — места пересечения разреза с осями этих струй по результатам анализа прямых измерений гидрофизических параметров [4].

нами в работе [4] классификации, на линии разреза SR02 УТ объединяет в себе гидрологические фронты Уэдделла и Скотия.

В пределах зоны ЮПТ-с отмечалось два хорошо выраженных и близких по величине максимума  $|\nabla\zeta|_m$  на кривых  $|\nabla\zeta|_m(\zeta)$  почти на всех временных промежутках, за исключением четырехлетнего (кривая 7 на рис. 4) и самого длинного, 19-летнего (кривая 9). Это обстоятельство позволило нам разделить эту зону на две самостоятельные струи. Примечательно, что расщепление полосы ЮПТ-с также на две зоны, но только в термохалинных полях, было зафиксировано в центральной части пролива Дрейка по данным съемки, выполненной ИО РАН в 2008 г. [3]. На рис. 4 в зонах ЮПТ-ю, ЮАТ-ю и УТ на кривых, соответствующих интервалам до полуго-

да—года, также выделяются по два максимума  $|\nabla\zeta|_m$ . Однако такое еще более тонкое разделение струй невозможно подтвердить имеющимися данными измерений скорости течения, температуры и солёности на разрезе SR02 в декабре 2009 г., в приложении к которому проведен статистический анализ.

Осевое значение  $\zeta$  для каждой из струй АЦТ и УТ определялось как среднее арифметическое 26-ти значений  $\zeta$ , соответствующих локальным максимумам  $|\nabla\zeta|_m$  на еженедельных кривых  $|\nabla\zeta|_m(\zeta)$  (рис. 5). Причем для каждой из струй эти максимумы отыскивались в пределах выбранного для нее по данным рис. 4 диапазона  $\zeta$ . Выделенные таким способом осевые изогипсы двенадцати струй АЦТ и одной УТ в районе к югу от Африки показаны

на рис. 1 жирными линиями, а соответствующие им значения  $\zeta$  вместе с оценкой ошибок (среднеквадратических отклонений) приведены в таблице. Отметим, во-первых, что полученные оценки ошибок оказались существенно меньше ширины струй (в ед. АДТ). Таким образом осевые значения  $\zeta$  для струй неплохо сохраняются на интервалах времени до полугода, включающих период выполнения разреза. Во-вторых, расхождение точек максимумов  $|\nabla\zeta|_m$  на полугодовой кривой  $|\nabla\zeta|_m(\zeta)$  (кривая 4 на рис. 4) от значений  $\zeta$ , приведенных в таблице, не превышает 1 см и во всех случаях укладывается в доверительные интервалы  $\zeta$ . Последнее обстоятельство указывает на эквивалентность двух способов определения осей струй на полугодовом интервале — по осредненным за 26 недель точкам максимумов на еженедельных кривых  $|\nabla\zeta|_m(\zeta)$  и по точкам максимумов  $|\nabla\zeta|_m$  на полугодовой кривой  $|\nabla\zeta|_m(\zeta)$ . На более долгопериодных (год и более) модальных кривых на рис. 4 наблюдается выглаживание (исчезновение) некоторых локальных максимумов  $|\nabla\zeta|_m$ . Именно это обстоятельство определило для расчета осей струй выбор полугодового временного интервала. Отметим также, что в зонах ЮПТ-ю и ЮАТ-ю на рис. 5 хорошо выделяются две дополнительные цепочки локальных еженедельных максимумов  $|\nabla\zeta|_m$ . Им соответствуют осевые значения  $\zeta = -94.0 \pm 1.0$  и  $-109.5 \pm 1.0$  см.

На карте за 16 декабря 2009 г. (рис. 6) струи АЦТ приведены в виде осевых полос (диапазон  $\zeta$ , включающий осевые изогипсы  $\pm$  среднеквадратическое отклонение). Кроме того, показаны точки локальных максимумов  $|\nabla\zeta|$  по направлению, перпендикулярному изогипсам в этих точках. Образованные из них цепочки вытягиваются, как правило, вдоль изогипс и также выделяют оси струй на карте. При этом наблюдается довольно хорошее соответствие таких цепочек осевым полосам струй АЦТ и УТ (рис. 6). Над поднятием Буве и на южной стороне Африкано-Антарктического хребта (см. рис. 1) можно отметить цепочки, которые не привязаны к каким-либо осевым полосам (рис. 6). Эти цепочки находят свое отражение на кривых  $|\nabla\zeta|_m(\zeta)$  на рис. 4 и 5 в виде уже упоминавшихся дополнительных максимумов в зонах ЮПТ-ю и ЮАТ-ю. Перечисленные обстоятельства указывают на то, что метод выделения струй по максимумам модальных значений  $|\nabla\zeta|_m$  достоверно выявляет реально наблюдаемые на картах исследуемого района струи, что и определило выбор именно этого метода. Для сравнения, на кривых средних значений  $|\nabla\zeta|_A$  в зависимости от  $\zeta$  некоторые из струй не обнаруживаются. В частности, зоне ЮАТ-с на этих кривых соответствует минимум (пример на рис. 3), тогда как все остальные струи хорошо выделяются по зонам повышенных значений  $|\nabla\zeta|_A$ .

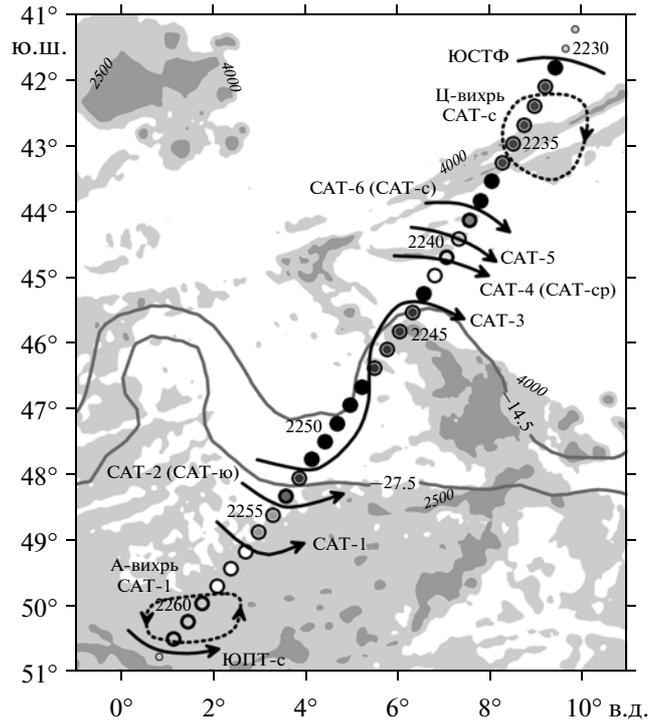


Рис. 8. Схема течений на среднем участке разреза SR02 2009 г. [4]. Приведены также изогипсы, соответствующие ядрам CAT-ю и CAT-3 по результатам анализа данных альтиметрии. А-вихрь и Ц-вихрь — вихри с антициклоническим и циклоническим направлением вращения.

#### 4. СТРУИ АЦТ ПО ДАННЫМ РАЗРЕЗА И ПО ДАННЫМ АЛЬТИМЕТРИИ

На рис. 7 для сопоставления результатов анализа по выделению струй по данным прямых гидрофизических измерений на разрезе SR02 2009 г. (засечки на верхней оси на рис. 7) [4] и по данным альтиметрии приведено распределение АДТ-AVISO вдоль разреза. При этом значения АДТ-AVISO рассчитыва-

Значения АДТ-AVISO, соответствующие ядрам струй АЦТ и УТ на рис. 1 и 4

Струи АЦТ	АДТ-AVISO, $\zeta$ , см
CAT-с	$19.0 \pm 2.0$
CAT-5	$11.0 \pm 2.0$
CAT-сп	$-4.0 \pm 3.0$
CAT-3	$-14.5 \pm 2.5$
CAT-ю	$-27.5 \pm 2.0$
CAT-1	$-41.5 \pm 2.5$
ЮПТ-с-2	$-54.5 \pm 2.0$
ЮПТ-с-1	$-63.0 \pm 2.0$
ЮПТ-сп	$-77.0 \pm 2.5$
ЮПТ-ю	$-88.5 \pm 2.0$
ЮАТ-с	$-102.5 \pm 1.0$
ЮАТ-ю	$-114.5 \pm 2.0$
УТ	$-125.0 \pm 1.5$

лись на точки станций путем интерполяции по времени между базовыми временными отсчетами ежедневных данных DT-Global-MADT-Upd. Точки пересечения построенной таким образом кривой АДТ-AVISO и горизонтальных линий, соответствующих значениям  $\zeta$  в ядрах струй (таблица), показывают положение осей струй АЦТ и УТ на линии разреза по альтиметрическим данным. Напомним, что зона к северу от АЦТ (зона Агульясского течения—Агульясского противотечения) в настоящей работе не рассматривается. На рис. 7 следует отметить по большей части совпадение положений осей струй, полученных двумя разными методами. Вместе с тем имеются и расхождения. В частности, по альтиметрии ось ЮАТ-с оказалась практически совпадающей с линией разреза на участке, включающем станции 2270—2272 (рис. 7); в действительности на разрезе в этой струе наблюдались весьма высокие скорости (более 25 см/с) в направлении, перпендикулярном разрезу (рис. 2б, см. также [4]). САТ-ю и южное пересечение САТ-3 были смещены к югу на один и три интервала между станциями соответственно (рис. 7).

В дополнение к АДТ-AVISO на рис. 7 показана АДТ, рассчитанная динамическим методом с баротропной поправкой, определяемой по данным SADCP. Суть поправки заключается в смещении геострофической кривой (для каждой пары станций) на такую постоянную по глубине величину скорости, при которой средние по слою от 50 до 850 м значения скоростей (рассчитанной и измеренной на станциях с помощью SADCP) оказываются равными. Затем по полученным таким образом абсолютным геострофическим скоростям рассчитывалась АДТ (далее АДТ-SADCP) путем интегрирования вдоль разреза значений этих скоростей на поверхности океана с домножением на  $f/g$ , где  $f$  — параметр Кориолиса, а  $g$  — ускорение свободного падения. Формальная оценка накапливающейся при таком расчете ошибки АДТ составила менее 2 см на полную ширину АЦТ. Поскольку перепад высот обеих АДТ поперек АЦТ оказался практически одинаковым, константа интегрирования для АДТ-SADCP определялась путем совмещения этой кривой с АДТ-AVISO в точке САТ-с (рис. 7).

Если интерпретировать точки пересечения АДТ-SADCP, построенной описанным выше образом, с горизонтальными линиями на рис. 7 в качестве осей струй АЦТ и УТ на разрезе, то в этом случае будет наблюдаться их совпадение (с точностью до интервала между станциями) с ядрами струй по данным анализа прямых гидрофизических измерений. Факт такого совпадения указывает на два обстоятельства:

1. АДТ-SADCP на линии разреза представляется более достоверной, чем АДТ-AVISO. Очень выразительной в этом смысле является ситуация со струей

САТ-3, пересекавшей разрез трижды. На рис. 8 стрелкой схематично показана линия тока ядра САТ-3, которая, напомним, была получена на основе качественного анализа STD-данных, а именно, исходя из сходства форм  $\theta, S$ -кривых в верхнем 800-метровом слое на каждой из сторон оси течения (см. [4]), и подкрепляется в настоящей работе количественным расчетом кривой АДТ-SADCP с привлечением дополнительных данных по измеренным скоростям; т.е. пространственный ход ядра САТ-3 подтверждается двумя независимыми методами. При этом южное и северное пересечения САТ-3 разреза на рис. 8 оказываются близки к изогипсам, соответствующим ядрам САТ-ю (–27.5 см) и САТ-3 (–14.5 см) по данным альтиметрии. Таким образом, на участке разреза между указанными пересечениями САТ-3 накапливается расхождение между двумя АДТ около 10 см, т.е. порядка ширины отдельной струи (в ед. АДТ). Поскольку часть разреза SR02 от  $34^{\circ}06'$  до  $51^{\circ}30'$  ю.ш., включающая в т.ч. и участок пересечения с САТ-3, совпадает с трассой альтиметрических спутников Jason-1,2, т.е. формальная ошибка картирования аномалии уровня по данным альтиметрии минимальна (4–8% дисперсии сигнала), это расхождение представляет собой, главным образом, ошибку средней АДТ-AVISO (CNES-CLS09), т.е. локальное отклонение указанной средней АДТ от истинной средней АДТ. Подчеркнем, что величина этой ошибки на порядок превышает формальную ошибку средней АДТ CNES-CLS09, оцениваемой на линии разреза SR02 в 1 см (рис. 13 в [13]). По всей видимости, наличие ошибки средней АДТ-AVISO (CNES-CLS09) относится ко всей полосе АЦТ, где в упомянутой части разреза наблюдаются расхождения между двумя АДТ. На южном участке разреза такое расхождение может быть связано также с большей формальной ошибкой картирования аномалии уровня (до 20% дисперсии сигнала над поднятием Буве) и с вкладом в расчет АДТ-SADCP негеострофической составляющей течения. В работе [4] было показано, что эта составляющая играет заметную роль в формировании поля течений именно на южном участке разреза.

2. Статистический анализ данных АДТ-AVISO по району Южного океана к югу от Африки, несмотря на наличие в этих данных существенных ошибок (порядка ширины отдельных струй в ед. АДТ), дал вполне достоверную оценку осевых для каждой из струй значений  $\zeta$  в приложении к истинной АДТ, в качестве которой на линии разреза можно рассматривать АДТ-SADCP. Как было показано в предыдущем разделе статьи, эти значения в качестве осевых неплохо сохраняются на интервалах времени до полугода, включающих период выполнения разреза. Это обстоятельство позволяет предположить, что ошибки в АДТ-AVISO при расчете статистических распределений  $|\nabla\zeta|_m(\zeta)$  по

исследуемому сектору Южного океана не приводят на указанных временных промежутках к существенным искажениям результатов статистического анализа. Под существенным искажением понимается исчезновение (выглаживание) максимумов  $|\nabla \zeta|_m$ , соответствующих ядрам струй в распределениях  $|\nabla \zeta|_m(\zeta)$ . Кроме того, отметим, что локальные отклонения АДТ-AVISO от истинной АДТ (частный случай ошибок АДТ) могут проявляться в виде ложных максимумов на кривых  $|\nabla \zeta|_m(\zeta)$ , особенно на коротких временных интервалах. При увеличении этих интервалов такие отклонения, несомненно, вносят свой вклад в выглаживание кривых  $|\nabla \zeta|_m(\zeta)$  (рис. 4). Другими факторами, которые могут тоже приводить к эффекту выглаживания, являются ошибки интерполяции на область между треками спутника или отсутствие долговременной привязки ядер струй к определенным изогипсам.

Как было показано в предыдущем разделе статьи, формальная оценка ошибки привязки осей струй к определенным изогипсам на полугодовом временном интервале не превышает 3 см (таблица). Вместе с тем, как следует из изложенного в настоящем разделе статьи, локальные отклонения АДТ-AVISO от истинной АДТ могут быть в несколько раз больше этой величины. То обстоятельство, что величина и распределенность таких отклонений по поверхности океана неизвестна, не позволяет дать реальную оценку ошибок (доверительных интервалов) выполненного нами определения осей струй по альтиметрическим данным. Достоверность этого определения, однако, косвенным образом подтверждается совпадением полученного результата с результатами анализа независимых данных, а именно данных гидрофизического разреза.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что существует принципиальная возможность восстановления тонкой пространственной струйной структуры АЦТ на основе вероятностно-статистического анализа спутниковых альтиметрических данных (по Абсолютной динамической топографии) французского агентства CLS в тех районах, где имеются пересекающие АЦТ гидрофизические разрезы. Анализ данных альтиметрии позволяет получать траектории струй на поверхности океана, оси которых при этом устойчиво привязаны на некоторых промежутках времени к определенным изогипсам, а сопоставление этих изогипс с осями струй на гидрофизических разрезах дает возможность идентифицировать эти струи и проверить правильность найденного решения на участках пересечения струй и разреза. Таким образом, положение струй и их изменчивость контролируется рядом независимых (не связанных между собой)

параметров, полученных разными приборами (CTD, ADCP, спутниковые наблюдения), что позволяет более надежно и подробно описать струйную структуру АЦТ в Южном океане.

Авторы выражают искреннюю благодарность М.Н. Кошлякову за внимательное отношение к проделанной нами работе и за ряд ценных замечаний, которые позволили существенно улучшить статью.

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. Струи Антарктического циркумполярного течения в центральной части пролива Дрейка по данным съемки в октябре–ноябре 2008 г. // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 1. С. 5–11.
4. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Структура струй и фронтов к югу от Африки по данным разреза SR02 в декабре 2009 г. // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 4. С. 437–450.
5. 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>
6. Barre N., Provost C., Renault A., Sennechael N. Fronts, meanders and eddies in Drake Passage during the ANT-XXIII/3 cruise in January–February 2006: A satellite perspective // *Deep-Sea Res II*. 2011. V. 58. Issues 25–26, P. 2533–2554.
7. Ducet N., Le Traon P.Y., Reverdin G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2 // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № C8. P. 19477–19498.
8. 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.
9. 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. № 3–4. P. 513–528.
10. Niiler P.P., Maximenko N.A., McWilliams J.C. Dynamically balanced absolute sea level of the global ocean derived from near-surface velocity observations // *Geo-*

- phys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 22. 2164, doi: 10.1029/2003GL018628.
11. 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.
  12. Patterson S.L., Sievers H.A. The Weddell-Scotia confluence // *J. Phys. Oceanogr.* 1980. V. 10. № 10. P. 1584–1610.
  13. Rio M.H., Guinehut S., Larnicol G. New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. C07018, doi:10.1029/2010JC006505.
  14. Sokolov S., Rintoul S.R. Structure of Southern ocean fronts at 140° E // *J. Mar. Syst.* 2002. V. 37. № 1–3. P. 151–184.
  15. 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.
  16. 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.
  17. 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.

## Fine-Jet Structure of the Antarctic Circumpolar Current South of Africa

R. Yu. Tarakanov, A. M. Gritsenko

Fine-jet structure of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) south of Africa are investigated by means of a statistical analysis of weekly satellite altimetry data of French agency CLS (DT-Global-MADT-Upd product, <http://aviso.oceanobs.com>) and data of the hydrophysical section SR02 executed onboard R/V “Akademik Ioffe” in December 2009. Twelve jets of the ACC were revealed in this region. Six jets of the Subantarctic Current, four jets of the South Polar Current, and two jets of the South Antarctic Current are among them. Besides, the jet of the Weddell Current was also revealed. The range of Absolute Dynamic Topography (ADT) corresponding to each jet was about 10–15 cm. It is shown that the jet axes were keeping about the same ADT values during time intervals from one day to half year, including the date of the section SR02. It was observed a good agreement between jet axes locations along the section revealed earlier on the basis of the section data and in present paper by altimetry data.