

УДК 551.465

## СТРУИ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА ПО ДАННЫМ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ

© 2018 г. Р. Ю. Тараканов<sup>1</sup>, \*, А. М. Гриценко<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: rtarakanov@gmail.com

Поступила в редакцию 01.12.2016 г.

После доработки 22.03.2017 г.

В работе исследуется тонкая струйная структура Антарктического циркумполярного течения по STD- и SADCР-данным двух гидрофизических разрезов в проливе Дрейка, выполненных в январе 2010 г. и октябре–ноябре 2011 г. На указанных разрезах выявлено 11 струй, характеризовавшихся в горизонтальном направлении локальными максимумами скорости течений, в 2010 г. и 9 струй – в 2011 г. Эти индивидуальные струи представляли собой различные комбинации 12 струй Антарктического циркумполярного течения, выделенных авторами ранее к югу от Африки. В исследовании для интерпретации синоптической картины течений на разрезах также использовались данные спутниковой альтиметрии, публикуемые на сайте <http://www.avisio.altimetry.fr>.

DOI: 10.1134/S003015741804010X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ), интенсифицируемое сильными западными ветрами умеренных широт Южного полушария и опоясывающее антарктический континент с запада на восток, является самым мощным течением в Мировом океане. При этом единственным районом, где АЦТ простирается от одного континентального склона (Южной Америки) до другого (Антарктиды), является пролив Дрейка, что обуславливает удобство исследования АЦТ именно в этом районе. По современному представлению, геострофическое по своей природе АЦТ имеет эквивалентно-баротропную структуру (т.е. не меняет с глубиной свое направление) и проникает на значительную глубину [15]. Согласно [7], в проливе Дрейка АЦТ распространяется из-за орографических ограничений не глубже 2000–2500 м в своей осевой части и 1000–1500 м на северной и южной перифериях.

Спутниковые альтиметрические наблюдения показывают, что квазизональные крупномасштабные океанские течения, в т.ч. и АЦТ, состоят из отдельных струй (динамических фронтов) [11]. С этими струями совпадают наиболее резкие горизонтальные градиенты плотности, температуры и солёности, а также, как правило, гидрохимических параметров [2, 17]. В связи с этим распределения упомянутых свойств на меридиональных разрезах, пересекающих указанные течения, характеризуются ступенчатым подъемом изолиний с севера на юг, особенно сильным на фронтах.

Помимо динамического фронта в океанографических исследованиях часто используется понятие гидрологического фронта – поверхности, разделяющей в пространстве океана вертикальные структуры водных масс. Следует отметить, что динамические и гидрологические фронты могут не совпадать. В согласии с терминологией, принятой в работах [9, 10], термин “фронт” будет использоваться в отношении именно гидрологических фронтов, а “струя” или “течение” – в отношении динамических фронтов.

На протяжении многих лет в зоне АЦТ во всем циркумполярном круге было принято выделять всего две струи и два связанных с ними фронта – Субантарктический фронт (САФ) и Полярный фронт (ПФ), располагающийся к югу от САФ, хотя в некоторых секторах АЦТ выделяли до четырех струй (см. обзор в монографии [5]). 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 более сложная, многоструйная структура АЦТ во всем циркумполярном круге была описана Бурковым [2] на основе обобщения данных гидрологических разрезов. Им было выявлено две дополнительных струи внутри ААЗ. Орси и др. [17] независимо от Буркова, также на основе гидрологических данных, предложили трехструйную клас-

сификацию АЦТ, которая на сегодняшний день считается общепринятой. Они выделили САФ, ПФ и Южный фронт АЦТ (ЮФАЦТ). При этом ЮФ АЦТ, в отличие от двух других, является существенно динамическим фронтом. Соглашаясь с терминологией, предложенной в работе [3], ЮФАЦТ и динамические фронты, связанные с ПФ и САФ, будем называть соответственно Южным антарктическим (ЮАТ), Южным полярным (ЮПТ) и Субантарктическим (САТ) течениями. Южная граница АЦТ (ЮГАЦТ) в этом случае является исключительно гидрологическим фронтом.

На протяжении 1990–2000-х гг. в целом ряде работ по отдельным секторам Южного океана (например, [12, 16, 19, 20, 23]) указывалось, что в зоне АЦТ отмечается существенно большее количество струй, чем это предполагается описанной выше классификацией Орси и др. [17]. При этом нередко наблюдалось расщепление и слияние отдельных струй, а дополнительные струи зачастую интерпретировались лишь как локальные особенности поля течений. Анализируя фронтальную структуру Южного океана на основе данных спутниковой альтиметрии, данных трансокеанских гидрологических разрезов, климатологии WOCE и данных поплавков Argo, Соколов и Ринтол [20, 21] предложили более сложную, девятиструйную классификацию АЦТ. Они выделили по три струи в каждом из течений, соответствующих (в нашей терминологии) САТ и ЮПТ, и две струи в ЮАТ, а также рассмотрели ЮГАЦТ в качестве самостоятельной струи. При этом 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 [19–22]. В районах сужения АЦТ, например, в проливе Дрейка или при пересечении подводных хребтов, струи сливаются, образуя несколько “суперструй” [20].

В работах [9, 10] на основе комплексного анализа данных гидрофизического разреза к югу от Африки и 19-летней серии еженедельных цифровых карт абсолютной динамической топографии (АДТ) по этому району, построенных французским агентством CLS (Collecte Localisation Satellites) по данным спутниковых альтиметрических наблюдений и находящихся в открытом доступе в Интернете (DT Global–MADT–Upd product, <http://www.avisio.altimetry.fr>), была выявлена еще более тонкая струйная структура АЦТ. Здесь было выделено двенадцать одновременно существующих струй, устойчиво привязанных на значительном промежутке времени (до 1 года) к определенным изолиниям АДТ (изогипсам), которые представляют собой собственно линии тока геострофических течений на поверхности океана. Среди этих струй: 6 струй соответствовали САТ, 4 струи – ЮПТ и две струи – ЮАТ. Разде-

ление ЮПТ в проливе Дрейка на 4 зоны с различными термохалинными характеристиками приповерхностного слоя океана, но без очевидного расщепления на такое же количество струй, было зафиксировано по данным гидрофизической съемки, выполненной в 2008 году силами Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) в центральной части пролива [8].

В отношении исследования струйной структуры АЦТ на гидрофизических разрезах в настоящей статье мы вводим понятие индивидуальной струи, характеризующейся в горизонтальном направлении локальным максимумом скорости. Отметим, что индивидуальные струи могут состоять как из одной струи, так и из нескольких струй АЦТ, слитых в одну суперструю, но при этом каждая из струй сохраняет свои отличительные особенности в термохалинных характеристиках.

В настоящей статье анализируется тонкая струйная структура АЦТ в проливе Дрейка по данным двух гидрофизических разрезов, выполненных на НИС “Академик Иоффе” в январе 2010 г. и октябре–ноябре 2011 г. (рис. 1). При этом данные по АДТ упоминавшегося выше французского агентства AVISO используются как вспомогательный материал для интерпретации синоптической картины течений на период выполнения разрезов. Анализ проводится с учетом результатов наших работ по исследованию тонкой структуры АЦТ к югу от Африки [9, 10].

## 2. ДАННЫЕ

Гидрофизические разрезы, данные которых используются в настоящей работе, были выполнены со 2 по 10 января 2010 г. и с 28 октября по 4 ноября 2011 г. вдоль разных трасс (рис. 1). Первый разрез состоял из 54 станций, второй – из 45. Расстояние между станциями составляло 10 морских миль с некоторым учащением на континентальных склонах. На каждой станции выполнялось STD- (зонд SBE-911+) зондирование океана до дна. Кроме того, на станциях и на переходах между ними проводились измерения скорости течений в верхнем примерно километровом слое океана вмонтированным в днище судна судовым акустическим доплеровским профилографом течений (SADCP, TRDI OS, 38 kHz). Более подробный комплекс проведенных работ и первичной обработки данных приведен в работах [3, 4].

После первичной обработки SADCP-данные сглаживались по вертикали с целью подавления мелкомасштабного шума скользящим косинус-фильтром (фильтром Тьюки) с базой 200 м, из них вычитался баротропный прилив, рассчитанный по данным спутниковых альтиметрических наблюдений TOPEX/POSEIDON из массива данных NASA в университете штата Орегон [13], а за-

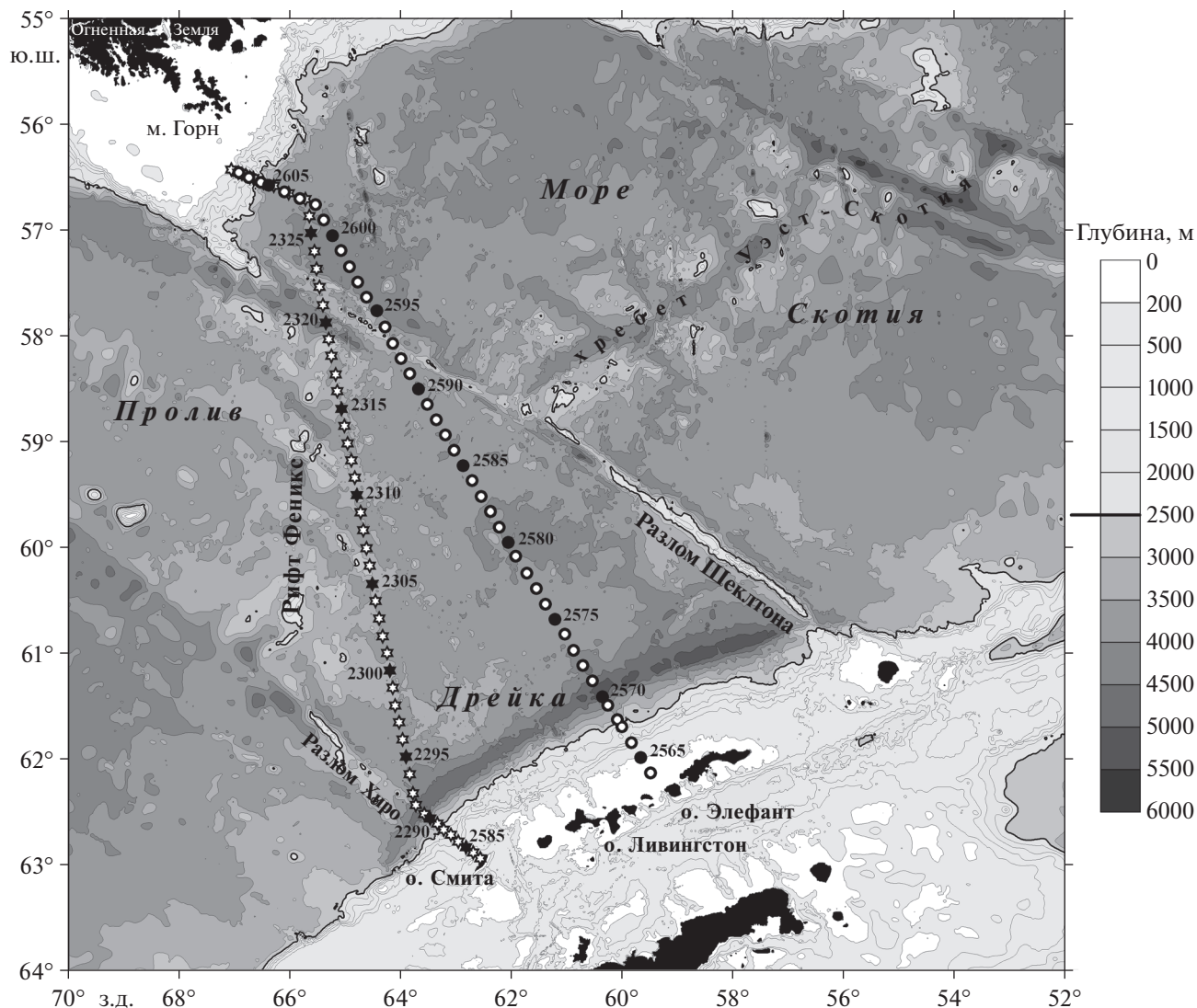


Рис. 1. Рельеф дна в проливе Дрейка и станции гидрофизических разрезов января 2010 г. (звездочки) и октября—ноября 2011 г. (кружки).

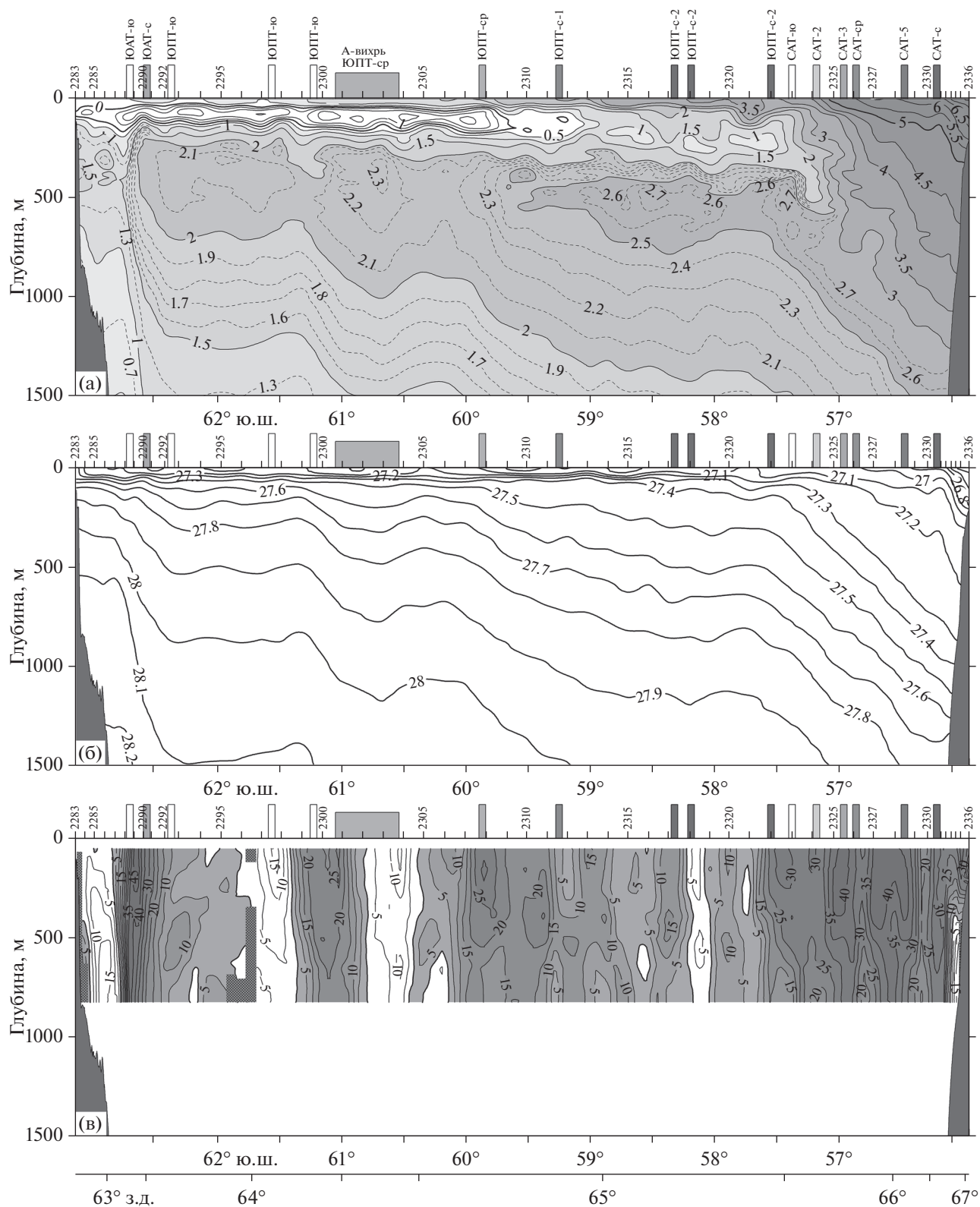
тем эти данные усреднялись отдельно за время выполнения станций и за время переходов. Данные STD-зондирований на станциях сглаживались по глубине фильтром Тьюки с масштабом 40 м. Распределения потенциальной температуры  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), нейтральной плотности  $\gamma^n$  [14] и нормальной к разрезу составляющей скорости течения  $U_n$  по данным измерений SADCSP на разрезе в верхнем 1500-метровом слое океана приведены на рис. 2а–2в для 2010 г. и 3а–3в для 2011 г.

Из вариантов временных рядов АДТ, публикуемых агентством AVISO, в настоящей работе использовались ежедневные данные по АДТ (DT-Global-MADT-Upd product) с сеткой  $1^{\circ}/4 \times 1^{\circ}/4$ . Примеры карт АДТ (здесь и далее АДТ-AVISO,  $\zeta$ ), построенных по этим данным на 05 января 2010 и 31 октября 2011 (даты, соответствующие середине

периода наблюдений при пересечениях АЦТ разрезами 2010 и 2011 гг.), показаны на рис. 4. Далее именно эти данные будут упоминаться как спутниковые альтиметрические данные, или просто как данные альтиметрии. Указанные временные ряды являются результатом обработки данных измерений спутников-альтиметров, выполняемой компанией SSalto/Duacs, и распространяются агентством AVISO с помощью CNES (Centre National d'Études Spatiales) (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>).

### 3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУЙ И ФРОНТОВ АЦТ

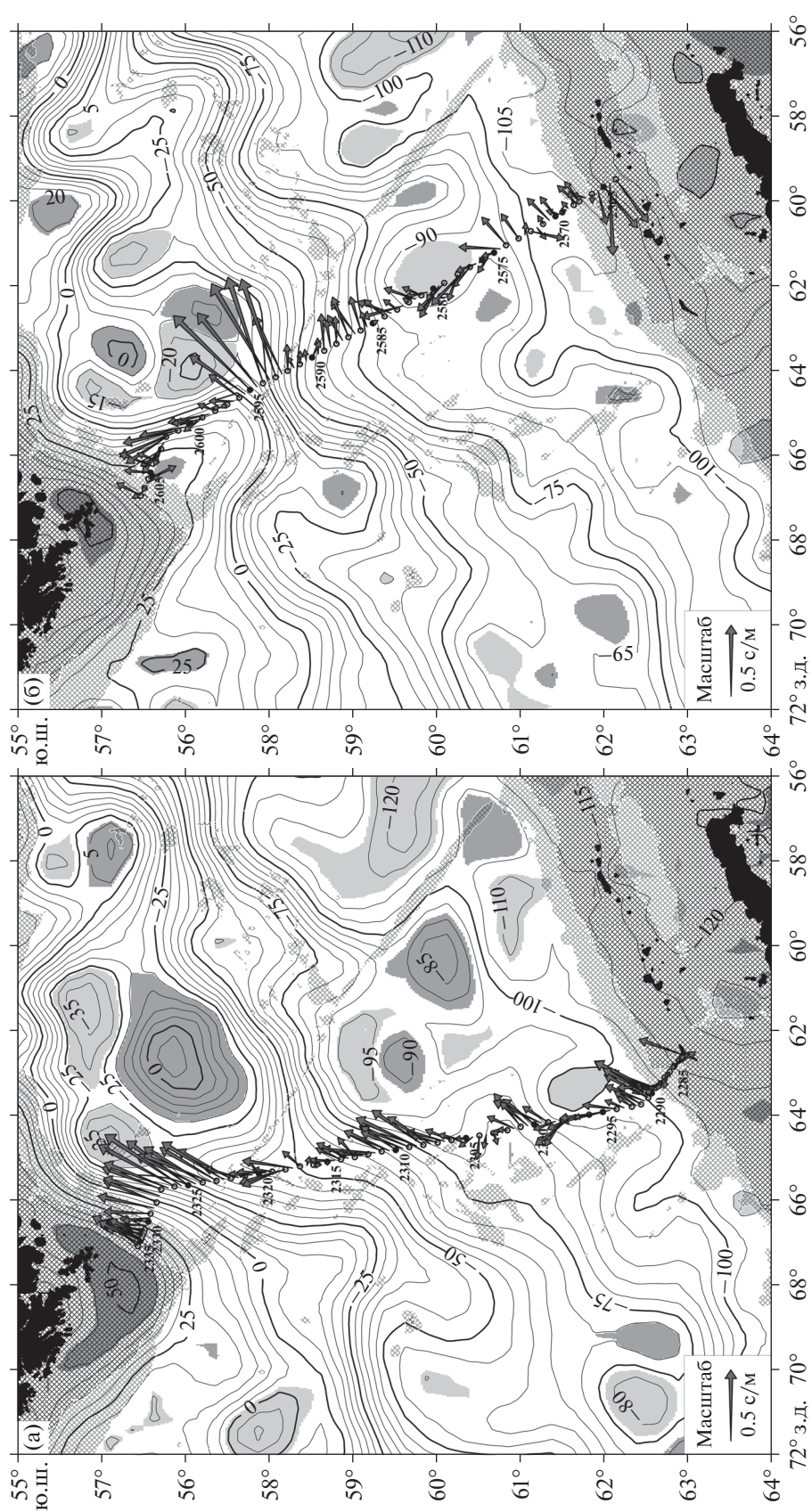
В настоящей работе используется два набора критериев идентификации струй АЦТ. Первый



**Рис. 2.** Распределения на разрезе января 2010 г. в верхнем 1500-метровом слое: (а) потенциальной температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ), (б) нейтральной плотности  $\gamma^n$ , (в) нормальной составляющей измеренной скорости течения (см/с). На верхней оси даны засечки и номера станций, а также в оттенках серого – засечки ядер струй АЦТ; светлые засечки соответствуют южным струям в каждой из зон ЮАТ, ЮПТ, САТ, темные – северным струям. А-вихрь – антициклонический вихрь. Участки разреза, отмеченные штриховкой на рис. 2в, обозначают отсутствие данных SADCР.







**Рис. 4.** АДТ-AVISO,  $\zeta$  (в см) (DT-Global-MADT-Urd product) за: (а) 05.01.2010, (б) 31.10.2011. Светло- и темно-серым тонами выделены соответственно циклонические и антициклонические вихри. Темная и светлая клетки соответственно показывают участки дна с глубиной менее 1000 м и от 1000 до 3000 м. Приведены также векторы скорости течений на глубине 60 м по данным измерений SADCР на рис. 4а — для разреза января 2010 г., на рис. 4б — для разреза октября—ноября 2011 г.

Таблица 1. Критерии определения положения фронтов АЦТ

Струи АЦТ	Температурный критерий определения	По данным Argo (°C) [21]	По оценке [9] (°C)	Критерий определения по стерическим высотам $h$ (м) [21]
САТ-с	$\theta$ на $p = 400$ дб	$6.06 \pm 0.79$		$1.44 \pm 0.02$
САТ-5	$\theta$ на $p = 400$ дб		4.40–5.20	1.35*
САТ-сп	$\theta$ на $p = 400$ дб	$4.06 \pm 0.35$		$1.23 \pm 0.03$
САТ-3	$\theta$ на $p = 400$ дб		3.10–3.23	1.17*
САТ-2	$\theta$ на $p = 400$ дб	$2.78 \pm 0.15$		1.10*
САТ-ю	$\theta$ на $p = 400$ дб		2.52–2.68	$1.03 \pm 0.02$
ЮПТ-с-2	$\theta$ на $p = 200$ дб	$1.98 \pm 0.14$		0.95**
ЮПТ-с-1	$\theta$ в подповерхностном $\theta_{\max}$		2.31–2.41**	0.85**
ЮПТ-сп	$\theta$ в подповерхностном $\theta_{\max}$	$2.25 \pm 0.07$		$0.80 \pm 0.01$
ЮПТ-ю	$\theta$ в подповерхностном $\theta_{\max}$	$2.11 \pm 0.09$		$0.72 \pm 0.01$
ЮАТ-с	$\theta$ в подповерхностном $\theta_{\max}$	$1.93 \pm 0.16$		$0.64 \pm 0.02$
ЮАТ-ю	$\theta$ в подповерхностном $\theta_{\max}$	$1.59 \pm 0.28$		$0.57 \pm 0.01$

\* По данным разреза SR02 2009 г. к югу от Африки [9].

\*\* По данным полигонной съемки октября—ноября 2008 г. в центральной части пролива Дрейка [8].

набор — это те же, с некоторыми дополнениями, температурные критерии, что и в работе [9] (см. табл. 1). Для южных струй АЦТ (к югу от ПФ) эти критерии связаны с южным пределом распространения изотерм в слое подповерхностного максимума температуры, сформулированные преимущественно в работе Соколова и Ринтола [21] на основе анализа массива данных поплавков Argo. Выбор этой группы критериев по отношению к трем другим группам, предложенным в [21] и основанным на климатологии WOCE и/или свойствах подповерхностного зимнего минимума температуры, обусловлен выводами работы [6]. В указанной работе было показано, что:

1. Критерии, связанные с северным пределом распространения изотерм в подповерхностном минимуме температуры, не могут быть получены целиком для всего циркумполярного круга из-за сильной зависимости свойств зимнего поверхностного слоя от локальных условий формирования этого минимума.

2. База данных Argo по отношению к массиву WOCE отражает температурный тренд к потеплению (примерно на  $0.1^\circ\text{C}$ ) 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 полевая фаза программы WOCE закончилась в первой половине 1990-х гг., проект Argo получил развитие в середине 2000-х гг., а исследуемые разрезы были выполнены в 2010 и 2011 гг.

Основное дополнение в табл. 1 к ранее использованным нами [9] критериям связано с расщеплением северной струи ЮПТ (ЮПТ-с) на две ветви: расположенную южнее ЮПТ-с-1 и севернее ЮПТ-с-2. Такое расщепление, устойчиво наблю-

давшееся на промежутках времени до полугода, было установлено по результатам анализа временной серии цифровых карт по АДТ в секторе Южного океана к югу от Африки [10] и в термохалинных полях на гидрофизической съемке в центральной части пролива Дрейка в 2008 г. [8]. Критерий для ЮПТ-с-1 сформулирован нами, исходя из принципа построения критериев для южных струй АЦТ в табл. 1, на основе данных указанной съемки и результатов работы [8]. Классическому ПФ в табл. 1 соответствует ЮПТ-с-2. Отметим, что указанный в табл. 1 критерий идентификации ПФ, предложенный еще в 1963 г. Ботниковым [1], оставался, как это следует из анализа данных климатологии WOCE и поплавков Argo [21, 22], в целом справедливым на протяжении всей второй половины XX в. и начала XXI в. Именно это обстоятельство позволило в работе [6] проследить эволюцию температурных характеристик южных струй АЦТ. Для вновь выделенных нами в работе [9] струй в табл. 1 даны интервалы изменчивости температуры на глубине 400 м, что соответствует принципу построения критериев для струй САТ в [21]. Отметим также, что южная струя САТ (САТ-ю) и САТ-2 в табл. 1 в наших работах по сектору Южного океана к югу от Африки [9, 10] фигурировали под названиями САТ-1 и САТ-ю соответственно.

Поперечный струям водообмен (обеспечиваемый вихрями) и/или нарушение эквивалентно-баротропной структуры струй могут приводить к локальному изменению температурных свойств отдельных струй и, таким образом, к локальной неприменимости приведенных в табл. 1 критериев. В частности, особенностью сектора Южного океана, включающего в себя пролив Дрейка, является то, что подповерхностный минимум тем-

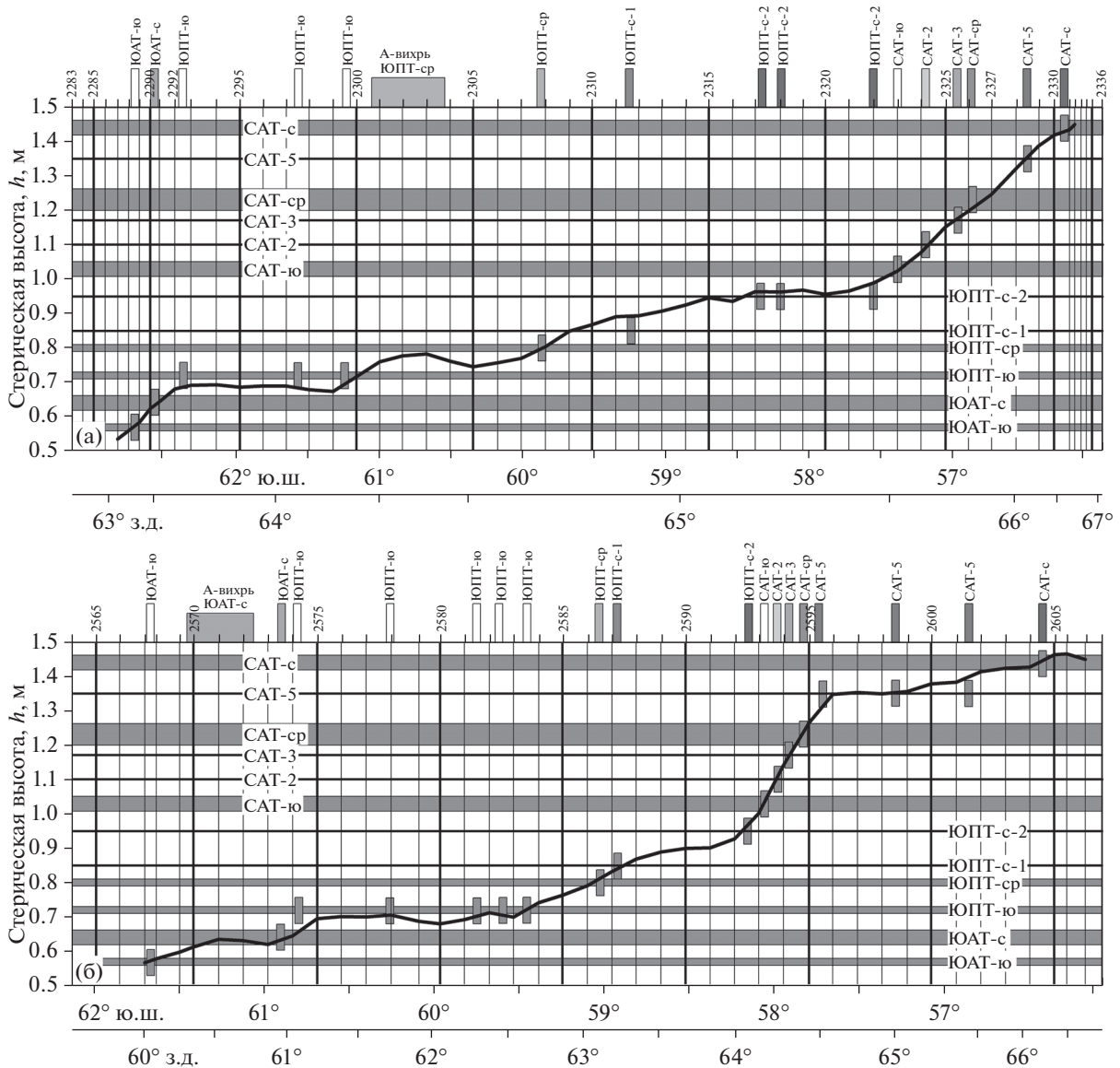


Рис. 5. Распределение стерической высоты (м) относительно отсчетного горизонта 1500 м: (а) на разрезе 2010 г., (б) на разрезе 2011 г. Остальное – как на рис. 2.

пературы или его следы могут, заглубляясь на ПФ под более теплые воды, проследиваться на север на большое расстояние, практически до материкового склона Южной Америки [18]. Эта особенность может приводить к неприменимости критерия Ботникова [1] в проливе Дрейка.

Второй набор критериев идентификации струй также был предложен в работе [21] и связан с привязкой осей струй к определенным изолиниям стерической высоты  $h$ , которая определяется как

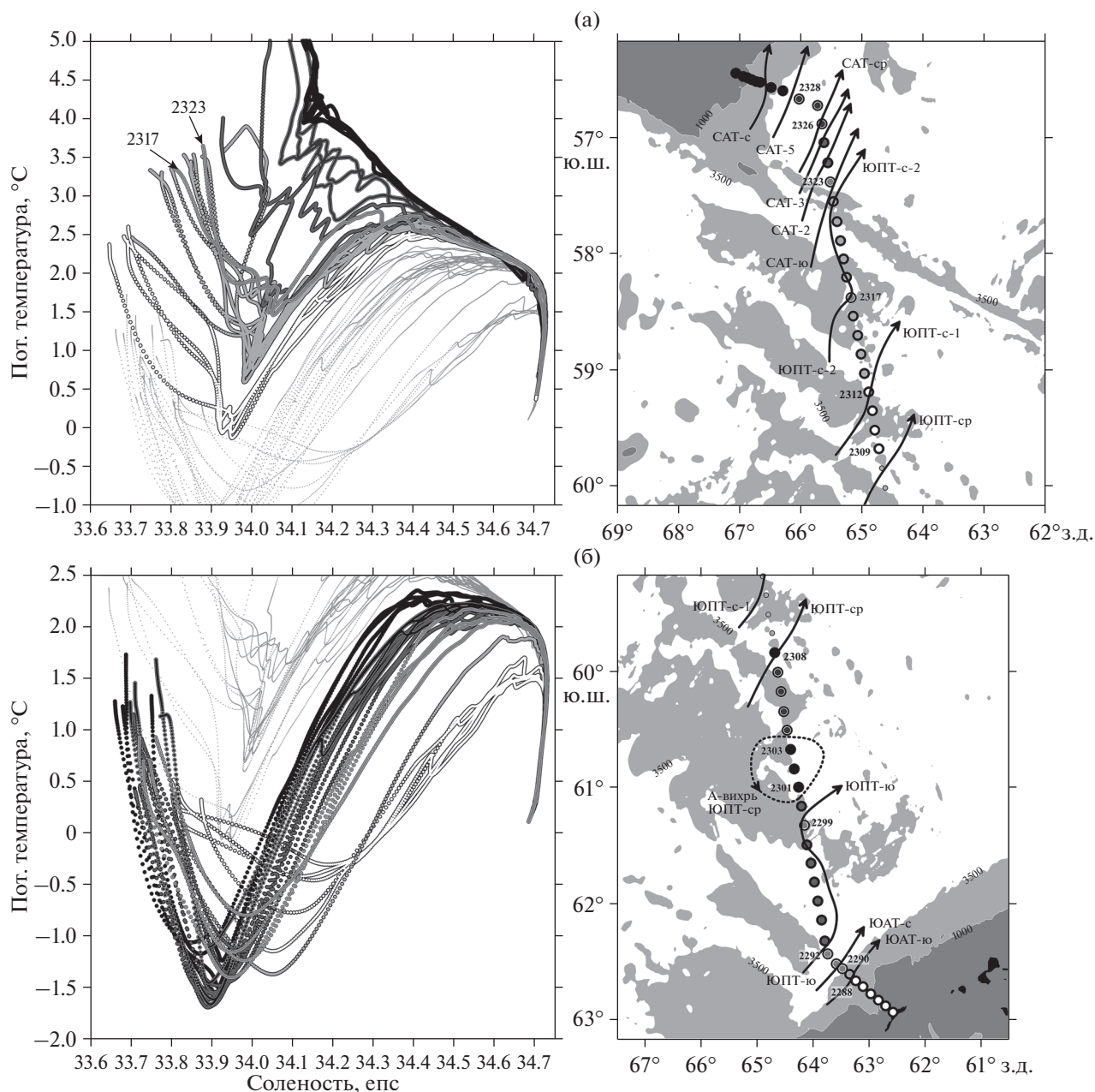
$$h = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho(0.35, p) - \rho(T, S, p)}{\rho(0.35, p)} dz,$$

где  $\rho$  – плотность как функция температуры ( $T$ ), солёности ( $S$ ) и давления ( $p$ ),  $z$  – глубина. Изоли-

нии стерической высоты представляют собой линии тока геострофических течений на горизонте  $z_2$  относительно горизонта  $z_1$ . В нашем случае  $z_1 = 1500$  м,  $z_2 = 0$ . В табл. 1 приведены соответствующие критерии из работы [22] и значения  $h$ , оцененные нами для YOPT-c-1 и YOPT-c-2 по данным съемки 2008 г. в центральной части пролива Дрейка и для дополнительных струй САТ по данным разреза к югу от Африки в декабре 2009 г. Распределения  $h$  вдоль разрезов 2010 и 2011 гг. приведены на рис. 5а и 5б соответственно.

Для идентификации отдельных струй АЦТ в проливе Дрейка на разрезах 2010 и 2011 гг., в дополнение к приведенным в табл. 1 критериям, использовался также и анализ  $\theta, S$ -кривых верхнего 500–800-метрового слоя океана (рис. 6, 7). На



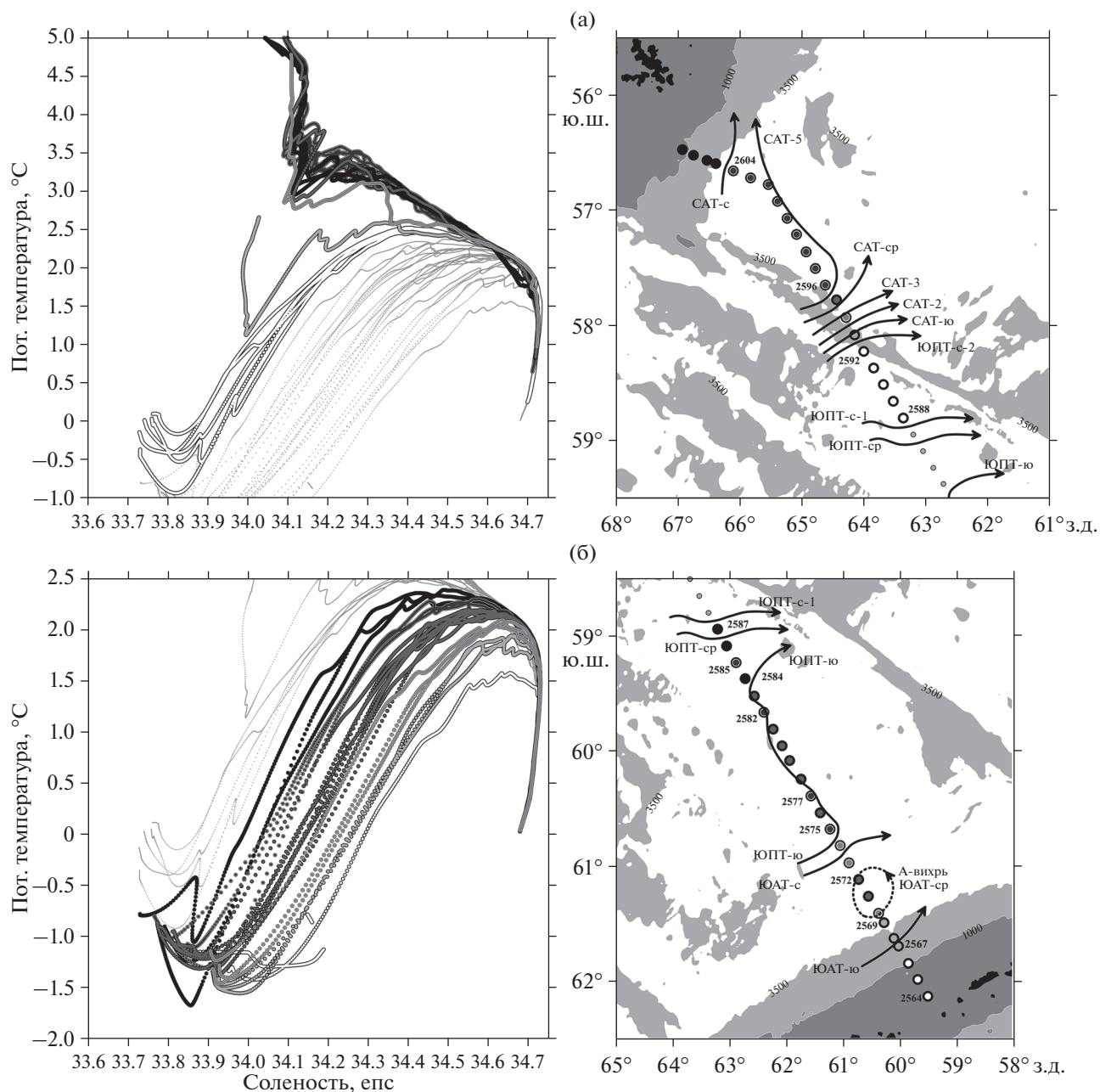


**Рис. 6.**  $\theta, S$ -кривые (слева) и схемы течений (справа) верхнего слоя океана на двух участках разреза января 2010 г.: северном (а) и южном (б).  $\theta, S$ -кривые сгруппированы по сходству формы в верхнем слое океана. Каждая группа показана жирными линиями в своем оттенке серого. Расположение соответствующих станций приведено справа крупными кружками в тех же оттенках. Тонкие линии слева и мелкие кружки справа относятся к оставшейся части разреза. А-вихрь – вихрь с антициклоническим направлением вращения. Темно- и светло-серым тонами на рисунках справа показаны районы с глубинами менее 1000 и 3500 м соответственно.

рис. 6 слева приведены  $\theta, S$ -кривые для двух участков разреза 2010 г., сгруппированные по сходству формы в верхнем 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 – оси струй и вихри. На рис. 7 сделано аналогично для разреза 2011 г.

#### 4. СТРУИ АЦТ НА РАЗРЕЗАХ В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА

Существенным моментом для выделения струй течений в настоящей работе, как и ранее в [9], является использование данных прямых измерений скорости течений с помощью SADCPR, причем не только на станциях, но и на переходах между ними. Необходимо подчеркнуть, что при этом учитывалась не только нормальная разрезу



**Рис. 7.**  $\theta$ - $S$ -кривые (слева) и схемы течений (справа) верхнего слоя океана на двух участках разреза октября—ноября 2011 г.: северном (а) и южном (б). Остальное — см. рис. 6.

составляющая скорости, но также и модуль скорости. На рис. 8 показаны распределения модуля скорости вдоль разрезов на глубине 60 м, а также выделены полосы, соответствующие индивидуальным струям, т.е. характеризовавшиеся локальными горизонтальными максимумами скорости. Перечисленные обстоятельства позволили, во-первых, выделить индивидуальные струи, ориентированные под малыми углами к направлению разреза, и, во-вторых, выявить более тонкую, чем это предполагается классификацией Соколова и

Ринтола [21], структуру струй АЦТ. При этом на разрезе 2010 г. было выявлено 11 индивидуальных струй, а в 2009 г. — 9 индивидуальных струй. Всем струям, пересекавшим разрезы под углом, близким к нормали, соответствовал увеличенный наклон изопикн (рис. 26, 36), что указывает на их геострофическую природу. Выделенные индивидуальные струи представляли собой различные комбинации струй АЦТ из нашей классификации [10]. В двух нижеследующих подразделах



выми участка станций 2293–2297 на северной периферии ЮПТ-ю. Подобная конфигурация ЮПТ-ю хорошо согласуется с картой АДТ (рис. 4а). На интервале станций 2308/2309 разрез пересекал скоростное ядро ЮПТ-ср (более 45 см/с на 60 м). Однако по сходству  $\theta, S$ -кривых (рис. 6б) ядро струи располагалось на интервале 2307/2308, что лучше согласуется с температурным критерием.

Для идентификации северных струй ЮПТ важно отметить, что на большем участке разреза, включавшем станции от 2309 до 2324, в подповерхностном слое минимума температуры (Зимней воды) наблюдалась вода холоднее 2.0°C, заглублявшаяся вплоть до 500 м на ст. 2324 (рис. 2а). Вместе с тем, на этом же участке на глубинах 400–700 м наблюдался слой теплой подповерхностной воды с температурой до 2.7°C и более, что не характерно для северной периферии ЮПТ. Эти обстоятельства, во-первых, указывают на то, что здесь в период, предшествующий времени измерений, имел место активный водообмен поперек струй АЦТ, во-вторых, делают невозможным использование температурных критериев идентификации струй на указанном участке разреза. Поэтому здесь струи идентифицировались по характерным для них значениям стерической высоты (табл. 1, рис. 5а). Скоростное ядро ЮПТ-с-1 (более 35 см/с на 60 м глубины) пересекало разрез между станциями 2311 и 2312 (рис. 8а). Поскольку пересечение имело место под острым углом, на этом интервале не наблюдалось максимума нормальной составляющей скорости течений (рис. 2в) и увеличенного наклона изопикн (рис. 2б). Исходя из того, что  $\theta, S$ -кривые станций к югу и к северу от ядра струи должны различаться, ядро ЮПТ-с-1 располагалось на интервале станций 2312/2313 (рис. 6б). На интервалах станций 2317/2318 и 2318/2319 разрез пересекало скоростное ядро (до 30–35 см/с на 60 м глубины) ЮПТ-с-2 (рис. 8а). Еще одно пересечение этой струи было слито в суперструю с САТ-ю с максимальными скоростями более 50 см/с на глубине 60 м на интервале станций 2322/2323 (рис. 2в, 8а). Еще один локальный горизонтальный максимум скорости (более 50 см/с на глубине 60 м) на интервале станций 2323/2324 (рис. 8а) был интерпретирован нами как ядро САТ-2. С увеличением глубины горизонтальные максимумы скорости САТ-2 смешались на точку станции 2324, а на глубинах более 400 м САТ-2 уже не идентифицировалась самостоятельным максимумом скорости (рис. 2в). Отметим, что ядро САТ-2 отделялось от расположенного южнее САТ-ю и от северных струй САТ подповерхностными горизонтальными минимумами скорости около 46 см/с в районе станции 2323 и на интервале станций 2324–2325 (рис. 8а).

Температурные критерии САТ-3, САТ-ср и САТ-5 не позволяют их однозначно идентифицировать на разрезе. Поэтому для них были исполь-

зованы критерии стерической высоты (рис. 5а, табл. 1). Струи САТ-3 и САТ-ср образовывали суперструю на участке разреза, включавшем станции 2325 и 2326 (рис. 2, 8а), с максимальными скоростями более 60 см/с. Ядро струи САТ-5 с максимальными скоростями более 40 см/с пересекало разрез между станциями 2328 и 2329, причем оно отделяло сходные по форме  $\theta, S$ -кривые прибрежной группы станций от сильно меняющихся кривых остальных струй САТ на участке 2324–2328 (рис. 6а). Крайняя северная струя на разрезе с максимальными скоростями более 30 см/с между станциями 2330 и 2331 была классифицирована как САТ-с по критерию стерической высоты, хотя температурному критерию она не удовлетворяет.

**4.2. Разрез в октябре–ноябре 2011 г.** Струя ЮАТ-ю, в хорошем согласии с температурным критерием, пересекала разрез между станциями 2267 и 2268 с максимальными скоростями до 20 см/с на глубине около 300 м (рис. 3в, 8б). Участок разреза, включавший станции 2570–2572, был интерпретирован нами как антициклонический вихрь ЮАТ-с, прежде всего, исходя из присущих ему стерических высот (табл. 1, рис. 5б). По температурным критериям (табл. 1) вихрь мог быть отнесен как к ЮАТ-с, так и к ЮПТ-ю. Струя ЮАТ-с была слита с ЮПТ-ю в суперструю в районе ст. 2574 с максимальными скоростями до 30 см/с на глубине 100 м (рис. 3в). Однако исходя из сходства  $\theta, S$ -кривых станций 2574 и 2573 (рис. 7б), а также в соответствии с температурными критериями, оси этих струй располагались между станциями 2574 и 2575 (рис. 3, 5б). Далее на север в зоне струи ЮПТ-ю располагался весь участок разреза вплоть до ст. 2583. Здесь, судя по разделению этого участка на две группы  $\theta, S$ -кривых (рис. 7б), а также в неплохом согласии с температурным критерием (табл. 1), ядро струи пересекало разрез несколько раз: обратное пересечение в районе ст. 2578, прямое – на интервале станций 2581/2582, обратное – на 2582/2583, и снова прямое на 2583/2584. Указанные положения ядер ЮПТ-ю хорошо согласуются с полем измеренной скорости, за исключением интервала станций 2582/2583, где возвратного течения не наблюдалось (рис. 3в). Такая особенность картины течений на разрезе может быть связана со смещением линий тока на поверхности океана (во времени по ходу выполнения разреза), происходящем при ориентации разреза вдоль струи. Максимальные скорости в ядре ЮПТ-ю достигали 30 см/с на глубине 60 м (рис. 8б). ЮПТ-ср и ЮПТ-с-1 образовывали в районе станций 2586 и 2587 суперструю с максимальными скоростями до 30 см/с на глубине 60 м. Положение этих струй хорошо согласуется с температурными критериями (табл. 1).



**Таблица 2.** Индивидуальные струи на разрезах как комбинации струй АЦТ

Струя АЦТ	Комбинации струй АЦТ в январе 2010 г.	Комбинации струй АЦТ в октябре–ноябре 2011 г.
САТ-с	САТ-с	САТ-с
САТ-5	САТ-5	САТ-5
САТ-ср	САТ-ср + САТ-3	САТ-5 + САТ-ср
САТ-3		
САТ-2	САТ-2	САТ-3 + САТ-2 + САТ-ю + ЮПТ-с-2
САТ-ю	САТ-ю + ЮПТ-с-2	
ЮПТ-с-2	ЮПТ-с-2	
ЮПТ-с-1	ЮПТ-с-1	ЮПТ-с-1 + ЮПТ-ср
ЮПТ-ср	ЮПТ-ср	
ЮПТ-ю	ЮПТ-ю	ЮПТ-ю
ЮАТ-с	ЮПТ-ю + ЮАТ-с + ЮАТ-ю	ЮПТ-ю + ЮАТ-с
ЮАТ-ю		ЮАТ-ю

Участок разреза, включающий станции 2588–2592, характеризовался сходством  $\theta, S$ -кривых (рис. 7). Причем на всем этом участке наблюдались течения восточной направленности с максимальными скоростями до 25 см/с на глубине 60 м на ст. 2589, минимальными до 10 см/с на станциях 2590 и 2591 и снова возрастанием до 18 см/с на ст. 2592 (рис. 8б). По глубине на этом участке наблюдалось уменьшение скорости в его южной части и, наоборот, возрастание в северной (рис. 3в). Перечисленные обстоятельства, а также “V”-образный ход изопикн в верхнем примерно 500-м слое (рис. 3б) позволяют предположить, что на упомянутом участке разрез пересекал антициклонический вихрь, поступательная скорость которого была выше орбитальной. Такая ситуация представляется вполне возможной, если вихрь, образованный из струи с относительно небольшими скоростями, оказывается захваченным в смежной области течением с большими скоростями. Описанный выше вихрь прилегал своей северной периферией к суперструе, образованной ЮПТ-с-2, САТ-ю, САТ-2 и возможно САТ-3, в районе станций 2593 и 2594 (рис. 3, 5б). Максимальные скорости суперструи превышали 80 см/с на глубине 60 м (рис. 8б). Положение этих струй хорошо согласуется с температурными критериями (табл. 1). Отметим, что ядро САТ-3 располагалось между станциями 2594 и 2595 и, таким образом, может быть отнесено и к другой суперструе, состоявшей из САТ-ср и САТ-5 и наблюдавшейся в районе станций 2595 и 2596 с максимальными скоростями более 75 см/с на глубине 200 м (рис. 3в).

Включение САТ-5 в эту суперструю обусловлено формальным температурным критерием (табл. 1). Кроме того, в зоне САТ-5 располагался еще один участок разреза, включающий станции от 2599 до 2602, с течениями, почти параллельными разрезу, и максимальными скоростями более 40 см/с на 60 м глубины на интервале станций 2601/2602 (рис. 8б). Такая конфигурация струи САТ-5 по отношению к разрезу хорошо согласуется с подъемом изопикн к северу на участке станций 2597–2598 (рис. 3б), наблюдавшимся в слое от поверхности до примерно 1000 м глубины. Отсутствие на этом участке выраженного возвратного течения может быть связано, как и в случае с ЮПТ-ю, со смещением линий тока на поверхности океана (во времени по ходу выполнения разреза), при расположении трассы разреза примерно вдоль струи. Наконец еще одна струя над склоном Южной Америки была классифицирована как САТ-с в согласии с критерием стерической высоты, несмотря на несоответствие температурному критерию. Максимальные скорости САТ-с достигали 25 см/с на глубине 60 м (рис. 8б).

**4.3. Сравнение струйных структур АЦТ на разрезах 2010 и 2011 гг.** В табл. 2 для сравнения приведены комбинации струй АЦТ, из которых состояли индивидуальные струи, выявленные на разрезах 2010 и 2011 гг. Как видно из этой таблицы, струи АЦТ были слиты вместе в различных сочетаниях на каждом из этих разрезов. Таким образом, представляется важным подчеркнуть, что для интерпретации струйной структуры АЦТ в проливе Дрейка девятиструйной классифика-

ции АЦТ [21] оказывается недостаточно. Наиболее примечательно в этой связи выделение САТ-5 в индивидуальную струю даже в поле абсолютных геострофических течений (см. рис. 5б в [3] и рис. 6б в [4], где эта струя была классифицирована как северное САТ). Отметим также наличие в проливе Дрейка САТ-с в качестве индивидуальной струи, в т.ч. и в поле абсолютных геострофических течений (в [3] и [4] эта струя была классифицирована как течение мыса Горн). Напомним в этой связи, что, согласно [21] САТ-с в проливе Дрейка не существует. На обоих разрезах наблюдалось разделение ЮПТ-с на отдельные ЮПТ-с-1 и ЮПТ-с-2. В качестве индивидуальных эти струи пересекали разрез 2010 г. под малым углом, поэтому их наличие в поле нормальной разрезу компоненты абсолютной геострофической скорости не просматривается (см. рис. 5б в [3] и рис. 6б в [4]). В 2010 г. ЮПТ-с-2 была слита с САТ-ю в еще одном пересечении. В 2011 г. ЮПТ-с-1 и ЮПТ-с-2 были раздельны, но слиты в суперструю соответственно с ЮПТ-ср и с САТ-ю, САТ-2, САТ-3. Из новых струй, по отношению к классификации [21], в качестве индивидуальной струи выделялась еще САТ-2, но только в поле измеренных скоростей.

Еще одной особенностью струйной структуры АЦТ на исследованных разрезах в проливе Дрейка является нарушение температурных критериев табл. 1, связанное с поперечным струям водообменом. Такое нарушение было наиболее ярко выражено в январе 2010 г., когда температурные критерии не работали по указанной причине в отношении 4 струй — ЮПТ-с-1, ЮПТ-с-2, САТ-ю, САТ-2. В январе 2010 г. и в октябре—ноябре 2011 г. не работал температурный критерий для САТ-с, что, видимо, связано с влиянием относительно холодных (в сравнении с другими секторами Южного океана) и опресненных вод прибрежной зоны южного Чили. По всей вероятности, эта особенность является постоянной для САТ-с в проливе Дрейка. В соответствии со способом построения температурных критериев в табл. 1, оценки потенциальной температуры в ядре САТ-с на разрезах 2010 и 2011 гг. составили  $4.52^{\circ}$ – $4.58^{\circ}$ С.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На гидрофизических разрезах января 2010 г. и октября—ноября 2011 г. выявлена тонкая структура АЦТ, состоявшая из 11 индивидуальных струй в 2010 г. и 9 индивидуальных струй в 2011 г. Эти индивидуальные струи в проливе Дрейка на каждом из разрезов представляли собой различные комбинации 12 струй АЦТ, выделенных нами ранее к югу от Африки [9, 10]. Полученные оценки тонкой структуры АЦТ в проливе Дрейка и наши результаты по струйной структуре АЦТ к югу от Африки [9, 10] позволяют предположить, что

многоструйная структура с числом струй большим, чем это предполагается в работе [21], является обычной для всего циркумполярного круга даже для районов значительного сужения АЦТ, таких как пролив Дрейка. Однако вопрос о количестве струй и его постоянстве во времени и пространстве остается открытым. Для его решения необходимо, в частности: (1) — проведение площадных гидрофизических съемок подобных съемке ИО РАН 2008 г. в проливе Дрейка [8]; (2) — применение вероятностно-статистического анализа для получения траекторий струй на поверхности океана по спутниковой альтиметрии аналогичного анализу, выполненному нами по району к югу от Африки [10]; (3) — провести сравнительный анализ струйной структуры АЦТ, полученной по гидрофизическим съемкам, с результатами вероятностно-статистического анализа; (4) — оценить пространственно-временную устойчивость выявленной струйной структуры по спутниковым данным. В будущем предполагается проведение таких работ.

Работа над статьей в части анализа данных разрезов поддержана темой Госзадания № 0149-2018-0003, в части анализа данных спутниковой альтиметрии — грантом РНФ № 14-50-00095.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ботников В.Н.* Географическое положение зоны антарктической конвергенции в Южном океане // Информационный бюллетень Советской Антарктической экспедиции. 1963. № 41. С. 19–24.
2. *Бурков В.А.* Антарктические струи // Океанология. 1994. Т. 34. № 2. С. 169–177.
3. *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.
4. *Кошляков М.Н., Гладышев С.В., Тараканов Р.Ю., Федоров Д.А.* Течения в проливе Дрейка по данным наблюдений в октябре—ноябре 2011 г. // Океанология. 2013. Т. 53. № 1. С. 5–16.
5. *Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* Водные массы и циркуляция Южного океана. — Л.: Гидрометеиздат; 1986. 288 с.
6. *Тараканов Р.Ю.* Южные струи Антарктического циркумполярного течения в восточной части тихоокеанской Антарктики // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 627–638.
7. *Тараканов Р.Ю.* Море Скотия и пролив Дрейка как орографический барьер для Антарктического циркумполярного течения // Океанология. 2012. Т. 52. № 2. С. 176–189.
8. *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.
9. *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.
10. *Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М.* Тонкая струйная структура Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 6. С. 725–736.
  11. *Berloff P., Kamenkovich I., Pedlosky J.* A Model of Multiple Zonal Jets in the Oceans: Dynamical and Kinematical Analysis // *J. Phys. Oceanogr.* 2009. V. 39. № 11. P. 2711–2734.
  12. *Budillon G., Rintoul S.R.* Fronts and upper ocean thermal variability south of New Zealand // *Antarct. Sci.* 2003. V. 15. № 1. P. 141–152.
  13. *Egbert G.D., Erofeeva S.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *J. Atmos. Ocean Tech.* 2002. V. 19. № 2. P. 183–204.
  14. *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.
  15. *Killworth P.D., Hughes C.W.* The Antarctic Circumpolar Current as a free equivalent barotropic jets // *J. Mar. Res.* 2002. V. 60. № 1. P. 19–45.
  16. *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.
  17. *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.
  18. *Peterson R.G., Whitworth III 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.
  19. *Sokolov S., Rintoul S.R.* Structure of Southern ocean fronts at 140° E // *J. Mar. Syst.* 2002. V. 37. № 1–3. P. 151–184.
  20. *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.
  21. *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
  22. *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
  23. *Sparrow M.D., Heywood K.J., Brown J., Stevens D.P.* Current structure of the south Indian Ocean // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № C3. P. 6377–6392.

## Jets of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage According to Hydrophysical Sections

R. Yu. Tarakanov, A. M. Gritsenko

Fine jet structure of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage is investigated on the basis of CTD- and SADC- measurements in two hydrophysical sections executed in January 2010 and October–November 2011. Eleven jets with a local horizontal velocity maximum were revealed in 2010, and nine jets were in 2011. These individual jets were various combinations of twelve jets of the Antarctic Circumpolar Current, which we revealed earlier in the region south of Africa. Satellite altimetry data published on the website <http://www.avisio.altimetry.fr> were also used for the interpretation of a synoptic pattern of currents.