

УДК 551.465

## СТРУИ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПРОЛИВА ДРЕЙКА ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2008 г.

© 2014 г. Р. Ю. Тараканов

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: rtarakanov@gmail.com*

Поступила в редакцию 25.09.2012 г.

На основе данных STD- и LADCP-зондирования океана во время гидрофизической съемки с 10-мильным пространственным разрешением, выполненной в октябре–ноябре 2008 г. в центральной части пролива Дрейка, анализируется горизонтальная структура струй Антарктического циркумплярного течения (АЦТ). Показано, что в свете современной многоструйной классификации АЦТ район съемки охватывал зоны трех струй Южного полярного течения (ЮПТ) – средней ветви АЦТ. При этом наблюдалась тонкая горизонтальная термохалинная структура струй течения, проявившаяся даже в случае слияния отдельных струй в “суперструю”.

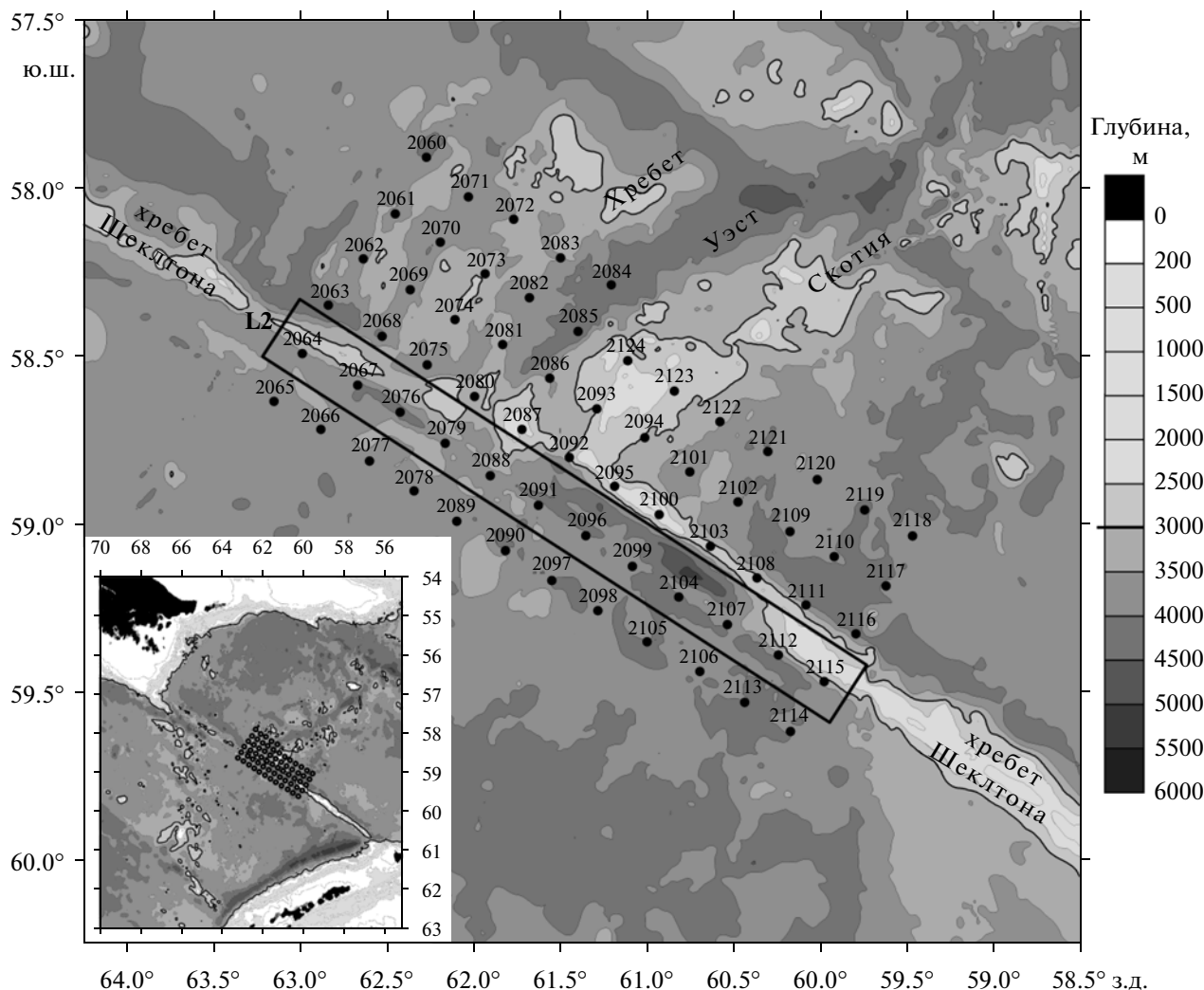
DOI: 10.7868/S0030157414010109

В развитие проводившихся Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН в 2003–2007 гг. экспедиционных исследований в проливе Дрейка [4, 1], 23 октября–3 ноября 2008 г. на НИС “Академик Сергей Вавилов” была выполнена гидрофизическая съемка в центральной части пролива (рис. 1). Выбор места съемки (район схождения хребтов Шеклтона и Уэст-Скотия) и схема расположения станций (ориентация разрезов вдоль и поперек хребта Шеклтона) были продиктованы основной целью проведения работ – исследованием влияния рельефа дна на структуру глубинных течений [2]. Всего было выполнено 65 станций. Расстояние между соседними станциями на каждом разрезе составляло 10 морских миль. Последовательность номеров станций на рис. 1 показывает маршрут выполнения съемки. На каждой станции осуществлялось зондирование океана до дна STD (электропроводность–температура–глубина)-зондом SeaBird-911+ в комплекте с двумя закрепленными на зонде акустическими доплеровскими профилографами течения (LADCP) RDI Workhorse Sentinel, 300 kHz, расположенными соосно и ориентированными излучающими поверхностями соответственно вверх и вниз. Более подробные сведения о выполненных в рейсе гидрофизических измерениях приведены в работе [2].

В настоящей работе на основе данных гидрофизической съемки 2008 г. в проливе Дрейка рассматривается структура абсолютных геострофических течений и термохалинных полей в поверхностном слое океана. Абсолютные геострофические течения рассчитываются динамическим методом с баротропной поправкой, определяемой по данным LADCP, как для точек станций, так и для центров

квадратов, образованных четырьмя соседними станциями. Векторы скорости на глубине 100 м рассчитанных таким способом течений показаны на рис. 2. Подробно алгоритм расчета течений описан в работе [2]. Структура течений анализируется, исходя из современной концепции многоструйности Антарктического циркумплярного течения (АЦТ), развитой в работах [11, 12]. Согласно этой концепции, в полосе опоясывающего Антарктиду с запада на восток и проникающего практически до дна АЦТ выделяются (в терминологии работы [3]) три струи в зоне Субантарктического течения (САТ), три – Южного полярного течения (ЮПТ), две – Южного антарктического течения (ЮАТ). Выделяется также струя, связанная с Южной границей АЦТ. Отметим, что средняя струя САТ и северная струя ЮПТ соответствуют Субантарктическому и Полярному (ПФ) фронтам в классической трехструйной классификации АЦТ [7].

Как было отмечено в работе [2], район съемки 2008 г. располагался в зоне классического ПФ. Распределение потенциальной температуры к югу от ПФ в теплый период года (т.е. в период выполнения съемки) всегда характеризуется наличием минимума и максимума температуры в подповерхностном слое (например, [8]). Слой минимума формируется в результате зимнего охлаждения на поверхности океана и в летний период перекрывается сверху более теплым летним перемешанным слоем и сезонным термоклином. Слой максимума является наведенным между более холодными вышележащими поверхностными и нижележащими глубинными водами. Вода в этом слое имеет происхождение из низкоширотных



**Рис. 1.** Расположение и номера станций гидрофизической съемки 23 октября–3 ноября 2008 г. в центральной части пролива Дрейка. Прямоугольником выделено сечение разреза L2. Показан рельеф дна океана по данным [10], изобата 3000 м выделена жирной линией.

глубинных вод Тихого и Индийского океанов [8]. В зоне, прилегающей к ПФ с севера, как правило, наблюдается перестройка вертикальных профилей температуры в сторону монотонного понижения температуры с глубиной. Особенностью сектора Южного океана, включающего в себя пролив Дрейка, является то, что подповерхностный минимум температуры или его следы могут, заглубляясь под более теплые воды, проследиваться на север на большое расстояние, практически до материкового склона Южной Америки [9].

В работе [11] для идентификации выделенных ее авторами струй АЦТ было предложено несколько групп температурных критериев, которые были получены с использованием статистического анализа климатического массива WOCE (World Ocean Circulation Experiment) и базы данных поплавков Argo. Анализ был выполнен по отдельности для каждого из массивов данных. Для

южных струй АЦТ, основываясь на описанных выше особенностях вертикального распределения температуры к югу от ПФ, были сформулированы критерии идентификации, связывающие струи с пределами распространения некоторых конкретных изотерм 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 [5], в которой было показано, что, во-первых, критерии на основе свойств подповерхностного минимума температуры не могут быть получены для всего циркумполярного круга из-за сильной зависимости свойств зимнего поверхностного слоя от локальных условий его формирования, и, во-вторых, база данных Argo отра-

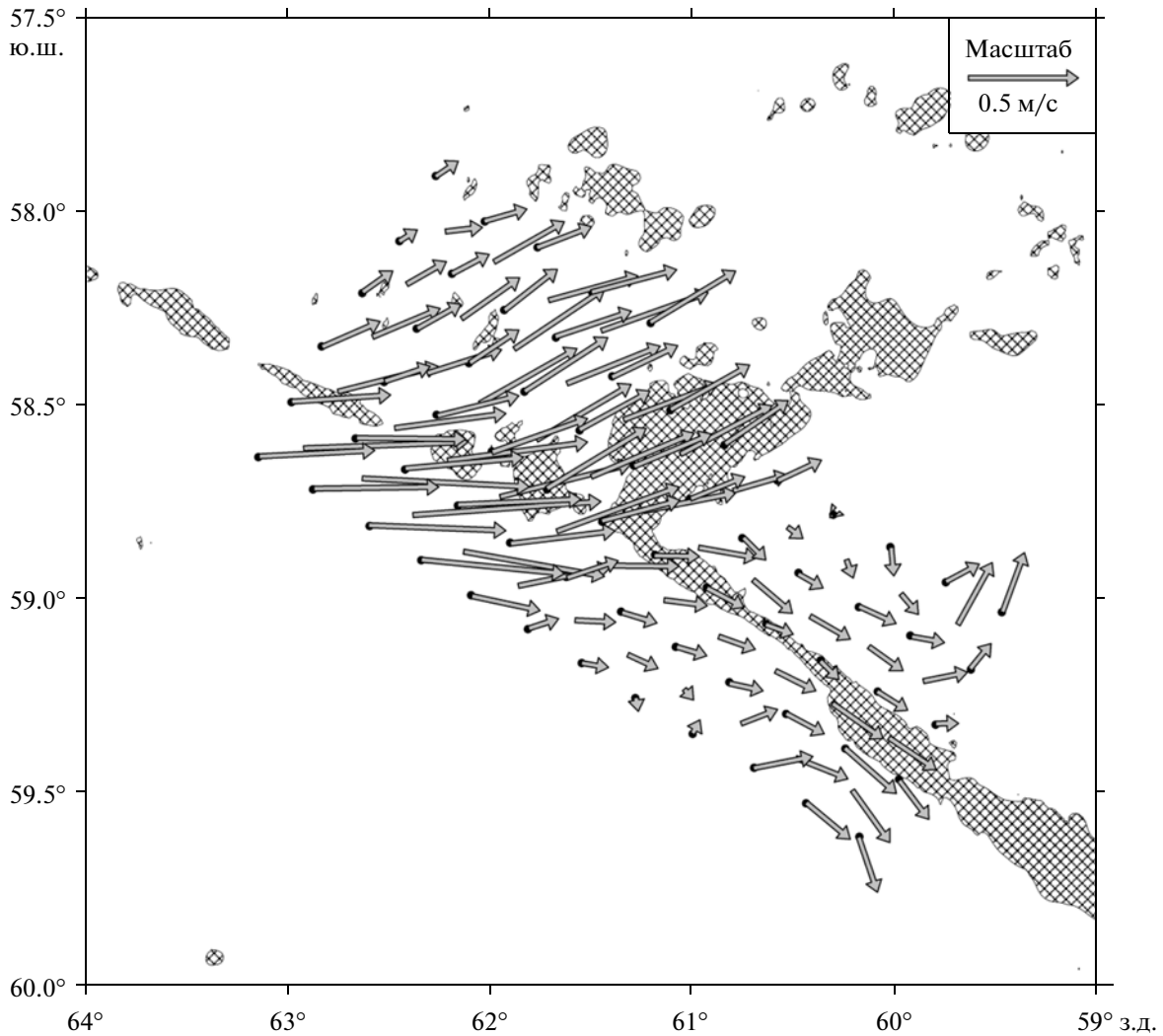


Рис. 2. Векторы скорости течения на глубине 100 м [2]. Заштрихована область с глубиной менее 3000 м.

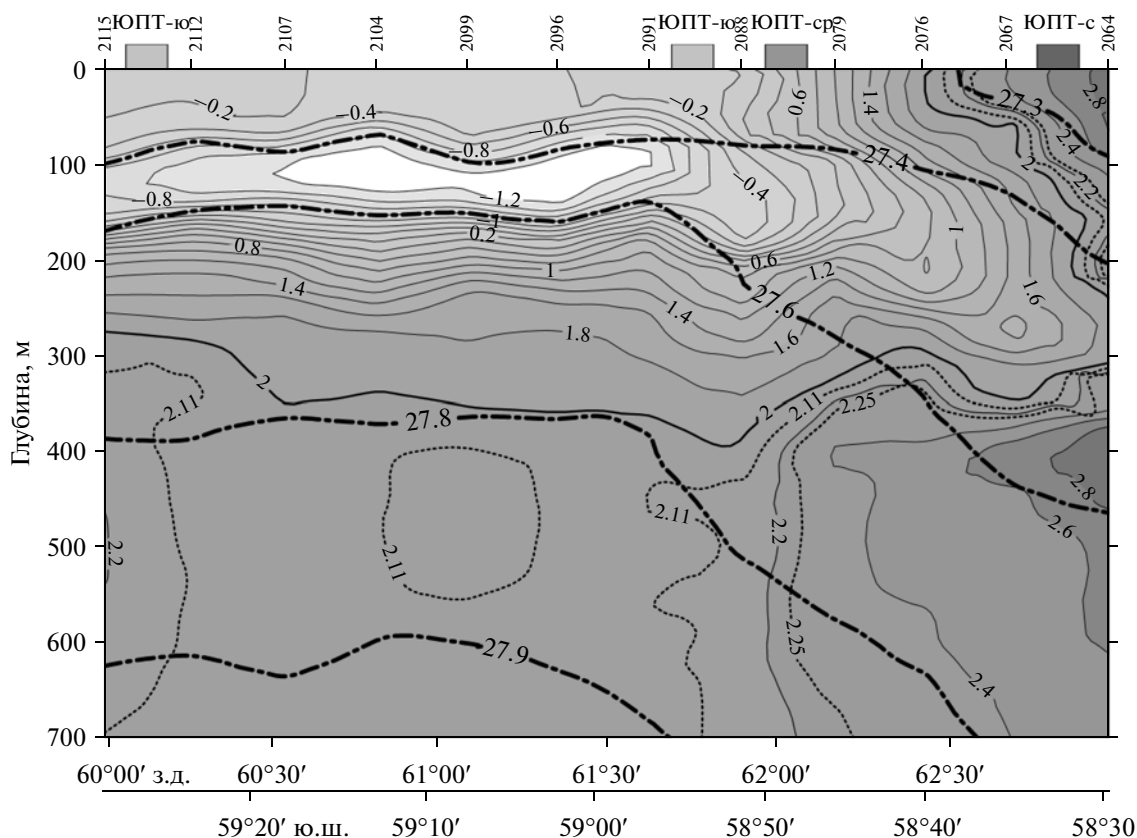
жает, по отношению к массиву WOCE, температурный тренд к потеплению в слое максимума температуры в зоне каждой из южных струй АЦТ, имевший место, по крайней мере, с середины 1990-х до середины 2000-х гг. Напомним, что проект Argo получил развитие в середине 2000-х гг., съемка в центральной части пролива Дрейка была выполнена в 2008 г., а полевая фаза программы WOCE закончилась в первой половине 1990-х гг.

Схема расположения станций съемки 2008 г. (рис. 1) предполагает анализ трехмерной структуры гидрофизических полей. Исходя из этого, струи выделялись по увеличенному наклону изопикнических поверхностей, а не изолиний плотности, как в случае двумерной структуры на разрезе. Анализ распределений температуры и плотности показал, что в свете классификации [11] район съемки охватывал три струи ЮПТ – южную (ЮПТ-ю), среднюю (ЮПТ-ср) и северную (ЮПТ-с). На рис. 3 для примера приведены рас-

пределение потенциальной температуры  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и положение нескольких изолиний нейтральной плотности  $\gamma^n$  в верхнем 700-метровом слое океана на разрезе L2 (см. рис. 1). Напомним, что ней-

Критерии определения положения струй АЦТ [11]

Струи АЦТ	Критерий определения	$\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
САТ южное	$\theta$ на $p = 400$ дб	$2.78 \pm 0.15$
ЮПТ северное	$\theta$ на $p = 200$ дб	$1.98 \pm 0.14$
ЮПТ среднее	$\theta$ в $\theta_{\max}$	$2.25 \pm 0.07$
	$\theta$ в $\theta_{\min}$	$1.15 \pm 0.16$
ЮПТ южное	$\theta$ в $\theta_{\max}$	$2.11 \pm 0.09$
	$\theta$ в $\theta_{\min}$	$0.98 \pm 0.22$
ЮАТ северное	$\theta$ в $\theta_{\max}$	$1.93 \pm 0.16$
	$\theta$ в $\theta_{\min}$	$0.00 \pm 0.23$



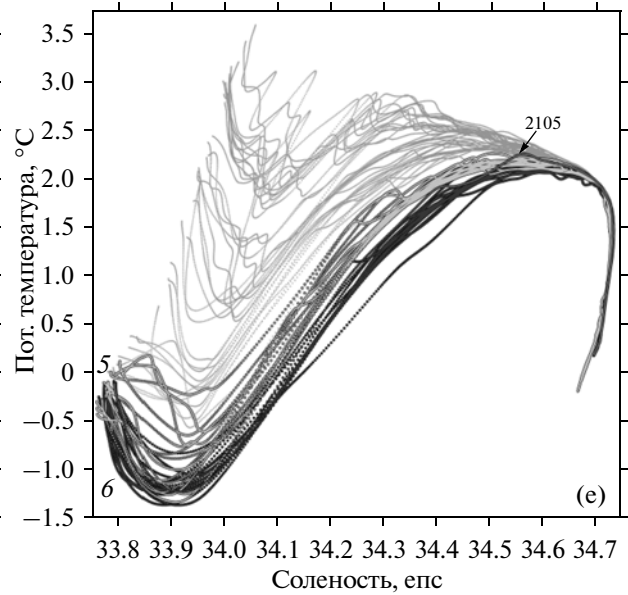
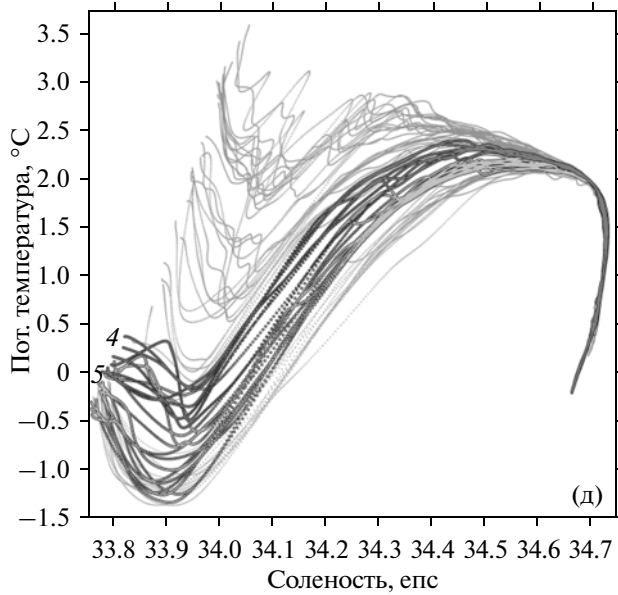
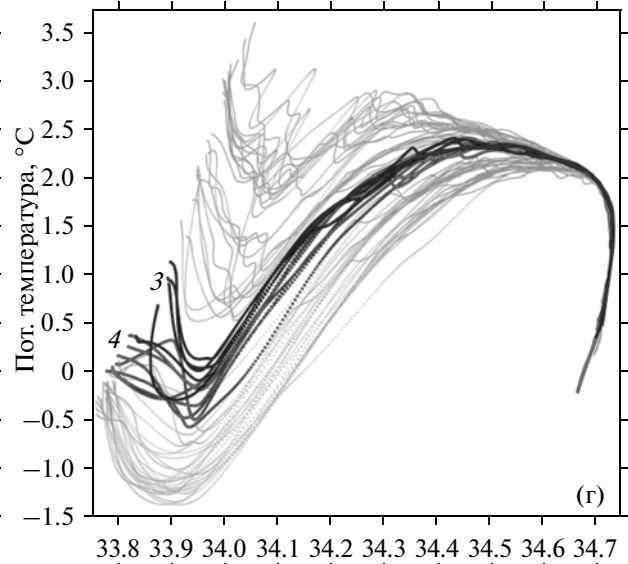
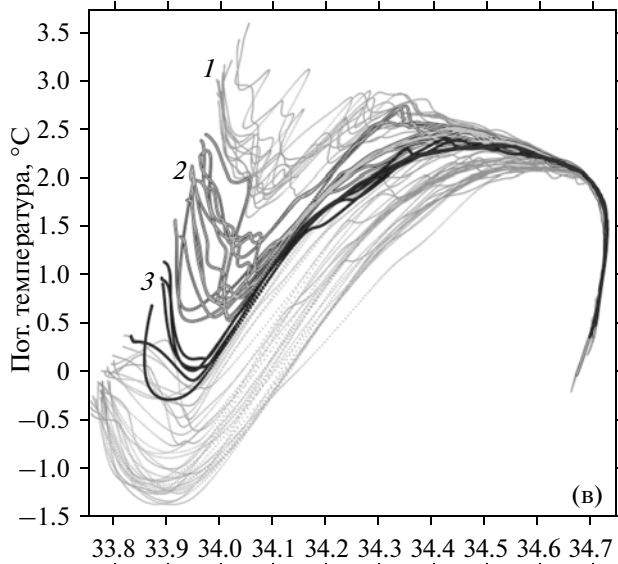
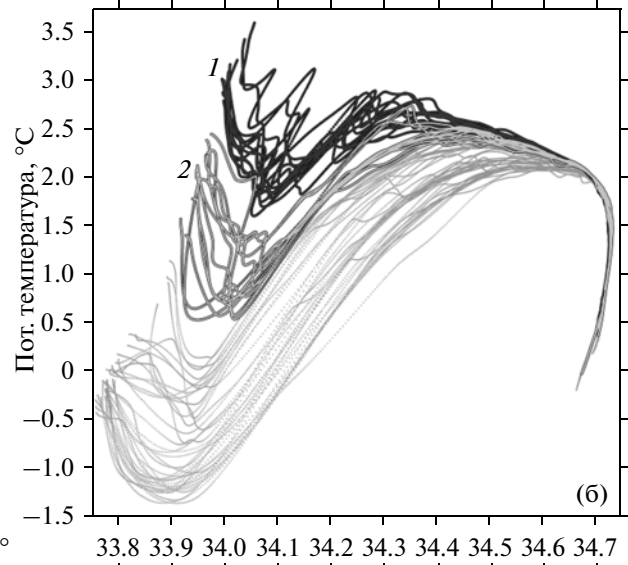
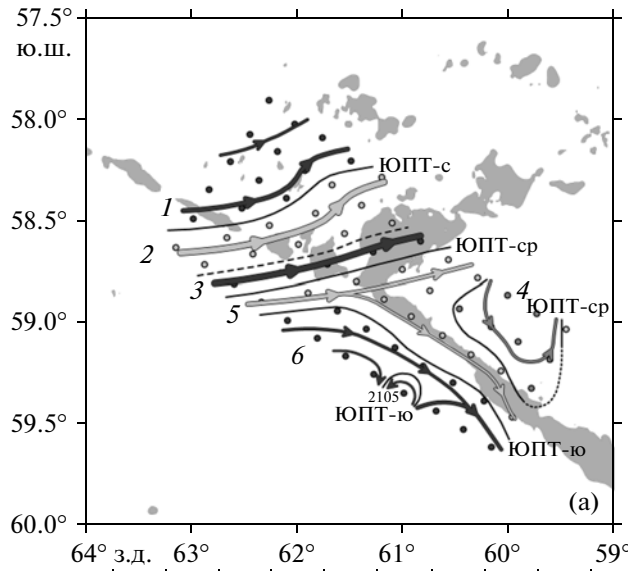
**Рис. 3.** Распределение потенциальной температуры  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и изолинии нейтральной плотности  $\gamma^{\sigma}_t$  в верхнем 700-метровом слое океана на разрезе L2 (см. рис. 1). На верхней оси отмечено положение осей струй ЮПТ.

тральная плотность  $\gamma^{\sigma}_t$  определяется из условия отсутствия работы против силы Архимеда при движении жидких частиц вдоль изоповерхностей этой плотности [6]. Положение осей струй на линии разреза L2 в соответствии с критериями их идентификации (таблица) отмечено на рис. 3 на верхней оси. На рис. 4а показано положение осей струй по всей области съемки. Схема течений на рис. 4а построена на основании распределения векторов абсолютных геострофических скоростей на глубине 100 м (рис. 2), а также с учетом приведенных на рис. 4б–4е  $\theta, S$ -кривых всех 65 станций гидрофизической съемки.

На всех станциях съемки, как к югу, так и к северу от ПФ, наблюдались подповерхностные минимум и максимум температуры (рис. 3, 4б–4е). Максимум температуры менял свое положение по глубине примерно от 400 м к югу (т.е. справа по ходу течения) от оси ЮПТ-ю до 500–550 м прак-

тически на всех станциях к северу от ПФ. В области съемки к югу от ЮПТ-ю вышележащий минимум температуры, характеризовавшийся экстремально низкими значениями потенциальной температуры (до  $-1.3^{\circ}\text{C}$ ), располагался на глубинах 100–200 м (рис. 3, 4б–4е). На северной стороне ПФ (оси ЮПТ-с) минимум заглублялся до 300–350 м, а значения  $\theta$  повышались до  $2.0$ – $2.2^{\circ}\text{C}$  (рис. 3, 4б–4е). Отметим, что приведенные температурные характеристики слоя минимума температуры в зоне ЮПТ находятся в противоречии с оценками  $\theta$  для этой же зоны, полученными в работе [11] (таблица). Это противоречие подтверждает вывод работы [5] о сильной зависимости свойств подповерхностного минимума температуры вдоль южных струй АЦТ от локальных условий формирования этого минимума. Такая зависимость прослеживается даже в районе съемки. В частности, значения  $\theta$  в слое минимума темпера-

**Рис. 4.** Схема поверхностных течений (а) и  $\theta, S$ -кривые 65 станций съемки 2008 г. (б–е); нумерация групп  $\theta, S$ -кривых и цветовая кодировка станций и стрелок на рис. 4а соответствуют нумерации и кодировке на рис. 4б–4е. На рис. 4б–4е более жирными линиями выделены  $\theta, S$ -кривые групп 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 4 и 5, 5 и 6 соответственно. На рис. 4а приведены также линии осей отдельных струй ЮПТ; штриховая линия разграничивает зоны, соответствующие группам 2 и 3. Толщина стрелок примерно пропорциональна скорости течения; затемнена область с глубиной менее 3000 м.



туры в зоне между ЮПТ-ср и ЮПТ-ю менялись в широком диапазоне от  $-0.2^{\circ}\text{C}$  до  $-1.2^{\circ}\text{C}$ .

Векторы геострофических скоростей в подповерхностном слое (рис. 2) и схема расположения осей струй ЮПТ (рис. 4а) показывают, что при 10-мильном пространственном разрешении съемки ЮПТ-с и ЮПТ-ср были слиты в “суперструю” без очевидного снижения скорости в зоне между ними. Максимальные скорости в этой суперструе достигали 70 см/с у поверхности океана. В восточной части съемки струя ЮПТ-ср образовывала антициклонический вихрь. Струя ЮПТ-ю, фактически слитая западнее хребта Шеклтона с указанной суперструей, отклонялась этим хребтом в юго-восточном направлении. По формальному температурному критерию, в районе станции 2105 в южной части съемки находился антициклонический вихрь (или периферия вихря) ЮПТ-ю. Поле скорости (рис. 2) не разрешает этого вихря, но и не противоречит его существованию.

Примечательно, что оси струй разбивают область съемки на зоны, характеризующиеся сходством формы  $\theta, S$ -кривых в верхнем примерно 700-метровом слое океана (рис. 4б–4е). При этом в зоне между осями ЮПТ-с и ЮПТ-ср горизонтальная термохалинная структура оказывается еще более тонкой; здесь выделяются две группы  $\theta, S$ -кривых. На рис. 4а зоны, соответствующие этим двум группам, разделены штриховой линией. Таким образом, всего в районе съемки было выделено шесть групп. Некоторые станции съемки характеризуются  $\theta, S$ -кривыми, имеющими промежуточную между отдельными группами форму, которая проявляется, как правило, в виде взаимных интрузий. Группы 1 и 2, соответствующие северному и южному флангам ЮПТ-с, очень хорошо разделяются в верхнем слое океана, включающем подповерхностный минимум температуры (рис. 4б). В слое подповерхностного максимума различие проявляется большей соленостью в точке максимума температуры, отмечаемой в группе 2. Группы 2 и 3 демонстрируют различия в слоях обоих экстремумов (рис. 4в). В группе 3, которая соответствует северному флангу ЮПТ-ср, наблюдается дальнейшее увеличение солености в точке максимума температуры. Группы 3 и 4 близки по форме (рис. 4г), но разделены географически. Группа 4 представляет собой уже упоминавшийся выше антициклонический вихрь ЮПТ-ср в восточной части съемки (рис. 4а). Группа 5 соответствует зоне между ЮПТ-ср и ЮПТ-ю (рис. 4а). Ее свойства в слое минимума температуры меняются от свойств групп 3 и 4 до свойств группы 6 (рис. 4д, 4е). Однако она выделяется очень четко по отношению к остальным группам в слое максимума температуры. Группа 6 соответствует южному флангу ЮПТ-ю (рис. 4а). Внутри этой группы необходимо отдельно отме-

тить станцию 2105. Значения  $\theta$  в слое максимума температуры на ее  $\theta, S$ -кривой выглядят лишь как интрузия вод из группы 5 (или даже 4) (рис. 4е). “V”-образный наклон изоцикн на разрезах, проходящих через эту станцию (не даны в статье), выделяет ее в качестве самостоятельного антициклонического вихря, который был классифицирован нами выше как вихрь ЮПТ-ю (рис. 4а).

Сетка гидрофизической съемки 2008 г. с 10-мильным пространственным разрешением, с учетом ее конфигурации и ориентации относительно струй АЦТ (рис. 4а), эквивалентна разрезу, выполненному поперек течения с разрешением станциями не хуже, чем 2 мили. В этом случае наблюдавшееся разбиение  $\theta, S$ -кривых станций съемки на группы по сходству их формы равносильно ступенеобразному изменению гидрофизических свойств на таком разрезе. Отметим, что проявление ступенеобразной структуры на индивидуальном разрезе съемки (пример на рис. 3) отнюдь не очевидно. Таким образом, представляется важным подчеркнуть, что обнаружение тонкой горизонтальной термохалинной структуры АЦТ, проявившейся даже в условиях слияния отдельных струй течения в “суперструю”, как в описанном выше случае ЮПТ-с и ЮПТ-ср, стало возможным только благодаря проведению пространственной съемки.

В заключение сформулируем основные выводы работы:

1. Район гидрофизической съемки 2008 г., с точки зрения многоструйной классификации [11], охватывал зоны трех струй Южного полярного течения.
2. В районе съемки 2008 г. наблюдалась тонкая горизонтальная термохалинная структура трех струй Южного полярного течения, проявившаяся даже в случае слияния двух из них в “суперструю”, т.е. без очевидного снижения скорости в зоне между слитыми струями.
3. Подтвержден вывод работы [5] о сильной зависимости свойств подповерхностного минимума температуры вдоль южных струй Антарктического циркумполярного течения от локальных условий формирования этого минимума.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 12-05-00277а и № 12-05-00131а), программы № 23 фундаментальных исследований Президиума РАН и Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8132). Экспедиция 2008 г. проводилась в рамках межведомственного проекта “Меридиан-плюс”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладышев С.В., Кошляков М.Н., Тараканов Р.Ю.* Течения в проливе Дрейка по данным наблюдений 2007 г. // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 6. С. 821–833.
2. *Кошляков М.Н., Гладышев С.В., Тараканов Р.Ю., Рыжиков Н.И.* Глубинные течения в центральной части пролива Дрейка по данным съемки 2008 г. // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 6. С. 869–876.
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., Лусина И.И., Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю.* Абсолютные геострофические течения в проливе Дрейка по наблюдениям 2003 и 2005 гг. // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 4. С. 487–500.
5. *Тараканов Р.Ю.* Южные струи Антарктического циркумполярного течения в восточной части тихоокеанской Антарктики // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 627–638.
6. *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.
7. *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.
8. *Patterson S.L., Whitworth III T.* Antarctic sector of the Pacific // *Elsevier Oceanography Series*. 1989. V. 51. P. 55–93.
9. *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.
10. *Smith W.H.F., Sandwell D.T.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // *Science*. 1997. V. 277. P. 1956–1962.
11. *Sokolov S., Rintoul S.R.* The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part 1: Mean circumpolar paths // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C11018, doi: 10.1029/2008JC005108.
12. *Sokolov S., Rintoul S.R.* The circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts. Part 2: Variability and relationship to sea surface height // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C11019, doi: 10.1029/2008JC005248.

## Jets of the Antarctic Circumpolar Current in the Central Part of the Drake Passage Based on the Data of Hydrographic Survey in October–November 2008

R. Yu. Tarakanov

The horizontal structure of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) is analyzed on the basis of CTD- and LADCP-measurements of a hydrographic survey executed in October–November 2008 in the central part of the Drake Passage. It is shown that the survey area covered the zones of the three jets of the South Polar Current (SPC), which is the middle jet of the ACC, according to the concept of the modern multi-jet classification of the ACC. Fine horizontal structure of the SPC jets was observed which was manifested even in the case of the confluence of the separated jets into a “superjet”.