

УДК 551.465

СТРУКТУРА И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕВЕРНОЙ ВЕТВИ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА

© 2023 г. С. А. Остроумова^{1, 2, *}, И. Д. Дрозд^{1, 3, 4}, Д. И. Фрей^{1, 5, 6}¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия⁵Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия⁶Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*e-mail: ost.sophisticated@gmail.com

Поступила в редакцию 06.11.2022 г.

После доработки 14.02.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

Антарктическое циркумполярное течение играет ключевую роль в циркуляции Южного океана и влияет на перераспределение тепла океаном в глобальном масштабе. Изучение динамики и структуры этого течения становится особенно актуальным в условиях изменяющегося климата. Течение хорошо проявляется по данным спутниковой альтиметрии, что позволяет исследовать изменчивость его структуры во времени и пространстве на различных масштабах. В этих задачах на первый план выходит методика определения положения отдельных фронтов Антарктического циркумполярного течения на основе данных спутниковой альтиметрии. В данной работе мы сравниваем различные подходы к выделению фронтов. Для этого на основе данных спутниковой альтиметрии с 1993 по 2020 гг. и результатов гидрофизического разреза, выполненного на НИС «Академик Мстислав Келдыш» через северную часть пролива Дрейка в феврале 2020 г., рассмотрена структура самой северной ветви Антарктического циркумполярного течения — Субантарктического фронта и его пространственно-временная изменчивость. Для оценки динамики фронта выбран участок трека спутниковых альтиметров TOPEX/Poseidon, Jason-1,2,3 от острова Огненная Земля на юг длиной в 350 км. Представлены критерии для определения положения северной и главной ветвей Субантарктического фронта на базе данных спутниковой альтиметрии. Обнаружен многолетний тренд смещения положения фронтов относительно ранее принятых уровней абсолютной динамической топографии. Установлено, что точность определения положения фронтов по фиксированным значениям динамической топографии со временем может снижаться, в частности, из-за изменения среднего уровня моря. Обнаружен статистически значимый многолетний тренд повышения уровня моря в районе Субантарктического фронта со скоростью 4 мм/год для северной ветви и 2.5 мм/год для основной.

Ключевые слова: Субантарктический фронт, Антарктическое циркумполярное течение, спутниковая альтиметрия, струи, пролив Дрейка

DOI: 10.31857/S0030157423040160, **EDN:** YLQMSW

1. ВВЕДЕНИЕ

Между Антарктическим полуостровом и Огненной Землей в проливе Дрейка проходит Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ), являющееся самым мощным течением в Мировом океане и характеризующееся сильными градиентами плотности, температуры и солености [1, 13, 32, 34, 35, 40]. На основе гидрологических измерений ранее была предложена классическая классификация фронтов АЦТ. Согласно этой

классификации, в АЦТ выделяют три основных фронта: Субантарктический фронт (САФ), Полярный фронт, Южный фронт АЦТ, а также Южную границу АЦТ [35]. Основываясь на данных спутниковой альтиметрии, результатах натурных измерений и данных буйковых станций Argo, Соколов и Ринтул [42, 43] описали разделение АЦТ на девять струй: у Субантарктического течения и Южного Полярного течения было выделено по три струи, у Южного антарктического течения — две, и течение Южной границы АЦТ рассматри-

валось как самостоятельная ветвь. В работах [4–7] проанализированы гидрофизические разрезы к югу от Африки и долговременный ряд карт абсолютной динамической топографии (АДТ), выявлено 12 струй АЦТ. Многоструйная структура АЦТ хорошо просматривается в регионах с широкими глубоководными котловинами. В проливе Дрейка струи сливаются, образуя несколько более сильных струй [41].

Согласно классификации фронтов, представленной в работе [10], САФ разделяется на главную (САФ-гл) и северную (САФ-с) ветви. В этой же работе было предложено определять положение фронтов по фиксированным значениям изолиний АДТ 23 см (САФ-с) и –10 см (САФ-гл). САФ-с, подходя к южной оконечности Южной Америки, прижимается к шельфу у Огненной Земли, далее следует по изобате 300 м на северо-восток, распространяется между банкой Бердвуд и Фолклендскими/Мальвинскими островами и далее следует на север, прижимаясь к континентальному склону Южной Америки. Стоит отметить, что вариативность положения САФ сильно зависит от направления, наклона и ширины континентального склона, согласно исследованию на основе натурных измерений и спутниковых наблюдений в районе Патагонского шельфа [22]. Ширина северной ветви течения в среднем составляет 10–20 км, максимальные скорости могут достигать 40–50 см/с [7, 9, 21, 33]. Течение, наблюдаемое вдоль главной ветви САФ, составляет 150 км по ширине. Фронт имеет большую амплитуду смещения по пространству. Наибольшие скорости течения у поверхности могут достигать 75 см/с [7, 21], а на глубине 1000 м – 30 см/с [19]. Исследование ветвей САФ-с и САФ-гл в этом месте представляет особый интерес, поскольку соответствующие течения переносят антарктические воды далеко на север вдоль континентального склона. Взаимодействие этих вод с теплыми водами Бразильского течения приводит к активной генерации вихрей, что во многом определяет биологические процессы в обширном регионе Юго-Западной Атлантики [3, 23, 30]. Кроме этого, взаимодействие САФ-с с континентальным склоном Южной Америки определяет структуру апвеллинга на шельфе Патагонии [28, 37].

Спутниковые наблюдения особенно важны для исследования Южного океана, поскольку постоянные судовые наблюдения в этом регионе остаются крайне редкими. АЦТ хорошо проявляется на спутниковой альтиметрии по данным АДТ поверхности океана. Положения фронтов АЦТ можно определить как по данным измерений вдоль треков спутников, так и по интерполированным на регулярную сетку данным. Альтиметрия показывает, что географическое распределение течений и их изменчивость сильно зависят от рельефа дна [12, 22]. Авторы работ [27, 42] изучили струк-

туру АЦТ в проливе Дрейка, используя альтиметрические данные и гидрофизические измерения, что позволило обнаружить связь между сильными течениями и максимумами градиента АДТ. Необходимо отметить, что определение положения ветвей течений с помощью спутниковой альтиметрии содержит определенные неточности, поскольку ширина фронтов мала по сравнению с пространственным разрешением спутниковых альтиметров [20], а быстрое изменение положения фронтов не всегда можно отследить из-за недостаточного разрешения по времени. Как правило, подобные массивы данных сглаживают положение фронта, особенно с увеличением осреднения по времени [4], и могут уменьшать предполагаемую скорость течения.

Определение фронтов по фиксированным изолиниям уровня моря является темой для дискуссий, особенно в региональных исследованиях. Локальные изменения уровня моря и повышение температуры океана требуют особого внимания при определении положения фронтов по фиксированным изолиниям температуры или АДТ. Исследование смещения АЦТ к югу от Африки на основе альтиметрических данных за 26 лет показало в среднем сдвиг поля сильных градиентов всех ветвей АЦТ на 0.05° широты в северном направлении, однако отдельно отмечается сдвиг САФ к югу [44]. Смещение главных ветвей АЦТ ранее исследовалось в работах [25, 26] на основе альтиметрии на регулярной сетке с использованием массива данных с 1993 по 2012 гг. Поскольку уровень моря непрерывно растет, важным моментом является постоянное отслеживание актуальной обстановки. Спутниковая альтиметрия на регулярной сетке имеет разрешение 0.25° по широте и долготе, что может являться недостаточным для исследования тонкой структуры и изменчивости ветвей АЦТ. Кроме этого, фильтрация массива данных может уменьшать точность данных в прибрежной зоне. Вдольтрековая альтиметрия позволяет точнее идентифицировать положение фронтов и отследить изменчивость их положения во времени.

В данной работе рассматривается структура фронтов САФ-с и САФ-гл в районе пролива Дрейка и их пространственно-временная изменчивость по данным аномалий уровня моря и АДТ на основе вдольтрековой спутниковой альтиметрии. Для анализа вертикальной термохалинной структуры САФ-с были использованы результаты STD-зондирования поперек материкового склона. Вертикальная кинематическая структура САФ-с и САФ-гл исследовалась по данным бортового профилографа скорости течений. В работе также определены критерии среднего положения ветвей САФ-с и САФ-гл на основе современных данных альтиметрии и долговременные тренды смещения этих фронтов в пространстве.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Исследование структуры и изменчивости САФ выполнено на основе натурных и спутниковых данных. Подробное описание натурных данных приведено в разделе 2.1; описание спутниковой альтиметрии представлено в разделе 2.2; в разделе 2.3 описан метод определения фронтов по данным вдольтрековой альтиметрии.

2.1. Судовые измерения

Натурные данные получены в 79-ом рейсе НИС *“Академик Мстислав Келдыш”* Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН 6 февраля 2020 года [31]. В ходе рейса выполнен разрез бортовым акустическим доплеровским профилографом скорости течений (SADCP, Shipborne Acoustic Doppler Current Profiler) попутно с юго-востока на северо-запад к острову Огненная Земля через САФ-с и САФ-гл для получения данных о скоростях течений в верхнем слое до глубины 800 м. Кроме этого, через САФ-с выполнено 11 станций с зондированиями розеткой SBE 32 (Carousel Water Sampler), оснащенной CTD-зондом SBE 19plus SEACAT фирмы SeaBird. Расстояние между станциями варьировалось между 5.6 и 12 км. Описание гидрологического разреза приведено в работе [29].

CTD-зонд непрерывно сканирует водную толщу с частотой 4 Гц. Профилирование проводилось со средней скоростью 1 м/с, что дает приблизительно четыре измерения на метр. Данные обработаны в программе SBE Data Processing версии 7.26.7.129 по стандартному протоколу, осреднены и интерполированы с шагом в 1 м.

Распределения скоростей течений в верхнем слое океана (до 800 м) по ходу движения судна определялись с помощью установленного на судне SADCP Ocean Surveyor фирмы TRDI с частотой 76.8 кГц. Вертикальное разрешение получаемого профиля скорости составляет 8 м; скорости течений измеряются в 100 точках (ячейках) по вертикали. Осадка судна составляет 6 м, слепая зона (параметр Blank Distance) — 8 м, что дает 18 м от поверхности до центра первой ячейки данных. Для регистрации данных, оперативного контроля и последующего анализа использовались программы VmDas версии 1.46 и WinADCP версии 1.14. Сырые данные измерений осреднялись по времени с шагом 2 минуты. Скорость судна составляла от 8 до 10 узлов, что соответствует горизонтальному разрешению около 500 м. При обработке данных бортового профилографа скорости вычтены приливные компоненты скорости по модельным данным TPX09 [15]. Отфильтрованы данные в придонном слое толщиной в 15% глубины в связи с ошибками, вызванными отражением акустического сигнала от дна.

2.2. Спутниковая альтиметрия

Вдольтрековые спутниковые данные взяты с ресурса Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>, дата обращения 29.11.2021) из массива данных SEALEVEL_GLO_PHY_L3_MY_008_062 (уровень обработки L3), содержащего данные аномалий уровня моря и значения средней динамической топографии вдоль подспутниковых треков отдельных альтиметров. Альтиметрическую информацию для данного массива в настоящий момент предоставляет миссия спутника Jason-3, которая имеет постоянную орбиту, повторяющую один и тот же трек с периодом в 9 дней 21 ч 58 мин. Пространственный шаг между точками измерений составляет 6.2 км вдоль трека; расстояние между подспутниковыми треками в исследуемом районе — 155 км. Данный спутник выполняет миссию с 26.05.2016 по настоящее время. Ранее на этих же треках работали Topex/Poseidon (1993–2002), Jason-1 (2002–2008) и Jason-2 (2008–2016). Общее время вдольтрековых наблюдений на постоянных орбитах с 1 января 1993 года составляет 28 лет. Для анализа временной изменчивости САФ выбран трек № 28, ближайший к разрезу с натурными измерениями, ориентированный практически параллельно треку судна и находящийся на расстоянии около 45 км от разреза.

Для оценки пространственного распределения градиентов АДТ мы использовали массив данных SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047, представленный на регулярной сетке с пространственным разрешением в 0.25° по широте и долготе, шагом по времени в одни сутки с первого января 1993 года. Этот массив данных включает измерения со всех доступных альтиметров, интерполированных по времени и пространству на регулярную сетку. Недостатком таких данных является сглаживание градиентов уровня моря на фронтах и соответствующее уменьшение геострофических скоростей течений. Несмотря на это, использование альтиметрии с регулярным разрешением помогает оценить пространственную структуру фронтов и вихрей с постоянным шагом по времени [7, 17, 18, 20, 21].

2.3. Критерий определения САФ по вдольтрековой альтиметрии

В настоящее время существует несколько критериев для определения фронтальных зон и струй АЦТ на основе спутниковой альтиметрии. Для САФ-с авторы работы [10] предлагают использовать изолинию АДТ 23 см, в работе [2] с этой целью использовали изолинию 25 см. Главную ветвь в работе [10] определяли по изолинии —10 см, в работе [2] — по 0 см. Чурин [8] выделяет САФ по фиксированной изолинии АДТ, равной 12 см, в

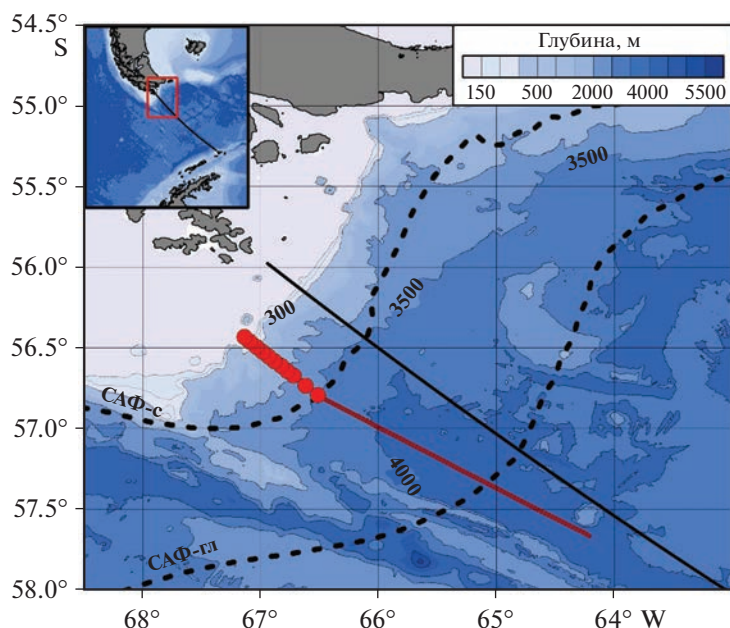


Рис. 1. Рельеф дна в северной части пролива по данным GEBCO, 2021 [24]. Станции гидрофизического разреза 6 февраля 2020 г. показаны красными точками, маршрут НИС «Академик Мстислав Келдыш» во время попутных измерений скоростей течений бортовым профилографом скорости — красной линией. Черной сплошной линией отмечен подспутниковый трек № 28 Топех/Poseidon (1993—2002), Jason-1 (2002—2008), Jason-2 (2008—2016), Jason-3 (с 2016 по настоящее время). Черными штриховыми линиями показано положение САФ-с и САФ-гл по данным средней динамической топографии согласно [10].

работе [45] использовали для этого изолинию 12.2 см. Кроме этого, в данной работе использовался критерий определения положения фронта по максимуму градиента уровня. Для этого проводилась предварительная обработка вдольтрековых данных альтиметрии, которая подробно описана ниже.

Процесс обработки вдольтрековых альтиметрических измерений до уровня L3 включает фильтрацию данных [14], поэтому некоторые треки содержат неполный набор точек измерений. Часто отсутствуют результаты измерений в шельфовой зоне, над глубинами менее 200 м. Поскольку пространственный шаг вдоль трека составляет 6.2 км, а ширина САФ-с в среднем равна 10–20 км [21, 29], было важно оставить для дальнейшего анализа наиболее полные треки. В связи с этим для анализа не использовались треки, содержащие пропуски в двух и более точках подряд. Кроме этого, были выбраны треки, заполненные на 90% и с имеющимися непрерывными измерениями над континентальным склоном. По итогам очистки данных от неполных треков для подробного анализа осталось 780 из 942 пролетов спутников за промежуток времени с 10.02.1993 по 03.06.2020.

Спутники радиовысотных измерений получают альтиметрические данные о мгновенной аномалии уровня океана относительно средней по

времени динамической топографии поверхности океана. Так как аномалии уровня не определяют скорость геострофических течений, на первом шаге необходимо рассчитать значения АДТ вдоль интересующего трека. Для этого производится сложение аномалий уровня моря со средней динамической топографией, взятой из массива вдольтрековой альтиметрии. В проливе Дрейка наблюдается понижение уровня АДТ с повышением широты. Места наиболее резкого наклона морской поверхности соответствуют высоким скоростям геострофических течений, поэтому для определения фронта мы рассматривали только локальные отрицательные максимумы градиента (положительные значения градиента соответствуют увеличению уровня с увеличением модуля широты), превышающие 25 мм/км, согласно [42]. САФ-с следует изобате 300 м вдоль континентального шельфа и редко отходит от него дальше изобаты 3500 м [36, 39]. Исходя из этого, мы определяли САФ-с только в случаях, когда максимум градиента находился между указанными глубинами. Проявление следующего сильного градиента после изобаты 3500 м указывало на положение САФ-гл.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственная структура фронтов в северной части пролива Дрейка была исследована на

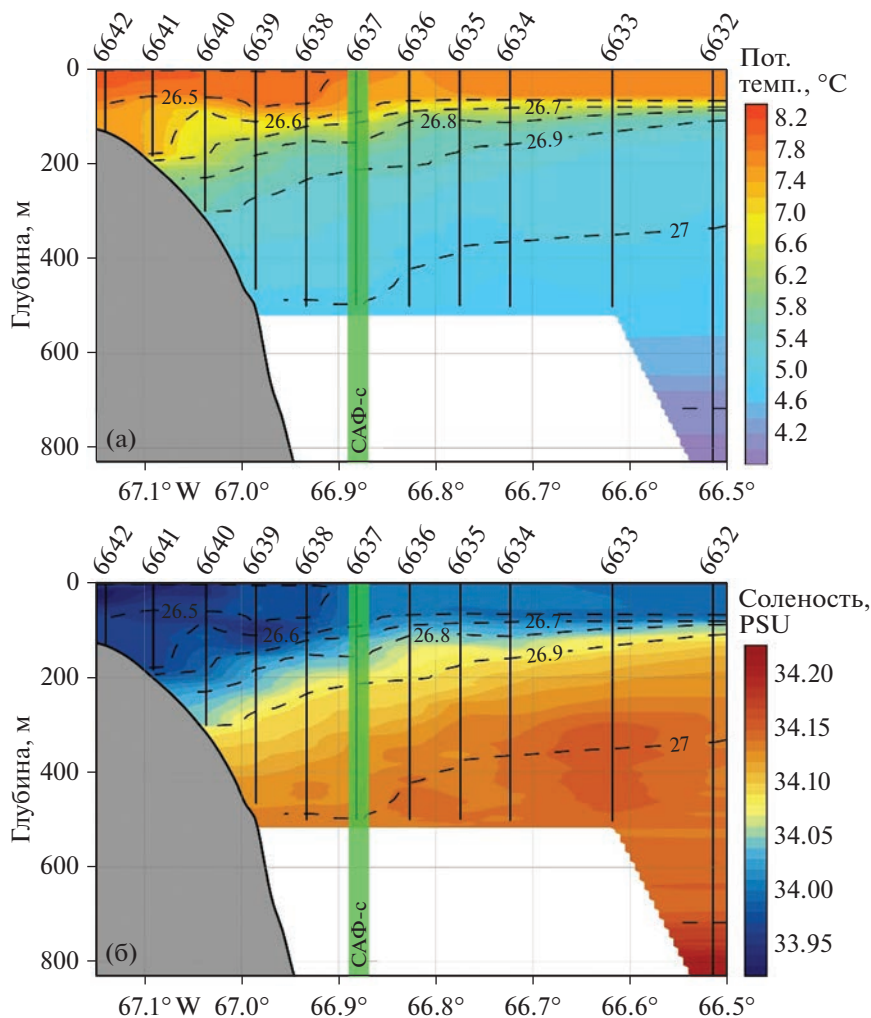


Рис. 2. Распределение потенциальной температуры (а) и солёности (б) на разрезе через САФ-с, выполненный 06.02.2020. Изолинии потенциальной плотности показаны штриховыми линиями. Вертикальными линиями отмечено положение STD-станций; номера станций указаны вдоль верхней оси. Зеленой полосой показано положение САФ-с, соответствующее максимуму градиента АДТ по данным альтиметрии на регулярной сетке на 06.02.2020 в соответствии с критерием [10]. Большинство станций выполнялось до глубины 500 м; станции 6639–6642 на глубине, меньшей 500 м, выполнялись до дна; измерения на станции 6632 были проведены до глубины 832 м.

основе натурных данных, в то время как временная изменчивость положения фронтов САФ-с и САФ-гл анализировалась на основе данных спутниковой альтиметрии. В разделе 3.1. рассмотрено распределение температуры, солёности и скоростей течений по результатам натурных измерений. Результаты определения положения фронта по максимуму градиента уровня представлены в разделе 3.2. Многолетние и сезонные смещения ветвей САФ рассмотрены в разделе 3.3.

3.1. Вертикальная структура САФ

Разрезы температуры и солёности приведены на рис. 2а, 2б. Наблюдается сильный наклон изотерм и изохалин к материковому склону; верхний слой океана в зоне над континентальным склоном

характеризуется более слабой вертикальной стратификацией, чем в открытой части океана. Верхний перемешанный слой на станциях 6632–6636 составляет 50 м, увеличиваясь по мере приближения к шельфу. На станции 6640 по данным судового профилографа скорости отмечено ядро течения, также в этом месте наблюдается слабый вертикальный градиент температуры. На горизонте 100 м температура составляет 6.9°C, на горизонте 200 м — 6.3°C (средний вертикальный градиент в этом слое равен 0.006°C/м). Вне течения, на станции 6632, градиент более сильный. С 50 до 100 м температура падает на 2°C, что соответствует вертикальному градиенту 0.04°C/м. Разрез солёности показывает аналогичное распределение вертикальных градиентов. В верхнем перемешанном слое солёность составляет менее 34 psu,

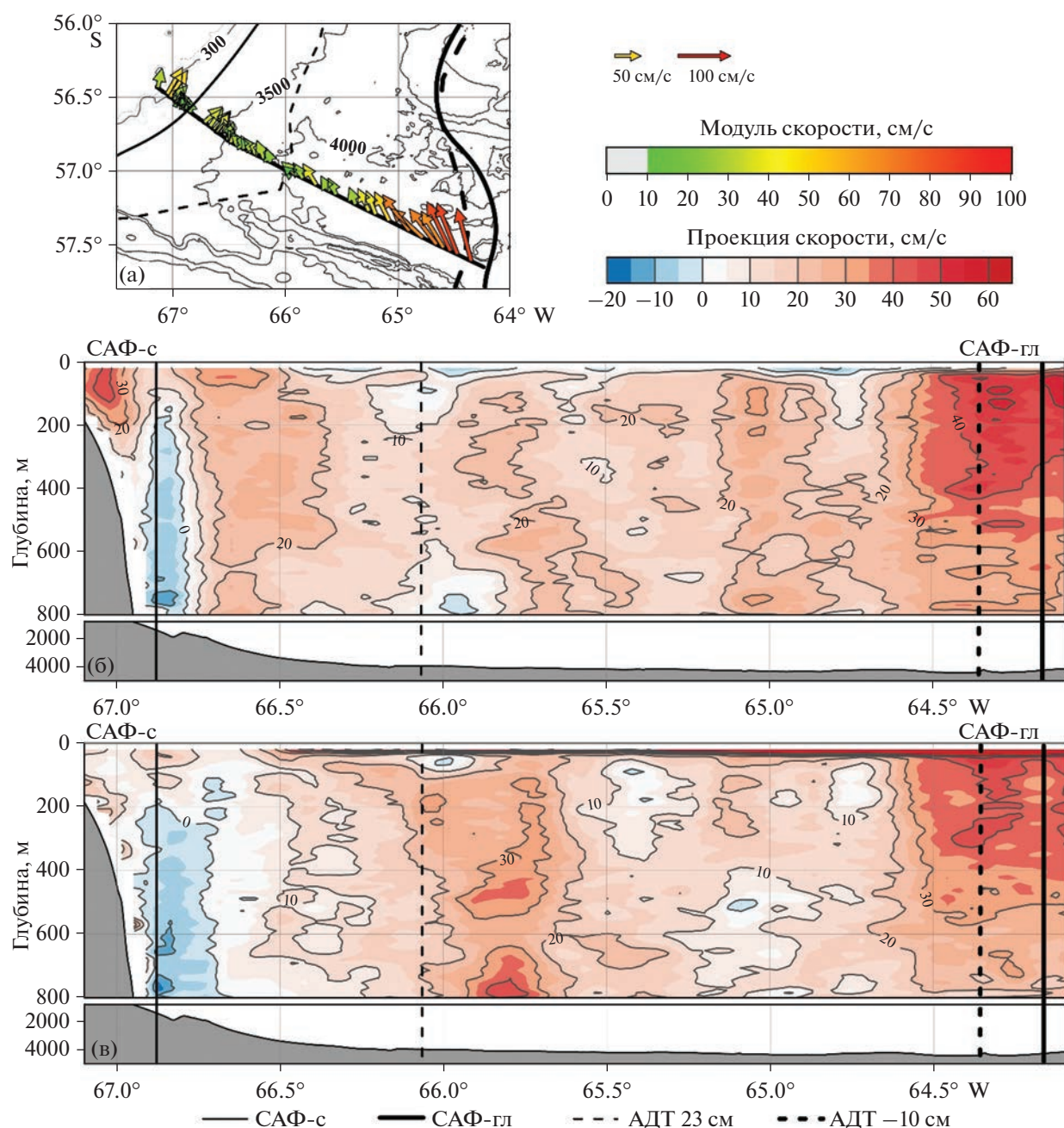


Рис. 3. Результаты натурных измерений скоростей течений с помощью SADC в северной части пролива Дрейка. (а) Скорости течений, измеренные бортовым профилографом скорости, в осредненном верхнем 50-метровом слое. (б) Распределение скоростей течения вдоль изобаты 300 м (направление 47°). Положительные скорости показаны красным цветом, направлены северо-восток. (в) Распределение скоростей течения поперек изобаты 300 м (направление 317°). Положительные скорости показаны красным цветом, направлены на северо-запад. Данные SADC в придонном слое толщиной в 15% глубины исключены из рассмотрения в связи с ошибками, вызванными отражением акустического сигнала от дна. Штриховыми линиями отмечены положения фонтов по АДТ 23 и -10 см, согласно [10]; сплошными линиями отмечены положения максимумов градиента АДТ по данным альтиметрии на регулярной сетке на 06.02.2020. Рельеф дна взят из базы данных GEBCO, 2021 [24].

в глубоководной части разреза наблюдаются более соленые воды — до 34.2 psu.

По результатам попутных измерений бортовым профилографом скорости течений, наблюдаются две струи САФ (рис. 3б). САФ-с следует

изобате 300 м, которая в точках измерений направлена на 47° (на северо-восток), что также просматривается по данным АДТ на регулярной сетке и на разрезах SADC. Осредненные в верхнем 50-метровом слое скорости подтверждают,

что САФ-с прижат к 300-метровой изобате (рис. 3а) и их направления совпадают. Исходя из этого, для анализа структуры САФ построено распределение компоненты скорости перпендикулярно разрезу в направлении 47° . Максимальные скорости САФ-с достигают 50 см/с и наблюдаются на горизонте 100 м над изобатой 300 м. Ширина ветви у поверхности со скоростями больше 30 см/с составляет 15–20 км. САФ-гл находится на расстоянии около 280 км от изобаты 300 м. Максимальное значение скорости течения составляет 59 см/с и наблюдается на глубине 130 м. Главная ветвь проникает на глубину более 800 м; скорости на этом горизонте составляют от 35 до 40 см/с. Также построено распределение скоростей течения перпендикулярно изобате 300 м (вдоль разреза) в направлении 317° . Поперек склона скорости течения САФ-с не превышают 10 см/с, а скорости САФ-гл могут быть больше 50 см/с. Исходя из этого, можно сделать вывод, что прибрежная струя прижата к континентальному склону, а глубоководная ветвь не зависит от направления склона.

Положение САФ-с, определенное по максимуму градиента уровня моря, находится на расстоянии 8 км от максимальных скоростей течения по данным судового промера скорости. При этом по данным альтиметрии на регулярной сетке изолиния АДТ 23 см, принятая для локализации САФ-с, наблюдается на расстоянии около 50 км от максимума градиента и в 60 км от ядра течения. Методы определения положения САФ-гл по фиксированной изолинии АДТ и по максимуму градиента АДТ локализуют фронт в зоне больших скоростей главной ветви САФ на расстоянии менее 10 км друг от друга. Таким образом, в данной конкретной ситуации два выбранных критерия для определения положения фронта лучше совпадают для САФ-гл; расхождение в случае САФ-с гораздо более существенное. В следующем разделе эти расхождения проанализированы на основе всего длинного ряда альтиметрических наблюдений.

3.2. Определение положения фронтов по градиенту уровня моря

Ранее в ряде классических работ был сделан вывод о соответствии струй АЦТ фиксированным уровням АДТ, а также приведены их конкретные значения, что стало наиболее удобным методом быстрого определения положения фронтов АЦТ в пространстве [2, 3, 10, 42, 43, 45]. В работе [10] также приведена карта распределения линейного тренда АДТ в мм/год, рассчитанного на основе спутниковых наблюдений с 1993 по 2008 гг. Исследуемый в настоящей работе участок трека альтиметров находится в зоне восходящего тренда со скоростью от 0 до 2 мм/год (среднее значение для Мирового океана на данный момент составляет

2.94 ± 0.05 мм/год [16]). Учитывая тренд изменения АДТ по времени, можно предположить смещение критерия, используемого для определения положения фронтов. В таком случае со временем фронты не будут совпадать с рассчитанными ранее уровнями АДТ, особенно при исследовании положения фронта с помощью альтиметрии на больших временных масштабах. Поэтому в данной работе исследуется способ определения положения фронта на основе максимума градиентов уровня моря, который не должен быть подвержен подобному смещению во времени.

На исследуемом участке спутникового трека наблюдались максимумы значений градиента в диапазоне от 0.3 до 0.6 см/км для САФ-с, при этом градиент САФ-гл достигал 1.1 см/км. Осредненные данные за весь период спутниковых наблюдений показали совпадение максимумов градиента со значением АДТ 30 см (САФ-с) и 4 см (САФ-гл). Положение фронтов варьируется от 0 до 45 км (САФ-с) и от 45 до 320 км от кромки шельфа (САФ-гл).

На рис. 4 представлены результаты анализа вдольтрековых измерений Jason-3 за 26.01.2020 и 15.02.2020. Уровень моря уменьшается с севера на юг неравномерно, образуя зоны максимальных градиентов АДТ. Стоит отметить несовпадение положения максимума градиента какому-либо конкретному уровню АДТ, выбранному для определения самого северного фронта АЦТ. Для САФ-с расстояние между этими двумя точками по данным измерений 26 января составляет около 20 км. На 15 февраля расстояние между изобатой и градиентом составляет 37 км, что существенно больше характерной ширины течения (15–20 км). Распределение градиента АДТ на регулярной сетке показано на рисунке 5, на котором отмечены также уровни АДТ 23 и –10 см. Вдоль изобаты 300 м наблюдается повышенный градиент АДТ, совпадающий по расположению с максимальными скоростями течений, измеренными SADCР. Уровень АДТ 23 см на протяжении всего пролива Дрейка не совпадает с положением максимальных значений градиента и находится от них на расстоянии от 50 до 110 км. Градиент уровня моря, соответствующий САФ-гл, составляет от 0.3 до 0.6 см/км; при этом максимум этого градиента удален от изолинии уровня АДТ –10 см не более чем на 20 км.

Изолинии АДТ в локальных максимумах градиента принимают широкий диапазон значений за весь период спутниковых измерений: для САФ-с — от –1 до 55 см, для САФ-гл — от –50 до 40 см. Такой разброс значений изолиний АДТ, соответствующих положению фронта, говорит о возможной неточности определения положения фронтов по любым фиксированным значениям изолиний уровня моря.

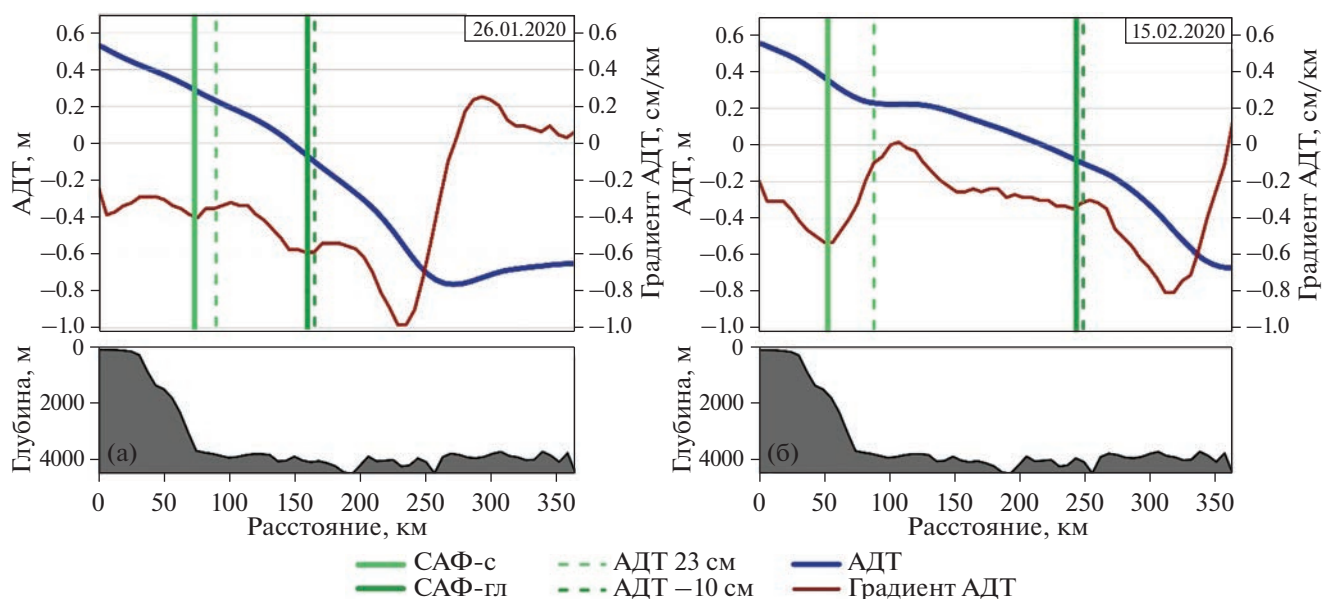


Рис. 4. Значения АДТ (синяя линия) по данным спутника Jason-3 на 26.01.2020 (а) и 15.02.2020 (б). Красной линией представлены значения градиента АДТ по данным вдольтрековой альтиметрии. Сплошной светло-зеленой линией отмечено положение локального максимума градиента (по модулю) для САФ-с, темно-зеленая соответствует положению локального максимума градиента (по модулю) для САФ-гл. Штриховые светло-зеленая и темно-зеленая линии показывают положение изолиний АДТ 23 и –10 см соответственно. Рельеф дна вдоль разреза представлен по данным GEBCO, 2021 [24].

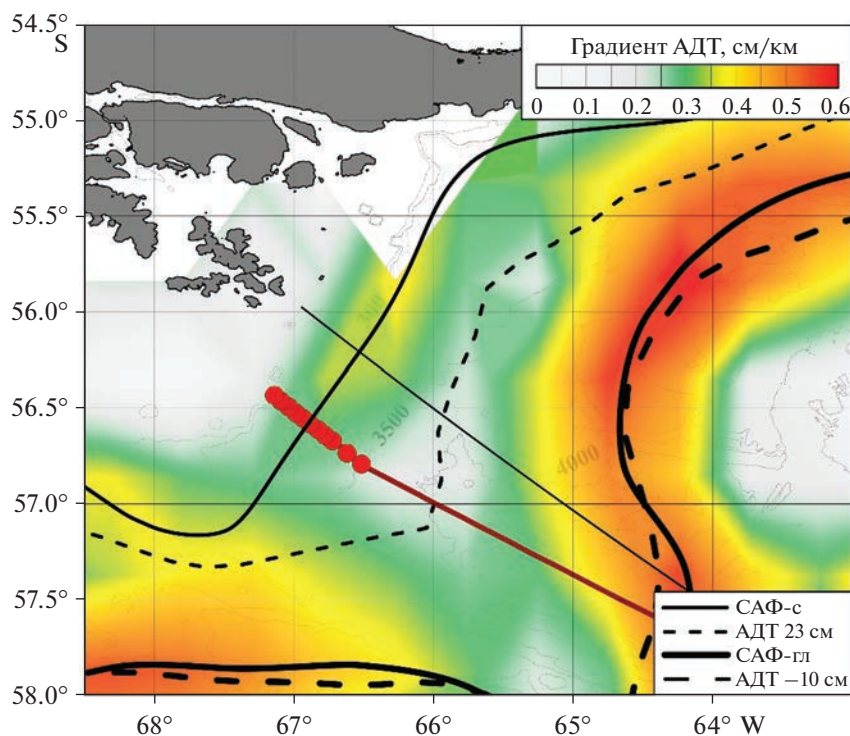


Рис. 5. Распределение градиента АДТ по данным спутниковой альтиметрии на дату 06.02.2020. Штриховыми линиями показаны изолинии АДТ 23 см и –10 см. Локальные максимумы градиента АДТ в районе САФ-с и САФ-гл соединены тонкой и толстой сплошными черными линиями, соответственно. STD-станции 6 февраля 2020 г. показаны красными точками, маршрут НИС «Академик Мстислав Келдыш» во время попутных измерений скоростей течений бортовым профилографом скорости – красной линией. Черной тонкой сплошной линией отмечен подспутниковый трек № 28 Jason-3.

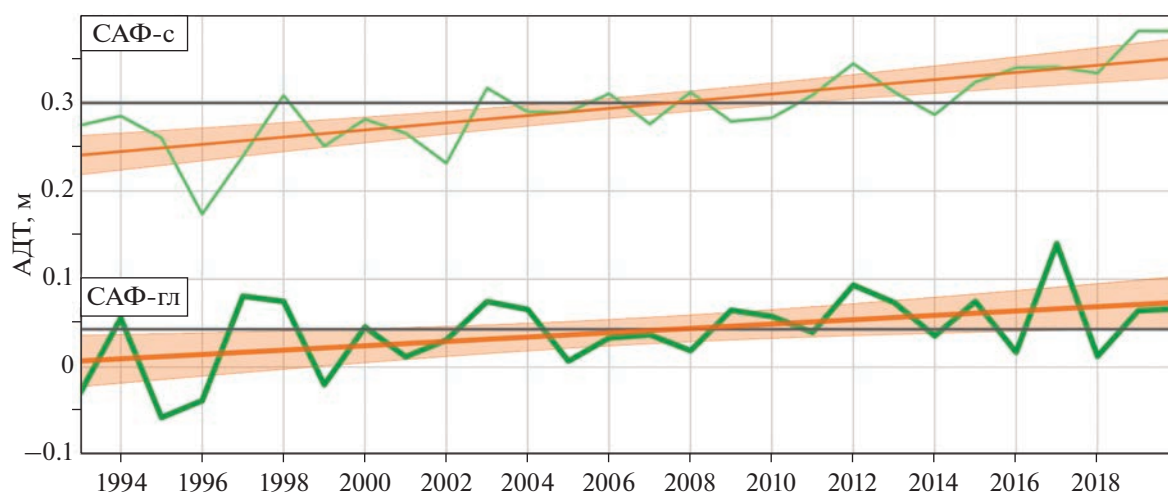


Рис. 6. Осредненные по годам значения АДТ, соответствующие максимумам градиента уровня в районе САФ-с (а) и САФ-гл (б). Осредненные значения АДТ показаны тонкой и толстой зелеными линиями соответственно. Серой линией выделено среднее значение АДТ с 1993 по 2020 гг. для каждого фронта (30 см для САФ-с и 4 см для САФ-гл). Оранжевая линия показывает восходящий тренд изменения АДТ по времени. Светло-оранжевой зоной выделен доверительный интервал для тренда.

По результатам осреднения по годам (рисунок 6) значений АДТ, соответствующих максимуму градиента АДТ (и, соответственно, положению максимума скоростей течений вдоль фронтов АЦТ), обнаружен восходящий тренд. Для оценки значимости тренда использовался t -критерий Стьюдента применительно к коэффициентам линейной регрессии. В качестве нулевой гипотезы рассматривалось отсутствие временного тренда АДТ, то есть значение АДТ постоянно и равно среднему за 28 лет (30 см для САФ-с и 4 см для САФ-гл), или, в терминах линейной регрессии, угловой коэффициент равен 0. Полученные значения t -критерия и p -критерия приведены в таблице 1. Для рассчитанных линейных трендов построенные доверительные интервалы 95% вероятности представлены на рисунке 6. В качестве меры описания линейной моделью полученного ряда данных использовался коэффициент Пирсона. Описанный выше набор статистических метрик был рассчитан и для полных рядов АДТ для САФ-с и САФ-гл (табл. 1).

Согласно определению критерия Стьюдента, значения t -критерия показывают, во сколько раз разница тестируемой характеристики и нулевой гипотезы превышает стандартную ошибку исследуемой характеристики. Из этого факта и предположения о квазинормальном распределении коэффициентов регрессии для временного ряда АДТ следует, что при t -критерии, большем трех, нулевая гипотеза не подтверждается с вероятностью более 99%. При анализе p -критерия традиционно выбирается граничное значение, равное 0.05. Если полученный p -критерий меньше данного значения, нулевая гипотеза является статистически неоправданной. Исходя из полученных значений p -критерия, можно сделать вывод, что нулевая гипотеза об отсутствии тренда не является действительной, что дает возможность утверждать обратное, то есть наличие статистически значимого тренда. Рассчитанные для рядов АДТ коэффициенты Пирсона оказались в диапазоне от 0 до 0.5 во всех случаях, кроме среднегодовых значений АДТ; такой результат — следствие боль-

Таблица 1. Статистические метрики Т-тестирования тренда временной изменчивости критерия АДТ для выделения САФ-с и САФ-гл по полному ряду данных и по среднегодовым значениям при нулевой гипотезе “ $k = 0$ ” (отсутствие тренда). В таблице представлены t -критерий, p -критерий, коэффициент Пирсона (R) и коэффициент линейной регрессии (k) с 95% доверительным интервалом

	t -критерий	p -критерий	R	$k \pm$ дов. инт (мм/год)
АДТ САФ-с	5.86	1×10^{-8}	0.33	4.03 ± 1.35
АДТ САФ-гл	3.35	9×10^{-4}	0.12	2.53 ± 1.48
Среднегодовые АДТ САФ-с	5.92	3×10^{-6}	0.76	4.08 ± 1.42
Среднегодовые АДТ САФ-гл	2.72	0.01	0.47	2.47 ± 1.86

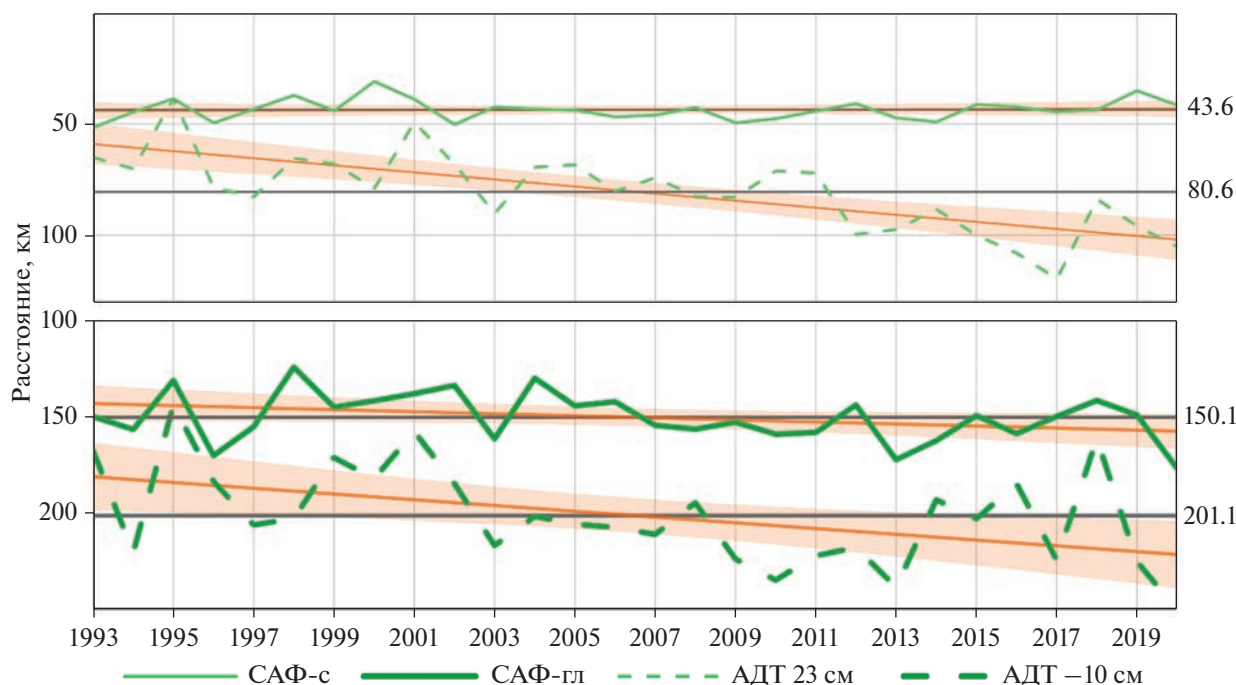


Рис. 7. Среднегодовое положение САФ-с и САФ-гл относительно кромки шельфа. Штриховыми линиями показано среднегодовое положение изолиний АДТ 23 и –10 см. Серой линией выделено среднее положение фронтов и изолиний АДТ с 1993 по 2020 гг., соответствующие значения подписаны справа от каждого графика. Оранжевая линия показывает тренд изменения по времени. Светло-оранжевой зоной выделен доверительный интервал для тренда. Ноль расстояния по вертикальной оси соответствует первой точке спутниковых измерений на треке № 28 Topex/Poseidon, Jason-1, 2, 3 от острова Огненная Земля в координатах 55.977° S, 66.941° W.

шого разброса начальных данных, из-за чего линейная модель не способна полностью описать временную изменчивость АДТ. Однако в данной работе линейная регрессия используется только для выявления общего тренда в данных, для этой задачи линейная аппроксимация применима даже при относительно низких R . Полученный годовой тренд отражен в коэффициентах регрессии с 95% доверительными интервалами. Из значений k следует, что для всех анализируемых рядов характерен устойчивый положительный тренд, для САФ-с он составил 4 мм/год, для САФ-гл – 2.5 мм/год. Доверительные интервалы показывают, что с вероятностью 95% процентов искомый тренд лежит в рассчитанном диапазоне, который даже в крайних случаях является положительным, что также является одним из признаков его статистической значимости.

Исходя из данных тренда, можно сделать вывод, что положение прибрежной вдольсклоновой струи САФ со временем соответствует все более высоким значениям АДТ. Если в 1993 году САФ-с находился, по нашим расчетам, на уровне от 27 до 38 см, то к 2020 году в среднем этот фронт наблюдался на уровне 38 см. Максимумы градиента главной ветви этого фронта за 28 лет альтиметрических измерений сместились с изолинии АДТ –3 см до уровня 6.5 см к 2020 году. Тренд увели-

чения уровня моря в районе САФ-с в 1.4 раза быстрее общемирового тренда повышения уровня моря [16]. САФ-с сохраняет свое расположение относительно кромки шельфа, поэтому данный тренд может говорить о повышении уровня моря в конкретном районе над шельфом и континентальным склоном. Изолинии АДТ, встречающиеся в зоне действия максимальных градиентов САФ-гл, имеют тренд, согласующийся с общемировым трендом и результатами расчета регрессии в [10]. Таким образом, обнаруженные тренды уровня моря в районах ветвей САФ важно учитывать при определении их положения на основе фиксированных значений АДТ. Иными словами, любой заданный критерий, выбранный на основе фиксированного значения АДТ, через несколько лет перестанет быть корректным из-за повышения уровня моря.

3.3. Пространственное смещение САФ

Используя метод определения положения ветвей САФ, предложенный в настоящей работе, проведена оценка смещения фронтов относительно кромки шельфа (рис. 7). За ноль взята первая точка спутниковых измерений на треке № 28 Topex/Poseidon, Jason-1, 2, 3 от острова Огненная Земля, положительное направление оси соответ-

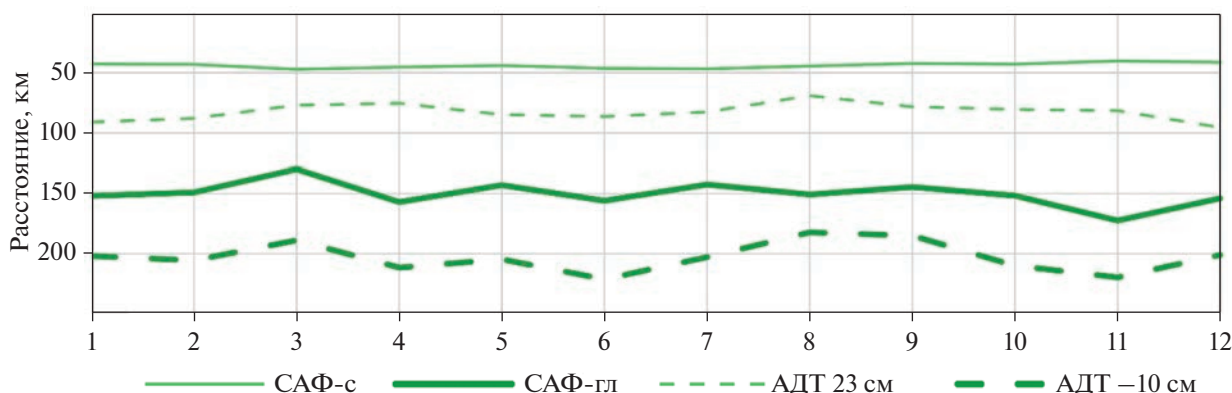


Рис. 8. Сезонное положение САФ-с и САФ-гл относительно кромки шельфа, штриховыми линиями показано среднемесячное положение изогипс 23 и –10 см. Ноль расстояния по вертикальной оси соответствует первой точке спутниковых измерений на треке № 28 Torex/Poseidon, Jason-1, 2, 3 от острова Огненная Земля. Представлены средние данные за 28-летний период с 1993 по 2020 гг.

ствуется направлению на юго-восток, в центральную часть пролива Дрейка. Изобата 200 м располагается в 27 км южнее первого спутникового измерения. Исходя из этого, в среднем САФ-с находится на расстоянии 15 км от кромки шельфа и не отходит от нее дальше чем на 25 км. Положение САФ-гл за 28 лет колебалось в диапазоне от 97 до 148 км от кромки шельфа, в среднем фронт отходил вглубь пролива на 123 км. Тренд смещения САФ-гл составляет 0.5 км в год, с 1993 по 2020 гг. суммарно фронт отделился на 15 км. Для оценки значимости данного тренда использовался тест Стьюдента, на основе анализа доверительных интервалов и расчета p -критерия с доверительным интервалом в 95%, который не показал данный тренд значимым (p -критерий = 0.074) по имеющемуся набору данных. Тренда в смещении северного фронта также не обнаружено.

При оценке пространственного смещения фиксированных уровней АДТ от кромки шельфа обнаружился устойчивый тренд смещения изолинии 23 см на 1.6 км/год в южном направлении (p -критерий = 7×10^{-6}). К 2020 году данная изолиния по среднегодовым данным отделилась на 45 км от положения 1993 года и находится в среднем в 75 км от кромки шельфа. Изолиния –10 см смещается на юг со скоростью 1.5 км/год, что составило 42 км за 28 лет, то есть примерно с той же скоростью, что и изолиния 23 см.

Для исследования сезонных колебаний положения ветвей САФ было проведено осреднение полученных данных по положению фронтов за весь 28-летний период (рис. 8). Было выявлено, что САФ-с сезонно не смещается, в то время как главная ветвь САФ в марте уходит севернее, приближаясь к шельфу на расстояние около 100 км, в ноябре, наоборот, уходит южнее на 40 км. Изолинии АДТ 23 и –10 см в летние и зимние месяцы Южного полушария смещаются немного южнее,

а весной и осенью стремятся к шельфу. При этом уровень моря в точках максимальных градиентов САФ-гл принимал наибольшие значения в периоды с октября по март и с мая по июль — от 5 до 6 см, уменьшаясь в апреле до 2.3 см, а также в августе и сентябре до 1.2 см. САФ-с показал такой же характер сезонного хода относительно изолиний АДТ. С октября по март северная ветвь наблюдалась на уровнях АДТ от 29 до 33 см, максимальные значения также были отмечены в мае и составили 33.6 см. С июля по октябрь уровень моря в зоне действия фронта в среднем понижался от 28.5 до 26 см, с минимальным значением в сентябре.

Одной из возможных причин смещения фронтов АЦТ может быть влияние западных ветров. Авторы [25, 26] указывают на связь изменения положения фронтов с такими явлениями, как Эль-Ниньо/Южное колебание и Антарктическое колебание, а также на слабый вклад ветра в данное явление. Проведенное исследование влияния плавучести и западных ветров на Южный океан [38] на основе численных моделей и натурных данных показало, что меридионально неравномерное потепление АЦТ приводит к неравномерному повышению уровня моря и столь же неравномерно увеличивает геострофические скорости течений, что может оказывать воздействие на смещение фронтов. Отмечается также большой вклад влияния силы плавучести в изменение поверхностной горизонтальной циркуляции и более сильное потепление северных ветвей АЦТ в сравнении с температурными изменениями южной части АЦТ. Необходимо отметить, что, согласно некоторым работам, масштаб смещения фронтов Южного океана зависит от методики определения этих фронтов [11]. Авторы работы [38] также обращают внимание на то, что в условиях изменения климата Южного океана, в частности, вследствие изме-

нения топографии морской поверхности, использование фиксированных изолиний уровня моря может давать некорректные результаты в оценке положения АЦТ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследуется пространственная структура двух ветвей САФ, самого северного фронта АЦТ в проливе Дрейка, а также временная изменчивость положения этих ветвей. Для этого используются как данные натурных наблюдений, так и ряд данных спутниковой альтиметрии с 1993 по 2020 гг. В частности, в работе рассмотрена термохалинная структура северной ветви САФ по натурным данным 79-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”. По данным STD-зондирования отмечено ослабление вертикальной стратификации в зоне наибольших скоростей течения северной ветви САФ у кромки шельфа. Распределение скоростей течений по данным SADCР показало две ветви САФ: северная расположена над кромкой шельфа, главная ветвь — на расстоянии 320 км от северной ветви.

Для оценки долговременной изменчивости положений САФ-с и САФ-гл в северной части пролива Дрейка фронты определялись по данным спутниковой альтиметрии на основе двух различных методов: по фиксированным значениям уровня моря, предложенным в [10], и по максимуму горизонтального градиента АДТ. Было показано, что два критерия хорошо совпадают для основной ветви САФ. Прибрежная ветвь САФ не соответствует изолинии АДТ 23 см на протяжении всего пролива Дрейка. В основном положение самой северной ветви АЦТ стабильно привязано к кромке шельфа и находится на расстоянии 20 км от среднего положения изолинии 23 см. В зоне действия САФ-с отмечен тренд повышения уровня моря. Значения АДТ, находящиеся в точках максимального градиента АДТ, увеличиваются со скоростью 4 мм/год. К тому же, изолиния 23 см отдалается от кромки шельфа со скоростью 1.6 км/год, что подтверждает локальный тренд изменения АДТ, рассчитанный авторами [10].

Изменчивость положения фронтов относительно определенных уровней АДТ хорошо видна по вдольтрековой альтиметрии. Альтиметрические данные на регулярной сетке позволяют исследовать пространственную структуру АЦТ и его отдельных ветвей. Однако в ходе данной работы было установлено, что при определении местоположений фронтов важно принимать во внимание многолетнюю изменчивость уровня моря, что также было отмечено авторами работ [4, 43]. Проведенный анализ показал, что привязка фронтов к определенным постоянным изолиниям АДТ со временем теряет свою актуальность из-за существующих локальных трендов изменения мор-

ской топографии, а, возможно, и по другим причинам, связанным с изменениями в структуре отдельных фронтов. Расхождение в определении положения фронта, выполненном по фиксированным изолиниями АДТ, может достигать 50 км и более, что, безусловно, является важным фактором при оценке состояния Южного океана и происходящих в этом районе климатических изменений.

Благодарности. Авторы выражают благодарность экипажу НИС “Академик Мстислав Келдыш” за содействие в проведении экспедиционных работ.

Данные вдольтрековой альтиметрии доступны на https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_GLO_PHY_L3_MY_008_062 (дата обращения 29.11.2021) Альтиметрия на регулярной сетке доступна на https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047 (дата обращения 20.05.2022).

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания FMWE-2021-0002 (судовые расходы и сбор натурных данных) и при поддержке гранта РНФ 22-77-10004 (обработка данных натурных наблюдений и анализ спутниковой альтиметрии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков В.А. Антарктические струи // Океанология. 1994. Т. 34. № 2. С. 169–177.
2. Кошляков М.Н., Савченко Д.С., Тараканов Р.Ю. Энергия струй Антарктического циркумполярного течения и синоптических вихрей в приповерхностном слое Южного океана // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 325–334. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574593325-334>
3. Кошляков М.Н., Репина И.А., Савченко Д.С. и др. Структура и изменчивость синоптических возмущений океанских течений в проливе Дрейка и море Скотия // Океанология. 2019. Т. 59. № 2. С. 191–200. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574592191-200>
4. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Структура фронтов в районе к югу от Африки по данным разреза SR02 в декабре 2009 г. и спутниковой альтиметрии // Исследовано в России: электрон. науч. журн. 2010. <https://doi.org/10.7868/S0030157414030137>
5. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Тонкая струйная структура Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // Океанология. 2014. Т. 54. № 6. С. 725–736. <https://doi.org/10.7868/S003015741405013X>
6. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Струи Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов 2010 и 2011 гг. // Современные проблемы термогидродинамики океана. 2017. С. 167–169.

- <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-3-4-2017-1-167-169>
7. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Струи Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 541–555.
<https://doi.org/10.1134/S003015741804010X>
 8. Чурин Д.А. Структура струй Антарктического циркумполярного течения в море Скотия по данным спутниковой альтиметрии и судовым наблюдениям в 2000 и 2005 годах // Труды АтлантНИРО. 2018. Т. 2. № 1. С. 61–69.
 9. Artana C., Lellouche J.M., Park Y.H. et al. Fronts of the Malvinas Current System: surface and subsurface expressions revealed by satellite altimetry, Argo floats, and Mercator operational model outputs // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123. № 8. P. 5261–5285.
<https://doi.org/10.1029/2018JC013887>
 10. Barré N., Provost C., Renault A. et al. Fronts, meanders and eddies in Drake Passage during the ANT-XXIII/3 cruise in January–February 2006: A satellite perspective // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2011. V. 58. № 25–26. P. 2533–2554.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.01.003>
 11. Chapman C.C., Lea M.A., Meyer A. et al. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate // Nat. Clim. Change. 2020. V. 10. P. 210–219.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0705-4>
 12. Chelton D.B., Schlax M.G., Witter D.L. et al. Geosat altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1990. V. 95. № C10. P. 17877–17903.
<https://doi.org/10.1029/JC095iC10p17877>
 13. Deacon G.E.R. The hydrology of the Southern Ocean // Discovery Rep. 1937. V. 15. P. 3–122.
 14. Ducet N., Le Traon P.Y., Reverdin G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and-2 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2000. V. 105. № C8. P. 19477–19498.
<https://doi.org/10.1029/2000JC900063>
 15. Egbert G.D., Erofeeva S. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Atmos. Ocean Tech. 2002. V. 19. P. 183–204.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOB>2.0.CO;2)
 16. Fang M., Zhang J. Basin-scale features of global sea level trends revealed by altimeter data from 1993 to 2013 // Journal of Oceanography. 2015. V. 71. № 3. P. 297–310.
<https://doi.org/10.1007/s10872-015-0289-1>
 17. Ferrari R., Artana C., Saracen M. et al. Satellite altimetry and current-meter velocities in the Malvinas Current at 41 S: Comparisons and modes of variations // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. № 12. P. 9572–9590.
<https://doi.org/10.1002/2017JC013340>
 18. Ferrari R., Provost C., Renault A. et al. Circulation in Drake Passage revisited using new current time series and satellite altimetry: 1. The Yaghan Basin // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2012. V. 117. № C12.
<https://doi.org/10.1029/2012JC008264>
 19. Firing Y.L., Chereskin T.K., Mazloff M.R. Vertical structure and transport of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage from direct velocity observations // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2011. V. 116. № C8.
<https://doi.org/10.1029/2011JC006999>
 20. Frey D.I., Krechik V.A., Gordey A.S. et al. Austral summer circulation in the Bransfield Strait based on SADCPC measurements and satellite altimetry // Front. Mar. Sci. 2023. P. 10:1111541.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1111541>
 21. Frey D.I., Piola A.R., Krechik V.A. et al. Direct measurements of the Malvinas Current velocity structure // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021. V. 126. № 4. V. e2020JC016727.
<https://doi.org/10.1029/2020JC016727>
 22. Frey D.I., Piola A.R., Morozov E.G. Convergence of the Malvinas Current branches near 44° S // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2023. P. 104023.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104023>
 23. Gaube P., Barceló C., McGillicuddy D.J. Jr. et al. The use of mesoscale eddies by juvenile loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in the southwestern Atlantic // PloS one. 2017. V. 12. № 3. P. e0172839.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172839>
 24. GEBCO Compilation Group (2021) GEBCO 2021 Grid <https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f>
 25. Gille S.T. Meridional displacement of the Antarctic circumpolar current // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2014. V. 372. № 2019. P. 20130273.
 26. Kim Y.S., Orsi A.H. On the variability of Antarctic Circumpolar Current fronts inferred from 1992–2011 altimetry // Journal of Physical Oceanography. 2014. V. 44. № 12. P. 3054–3071.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0217.1>
 27. Lenn Y.D., Chereskin T.K., Sprintall J. Improving estimates of the Antarctic Circumpolar Current streamlines in Drake Passage // Journal of Physical Oceanography. 2008. V. 38. № 5. P. 1000–1010.
<https://doi.org/10.1175/2007JPO3834.1>
 28. Matano R.P., Palma E.D. On the upwelling of downwelling currents // Journal of Physical Oceanography. 2008. V. 38. № 11. P. 2482–2500.
<https://doi.org/10.1175/2008JPO3783.1>
 29. Morozov E.G., Frey D.I., Fofanov D.V. et al. The extreme northern jet of the Antarctic Circumpolar Current // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. V. 20. № 5. P. 4.
<https://doi.org/10.2205/2020ES000717>
 30. Morozov E.G., Frey D.I., Krechik V.A. et al. Multidisciplinary observations across an eddy dipole in the inter-

- action zone between subtropical and subantarctic waters in the Southwest Atlantic // *Water*. 2022. V. 14. № 17. P. 2701.
https://doi.org/10.3390/w14172701
31. Morozov E.G., Spiridonov V.A., Molodtsova T.N. et al. Investigations of the ecosystem in the Atlantic sector of Antarctica (cruise 79 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh) // *Oceanology*. 2020. V. 60. № 5. P. 721–723.
https://doi.org/10.1134/S0001437020050161
 32. Morozov E.G., Tarakanov R.Yu., Ansoorge I., Swart S. Jets and transport of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2014. V. 7. № 3. P. 23–28. — EDN TAQWLB.
 33. Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Demidova T.A. et al. Velocity and transport of the Falkland Current at 46° S // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2016. V. 16. № 6. P. 1–4.
https://doi.org/10.2205/2016ES000588
 34. Nowlin W.D. Jr., Clifford M. The kinematic and thermohaline zonation of the Antarctic Circumpolar Current at Drake Passage // *Journal of Marine Research*. 1982. V. 40. P. 481–507.
 35. Orsi A.H., Whitworth III T., Nowlin W.D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1995. V. 42. № 5. P. 641–673.
https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00021-W
 36. Provost C., Renault A., Barré N. et al. Two repeat crossings of Drake Passage in austral summer 2006: Short-term variations and evidence for considerable ventilation of intermediate and deep waters // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2011. V. 58. № 25–26. P. 2555–2571.
https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.06.009
 37. Salyuk P.A., Mosharov S.A., Frey D.I. et al. Physical and biology features of the waters in the outer Patagonian shelf and the Malvinas Current // *Water*. 2022. 14 (23).
https://doi.org/10.3390/w14233879
 38. Shi J.R., Talley L.D., Xie S.-P. et al. Effects of buoyancy and wind forcing on Southern Ocean climate change // *Journal of Climate*. 2020. V. 33. № 23. P. 10003–10020.
https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0877.1
 39. Sievers H.A., Emery W.J. Variability of the Antarctic Polar frontal zone in the Drake Passage—summer 1976–1977 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1978. V. 83. № C6. P. 3010–3022.
 40. Sievers H.A., Nowlin W.D. Jr. The stratification and water masses at Drake Passage // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1984. V. 89. № C6. P. 10489–10514.
https://doi.org/10.1029/JC089iC06p10489
 41. Sokolov S., Rintoul S.R. Structure of Southern Ocean fronts at 140° E // *Journal of Marine Systems*. 2002. V. 37. № 1–3. P. 151–184.
https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00200-2
 42. Sokolov S., Rintoul S.R. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 1. Mean circumpolar paths // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. V. 114. № C11.
https://doi.org/10.1029/2008JC005108
 43. Sokolov S., Rintoul S.R. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 2. Variability and relationship to sea surface height // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. V. 114. № C11.
https://doi.org/10.1029/2008JC005248
 44. Tarakanov R.Yu. Long-term linear meridional shift of the jet structure of the Antarctic Circumpolar Current south of Africa // *Oceanology*. 2021. V. 61. P. 815–829.
https://doi.org/10.1134/S000143702106031X
 45. Venables H., Meredith M.P., Atkinson A. et al. Fronts and habitat zones in the Scotia Sea // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2012. V. 59. P. 14–24.
https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.08.012

Structure and Temporal Variability of the Northern Branch of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage

S. A. Ostroumova^{a, b, #}, I. D. Drozd^{a, c, d}, D. I. Frey^{a, e, f}

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

^b*Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia*

^c*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^d*Moscow State University, Moscow, Russia*

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

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

[#]*e-mail: ost.sophisticated@gmail.com*

The Antarctic Circumpolar Current plays the key role in the circulation of the Southern Ocean and affects the distribution of heat by the ocean on the global scale. The study of the dynamics and structure of this current becomes especially important in a changing climate. The current is well revealed by satellite altimetry data, which makes possible to study temporal and spatial variability of its structure at different scales. In these studies, the methods for determining the position of individual fronts of the Antarctic Circumpolar Current based on satellite altimetry data become especially important. In this work, we compare various approaches

for detection of front locations. The structure of the northernmost branch of the Antarctic Circumpolar Current, the Subantarctic Front, and its spatial and temporal variability was studied based on satellite altimetry data from 1993 to 2020 and the results of a hydrographical section occupied by the R/V “*Akademik Mstislav Keldysh*” in the northern part of the Drake Passage in February 2020. We selected a 350 km long part of the TOPEX/Poseidon and Jason-1,2,3 satellite altimeter track from Tierra del Fuego to the south for the analysis of the dynamics of the front. Criteria for determining the position of the northern and main branches of the Subantarctic Front are presented based on satellite altimetry data. A long-term shift of the position of the fronts relative to the previously accepted levels of absolute dynamic topography has been found. It was found that the accuracy of determining the position of fronts using fixed values of dynamic topography may decrease with time, in particular due to changes in the mean sea level. A statistically significant long-term trend of sea level rise in the region of the Subantarctic Front was found. This trend is 4 mm/yr for the northern branch and 2.5 mm/yr for the main branch.

Keywords: Subantarctic Front, Antarctic Circumpolar Current, satellite altimetry, jets, Drake Passage