



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

Изменчивость Субантарктического фронта на Патагонском шельфе по
данным вдольтрековой альтиметрии

Исполнитель: Остроумова София Антоновна

Научный руководитель: к. ф.-м. н., доцент, Ерёмина Татьяна Рэмовна

Научный консультант: к. ф.-м. н., в. н. с. лаборатории гидрологических
процессов Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН Фрей Дмитрий
Ильич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

кандидат географических наук

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«27 июн» 2025 г.

г. Санкт-Петербург

2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. Субантарктический фронт в юго-западной части Атлантического океана.....	6
1.1. Физико-географическое описание.....	6
1.2. Термохалинная и кинематическая структура по натурным данным.....	9
1.3. Применение спутниковых данных.....	11
ГЛАВА 2. Данные и методы.....	15
2.1. Натурные наблюдения.....	15
2.2. Спутниковая альтиметрия.....	17
2.3. Методика определения фронтов.....	
ГЛАВА 3. Пространственно-временная изменчивость Субантарктического фронта.....	25
3.1. Судовые измерения.....	25
3.2. Спутниковые наблюдения.....	33
3.3. Рост уровня моря.....	41
Заключение.....	46
Список литературы.....	47

ВВЕДЕНИЕ

Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ) играет ключевую роль в циркуляции Мирового океана, значительно влияя на перераспределение тепла в глобальном масштабе. Самая северная ветвь АЦТ проникает максимально далеко на север в юго-западной части Атлантического океана и переносит холодные и распреснённые воды до 38° ю.ш. вдоль кромки континентального шельфа Южной Америки. Эта ветвь АЦТ называется Субантарктический фронт (САФ); меандр САФ от пролива Дрейка до примерно 38° ю.ш. вдоль кромки Патагонского шельфа называется Мальвинским течением (МТ). Около 38° ю.ш. холодные и относительно пресные воды САФ/МТ встречаются с гораздо более теплым и солёным Бразильским течением. При слиянии Бразильского и МТ образуется множество вихревых структур [16, 29]. Динамическое взаимодействие с континентальным склоном и мощное вихреобразование вносит большой вклад в перемешивание и трансформацию вод, а также теплообмен океана и атмосферы в юго-западной Атлантике [34, 35, 40]. Эти процессы перемещают холодные питательные и насыщенные кислородом воды ближе к поверхности океана, что делает исследуемый район одним из самых продуктивных в Мировом океане. Биологическая активность региона прослеживается на всех трофических уровнях. Это доказывает огромный по численности и биомассе ежегодный сезонный вылов аргентинского короткоперого кальмара *Illex argentinus* [8, 46] и чёрной (угольной) трески *Merluccius hubbsi* [32] в местах взаимодействия САФ/МТ с континентальным склоном и в зоне конфлюенции Мальвинского и Бразильского течений. Высокие показатели вылова промысловых видов в исследуемом регионе создают весомый вклад в экономику стран, ведущих промысел в водах юго-западной Атлантики.

Заинтересованность в экономических, в частности, промысловых, прогнозах требует достаточно подробного изучения и постоянного

отслеживания динамики абиотических факторов морской среды. Несмотря на активный интерес к изучению САФ/МТ судовые измерения в основном сосредоточены в северной части течения, в основном из-за погодных условий в южной части, которые не позволяют регулярно и безопасно проводить измерения в экспедиционных условиях. К счастью, технологии активно развиваются в последние десятилетия, что позволило задействовать в исследовании МТ заякоренные буйковые станции с многолетним рядом регулярных измерений, измерения буями Argo, а также спутниковые наблюдения. Особое значение здесь имеет спутниковая альтиметрия, которая позволяет исследовать структуру геострофического поля течений с 1993 года на регулярной основе с хорошим пространственным шагом и временным разрешением. Ветви Мальвинского течения хорошо просматриваются по данным спутниковой температуры поверхности океана, солёности и оптических характеристик поверхности океана [13, 66]. Отличным инструментом для исследования Мальвинского течения является спутниковая альтиметрия. Архивы с данными, интерполированными со всех доступных альтиметров на регулярную сетку, позволяют оценить пространственное распределение абсолютной динамической топографии и скорости течений, однако этот инструмент уменьшает ширину течения и сглаживает скорость за счёт интерполяции, либо может не засечь изменения абсолютной динамической топографии (АДТ) особенно в мелководной части океана, например, над шельфом и кромкой шельфа. В таком случае использование вдольтрековой альтиметрии с шагом измерений в 6.2 км является отличным выходом.

Целью данной работы является исследование пространственно-временной изменчивости Субантарктического фронта в юго-западной части Атлантического океана.

Задачи:

1. Анализ натурных CTD-измерений и попутных измерений SADCP.

2. Поиск критерия для определения положения Субантарктического фронта, работающего на длинном временном ряде данных спутниковой альтиметрии в условиях изменяющейся абсолютной динамической топографии в условиях климатических изменений.
3. Анализ пространственно-временной динамики фронта по итогам универсальной идентификации. Составление карт с диапазоном местонахождения ветвей течения за время спутниковых наблюдений.
4. Анализ распределения долгопериодных трендов роста уровня моря в юго-западной Атлантике.

Объект/предмет исследования: Субантарктический фронт в юго-западной Атлантике.

ГЛАВА 1. СУБАНТАРКТИЧЕСКИЙ ФРОНТ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА.

1.1 Физико-географическое описание

Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ) является самым интенсивным течением в Мировом океане, оно движется с запада на восток, опоясывая Антарктиду. Течение представляет собой систему струй, которые характеризуются ярко выраженными градиентами гидрофизических характеристик, включая температуру, солёность, следовательно и плотность, а также перепадами АДТ [1, 20, 36, 41, 42, 55]. Струи (ветви) чётко прослеживаются по данным натурных измерений, благодаря чему была разработана их самая часто используемая классификация. Структура АЦТ состоит из нескольких фронтов, с севера на юг: Субантарктический фронт (САФ), Полярный фронт, Южный фронт АЦТ и Южную границу АЦТ [42, 58, 59]. Последующее изучение этой структуры с применением расширенного арсенала инструментов, таких как спутниковая альтиметрия и буйковые станции Argo, дополнили классификацию ветвей АЦТ более подробным разделением основных ветвей на главные и побочные [58, 59]. Точное количество дополнительных фронтов по сей день остаётся вопросом для дискуссий [3, 4, 5, 6, 15], а ответ на этот вопрос сильно зависит от методики и критериев идентификации фронтов. Неопределённость также вносит тот факт, что разделение струй на побочные части не постоянно, и существуют регионы, как, например, пролив Дрейка, где струи интенсифицируются и сливаются в несколько более сильных струй [57].

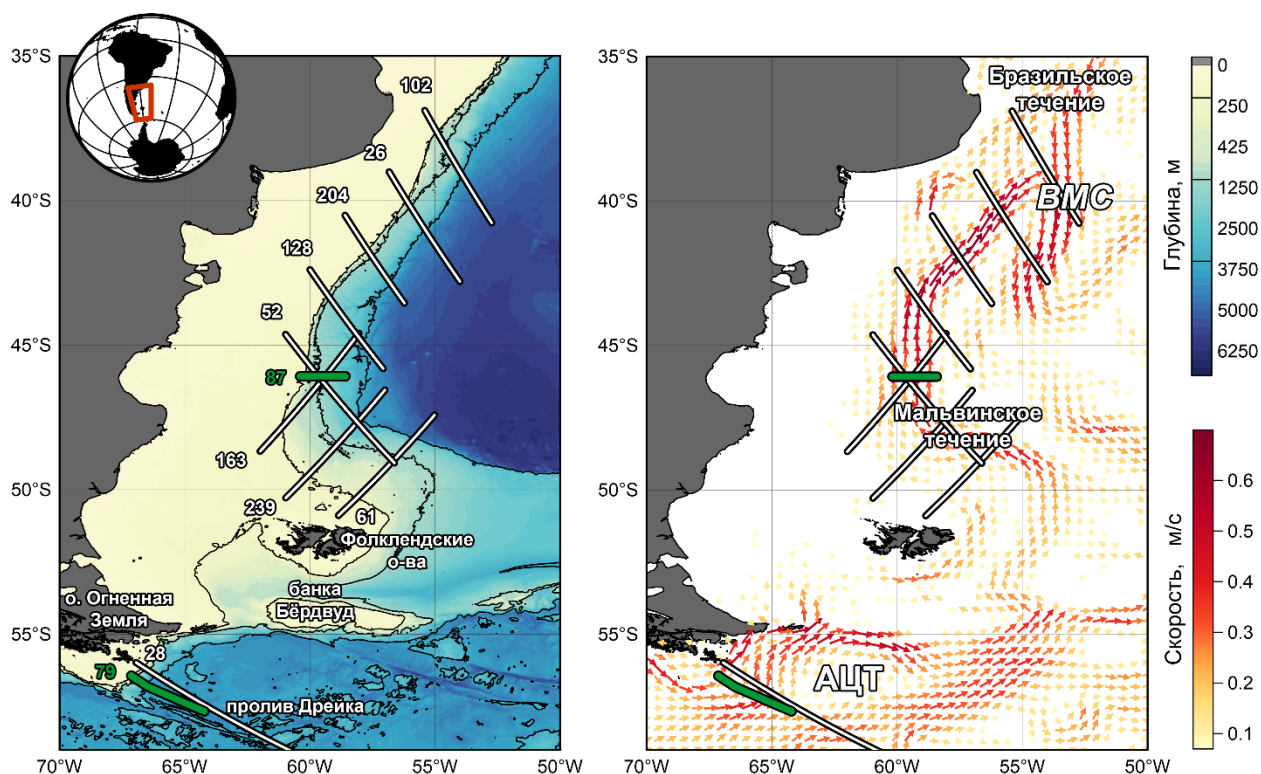


Рисунок 1. Район исследования. Слева: Рельеф дна юго-западной Атлантики по данным GEBCO 2023 [31]. Выделены изобаты 200, 1000 и 3500 м. Береговая линия показана по данным GSHNS [67]. Белые сплошные линии соответствуют выбранным отрезкам треков 102, 26, 204, 128, 52, 163, 239, 61 и 28 альтиметров Topex/Poseidon (1993-2002), Jason-1 (2002-2008), Jason-2 (2008-2016), Jason-3 (2016-2022), цифрами обозначены номера этих треков. Зелеными линиями отмечены маршруты судовых измерений на НИС «Академик Мстислав Келдыш». Зелеными цифрами указаны номера рейсов (79 и 87), в которых выполнены измерения по соответствующим маршрутам. Справа: Красными стрелками показаны скорости геострофических течений, рассчитанные по данным средней динамической топографии (от 0.07 до 0.7 м/с). Аббревиатура BMC – Brazil- Malvinas Confluence zone.

Классификация фронтов согласно [14] предлагает разделять САФ на главную глубоководную (САФ-гл) и северную прибрежную (САФ-с) ветви. В юго-западной Атлантике часть САФ от пролива Дрейка вдоль континентального шельфа Южной Америки на север до 38° ю.ш. выделяют как Мальвинское/Фолклендское течение (МТ/ФТ), которое одновременно является меандром САФ АЦТ. Большую часть своего пути МТ существует в виде двух практически параллельных струй [12, 28]. В проливе Дрейка и далее вдоль кромки шельфа САФ-с прижимается к изобатам 200-300 м и

следует на северо-восток между Банкой Бёрдвуд и Мальвинскими/Фолклендскими островами. Далее САФ-с, прижавшись к континентальному склону следует на север. Основная ветвь меандрирует в широких глубоководных частях открытого океана в южной части МТ. Поскольку эта ветвь течения мощнее, она проникает вглубь океана более чем на 1000 м. Поэтому при продвижении на северо-восток огибает Банку Бёрдвуд с востока и поворачивает на север восточнее Фолклендских островов, далее следует строго в северном направлении. Обе струи существуют практически параллельно вплоть до 45° ю.ш., где сливаются в одно более мощное течение, согласно данным наблюдений на основе судовых измерений скорости течений при помощи судового акустического доплеровского профилографа течений (Shipboard Acoustic Doppler Current Profiler, SADCPr) и спутниковых данных [30]. Севернее широты слияния двух ветвей по данным спутниковой альтиметрии на регулярной сетке зачастую трудно определить отдельные две ветви САФ/МТ. Дальность распространения САФ/МТ на север зависит от времени года и варьируется от 38.5 до 36 ° ю.ш. летом и зимой соответственно [11, 47, 51, 62]. Измерения с помощью заякоренных буйковых станций, оснащённых CTD-зондами и ADCP, показывают в северной части МТ разворот течения по часовой стрелке на юг, эта часть течения называется Мальвинское возвратное течение [45]. В самой северной своей части МТ встречается с Бразильским течением. Процесс взаимодействия двух течений с сильно различными термохалинными характеристиками приводит к формированию множества вихрей, которые после образования распространяются на довольно обширной области в юго-западной Атлантике.

Огромный вклад в динамику САФ/МТ вносит характер топографии дна в исследуемом районе. Ширина шельфа и уклон континентального склона меняются с юга на север. От 55 до 47° ю.ш. склон шельфа довольно пологий и широкий. Ширина шельфа в этой части достигает до 850 км. Глубины между

Огненной Землёй и Банкой Бёрдвуд, а также между Банкой Бёрдвуд и Фолклендскими островами не превышают 500 м, что препятствует проникновению глубоководной струи на северо-восток этим путём, им следует лишь прибрежная мелководная ветвь. В районе 50° ю.ш. на восток от Фолклендских островов распространяется пологое плато Фолкленд /Мальвинас. Струи течения в этой части замедляются, увеличиваются по ширине и их положение становится более изменчивым, смещаясь то дальше, то ближе к кромке шельфа. Определение течений по спутниковой альтиметрии на регулярной сетке в этом районе становится максимально затруднительным в виду малых скоростей течений. От Банки Бёрдвуд в северном направлении континентальный склон образует несколько террас, вдоль которых следует глубоководная ветвь МТ. В северной части МТ континентальный склон более крутой. В районе действия единой слившейся струи склон является узким и имеет максимальный уклон, как и в проливе Дрейка в районе южной части Огненной Земли. В этих местах течение интенсифицируется. Стоит отметить, что вариативность положения МС также сильно зависит от направления, наклона и ширины континентального склона, согласно исследованию на основе натурных измерений и спутниковых наблюдений в районе Патагонского шельфа [30].

1.2. Термохалинная и кинематическая структура по натурным наблюдениям

Попутные измерения скорости течений и сбор данных с помощью заякоренных станций позволили оценить структуру МТ в верхнем слое океана с большой частотой по горизонтали и вертикали, и внесли много информации о скорости течения и его расходах [19, 27, 28, 48, 60, 64].

В северной части САФ/МТ производились измерения с помощью заякоренных станций с датчиками температуры и солёности и измерителями скорости течения (ADCP) [9, 10, 44, 60, 64]. Также пространственная

структура Мальвинского течения исследовалась на основе модельных данных [10, 24].

Термохалинная структура прибрежной ветви как правило представляет собой изолинии температуры и солёности, наклонённые с поверхности вглубь к кромке шельфа при рассмотрении разреза от глубоководной части в направлении шельфа. Относительно тёплые и пресные воды над шельфом, с выраженным клином солёности и температуры над кромкой шельфа. Увеличение солёности в сторону океана и уменьшение потенциальной температуры приводят к относительно резкому увеличению плотности. Позже будет показано, что этот фронт плотности связан с геострофической струей вдоль верхней части склона. Поверхностные температура и солёность увеличиваются дальше от берега, а подповерхностные изотермы и изопикны выравниваются, и их наклон меняется на противоположный в верхних.

Подобная структура сохраняется на протяжении всего пути взаимодействия прибрежной ветви с континентальным склоном, однако происходит увеличение температуры шельфовых вод с продвижением на север.

Кинематическая структура Мальвинского течения представляет собой две струи. Ширина северной/прибрежной ветви течения в среднем составляет от 15 до 50 км в зависимости от региона исследования, наиболее часто фиксированные измерениями скорости составляют от 40 до 55 см/с [6, 9, 27, 27, 37]. Максимальная скорость в прибрежной ветви САФ составила 84 см/с по данным измерений SADCP в проливе Дрейка.

Течение, наблюдаемое вдоль главной ветви САФ, составляет около 150 км по ширине. Фронт имеет большую амплитуду смещения по пространству. Наибольшие скорости течения у поверхности на глубинах от 0 до 250 м могут составлять до 94 см/с [6, 28], а на глубине 600 м сохранять скорость до 50 см/с [27; 28].

1.3. Применение спутниковых данных

Появление такого инструмента исследования, как спутниковые измерения стали неотъемлемой частью океанологических исследований и расширили возможности науки и прикладных отраслей. Спутниковые данные позволяют охватывать обширные акватории с высокой регулярностью и пространственным разрешением, что особенно ценно при изучении крупномасштабных динамических объектов, таких как фронты, течения и мезомасштабные вихри. Они обеспечивают непрерывное наблюдение за температурой поверхности моря (SST), уровнем моря, концентрацией хлорофилла, скоростями ветра и другими параметрами, которые невозможно получить в таком объёме при использовании только судовых измерений [17]. Для изучения фронтальных зон, включая Субантарктический фронт (САФ), спутниковые данные играют решающую роль в мониторинге пространственного положения, сезонных колебаний и долгосрочной изменчивости. Это особенно актуально для отдалённых и труднодоступных районов, таких как юго-западная часть Атлантического океана, где проведение регулярных контактных наблюдений затруднено [57] в силу сложности навигации и постановки буёв из-за агрессивных и опасных погодных условий.

Температура поверхности моря является одним из наиболее информативных параметров, позволяющих выделять фронты. В юго-западной Атлантике САФ отчётливо прослеживается по температуре поверхности океана, особенно в холодный сезон [53]. Изменения SST, выявленные с помощью спутников AVHRR и MODIS, позволяют фиксировать сезонные колебания фронта и возможные смещения в результате влияния атмосферной циркуляции [52].

С появлением спутниковых наблюдений за поверхностью океана стало возможным отслеживать положение и пространственную изменчивость АЦТ и Мальвинского течения. Они хорошо проявляются по спутниковым данным

температуры, солёности и оптическим характеристикам поверхности океана, таким как хлорофилл-а [13, 66]. Ещё одним инструментом для изучения пространственной вариативности Мальвинского течения является спутниковая альтиметрия [64], которая позволяет отслеживать не только меандрирование течений, но и оценивать изменения скоростей течений, а также генерацию вихрей в ВМС и на Malvinas Plateau. Положения фронтов можно определить, как по данным измерений вдоль треков спутников, так и по интерполированным на регулярную сетку данным. [33] и [58] изучили структуру АЦТ, используя альтиметрические данные и гидрофизические измерения, что позволило обнаружить связь между сильными течениями и максимумами градиента АДТ. Однако важно помнить, что определение положения ветвей течений с помощью спутниковой альтиметрии содержит определенные неточности, поскольку ширина фронтов мала по сравнению с пространственным разрешением спутниковых альтиметров [30], 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 [3, 30], и могут уменьшать предполагаемую скорость течения.

Альтиметрия является одним из наиболее точных и универсальных методов для изучения динамики фронтов, включая САФ. Измерения абсолютной высоты уровня моря с помощью спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 и Sentinel-6 позволяют вычислять геострофические скорости и выявлять фронтальные зоны по максимальному градиенту высоты [49]. Спутниковая альтиметрия даёт возможность проследить положение фронта в течение нескольких десятилетий, а также выявить его межгодовую изменчивость, связанную с климатическими индексами, такими как SAM и ENSO [9]. Поскольку уровень моря непрерывно растет [23], а одним из способов идентификации течения является положение градиента уровня моря, особенно важно постоянное отслеживание актуальной обстановки

таких параметров в регионе. Спутниковая альтиметрия на регулярной сетке имеет разрешение 0.25° по широте и долготе, что может являться недостаточным для исследования тонкой структуры и изменчивости ветвей Мальвинского течения. 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.

Концентрация хлорофилла, получаемая на основе данных спектрорадиометров (например, SeaWiFS, MODIS), позволяет оценить биологическую активность и продуктивность вод, различающуюся по обе стороны от фронта. Для САФ характерен резкий градиент продуктивности — севернее и западнее фронта наблюдаются повышенные концентрации хлорофилла, в то время как к югу и востоку воды остаются олиготрофными [56]. Таким образом, фронт можно определить и по биогеохимическим характеристикам, что особенно важно при междисциплинарных исследованиях.

Анализ с помощью спутников промысловой активности, связанной с продуктивными водами, показал, что распределение таких промысловых объектов, как кальмар *Illex argentinus*, тесно связано с океанографическими фронтами, включая САФ. Авторы [65] с помощью спутниковых данных о температуре поверхности моря (SST) выявили закономерности пространственной динамики промысла: основные скопления кальмара наблюдаются вдоль фронтальных зон, где происходит подъём питательных веществ и, соответственно, концентрация хлорофилла. Это говорит о ключевой роли фронтов как экологических границ, определяющих структуру сообществ и зону биологической продуктивности.

Использование спутниковых данных в этом контексте позволяет не только отслеживать физические характеристики фронта, но и прогнозировать связанные с ним биологические процессы. Субантарктический фронт

рассматривается не только как динамическая граница водных масс, но и как важный фактор для управления морскими ресурсами и понимания экосистемных связей в юго-западной части Атлантики.

ГЛАВА 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

2.1. Натурные наблюдения

Натурные данные, использованные в работе, получены Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН в ходе 79 и 87 экспедиций НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2019-2020 и в 2021-2022 годы соответственно. Эти экспедиции включали комплексные исследования гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических параметров океана по всей водной толще и в придонном слое. Работы проводились в режимах попутных наблюдений и на станциях в летний период южного полушария.

В ходе 79-го рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» 6 февраля 2020 года [38] 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 (Рисунок 1) 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), оснащённой CTD-зондом SBE 19plus SEACAT фирмы SeaBird. Расстояние между станциями варьировалось между 5.6 и 12 км. Подробное описание гидрологического разреза приведено в работах [39, 43].

Спустя два года во время 87-ой экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш» 21 февраля 2022 года [50] выполнен разрез SADCP с запада на восток во время прохождения судна через прибрежную и глубоководную ветви САФ/МТ в районе 46° ю.ш. Измерения выполнялись на зональном разрезе, расположенном над шельфом, континентальным склоном и в глубоководной части Аргентинской котловины (Рисунок 1). Также, над бровкой шельфа и континентальным склоном в зоне действия САФ-с было выполнено 16 станций с измерениями CTD-зондом фирмы AML. Расстояние

между станциями составило в среднем 3.9 км, все станции расположены равномерно, что позволило детально изучить термохалинную структуру САФ-с и определить зоны апвеллинга и даунвеллинга на разрезе.

Сырые данные CTD-зондирований в обоих случаях обрабатывались согласно стандартной процедуре обработки программным обеспечением SBE DataProcessing. Сохранялись только данные, полученные при опускании зонда на максимальную глубину, измерения при движении вверх удалялись. Также убирались инверсии давления во время опускания оборудования, чтобы избежать шумов на профилях температуры и солёности. Далее данные осреднялись с шагом в 1 метр (рейс 79) и шагом 1 секунда (рейс 87). Процедуры обработки проводились в программах SBE DataProcessing и с помощью Python, чтобы получить вертикальные профили температуры, солёности и гидрофизических рассчитываемых параметров. Для визуализации распределения термохалинных характеристик на разрезах и последующего анализа использовалось программное обеспечение OceanDataView (ODV) и Python.

Распределения скоростей течений в верхнем слое океана (до 800 м) по ходу движения судна в обоих рейсах определялись с помощью установленного на НИС «Академик Мстислав Келдыш» SADC Ocean Surveyor фирмы TRDI частотой 75 кГц. Вертикальное разрешение получаемого профиля скорости составляет 8 м, с учётом настроек прибора на этом судне; скорости течений измеряются в 100 точках (ячейках) по вертикали. 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 TPXO9 [22]. В соответствие со стандартными

рекомендациями производителя, отфильтрованы данные в придонном слое толщиной в 15% глубины в связи с ошибками, вызванными отражением акустического сигнала от дна.

2.2. Спутниковая альтиметрия

Для анализа пространственной структуры Субантарктического фронта в данной работе использованы данные спутниковой альтиметрии. Этот метод представляет собой дистанционные измерения высоты уровня моря с использованием радиовысотомеров, установленных на спутниках. При прохождении спутника над океаном альтиметр измеряет время прохождения радиосигнала от спутника до поверхности воды и обратно, что позволяет с высокой точностью определить расстояние между спутником и уровнем океана (Рисунок 2). После коррекции на атмосферные и геофизические эффекты получается мгновенная аномалия уровня моря — (SLA, Sea Level Anomaly). На основе временных изменений уровня моря относительно среднего многолетнего значения (MDT, Mean Dynamic Topography) рассчитывается абсолютная высота уровня моря — абсолютная динамическая топография (ADT, Absolute Dynamic Topography), путём сложения средней динамической топографии (MDT) и аномалии уровня моря (SLA). Эти параметры широко используются для оценки крупномасштабной циркуляции, изучения фронтальных зон и выявления меандров и вихрей. На основе поля АДТ можно также вычислять зональную и меридиональную компоненты геострофического течения (U_s , V_s) — приближённые скорости морских течений, обусловленные наклоном поверхности океана [61].

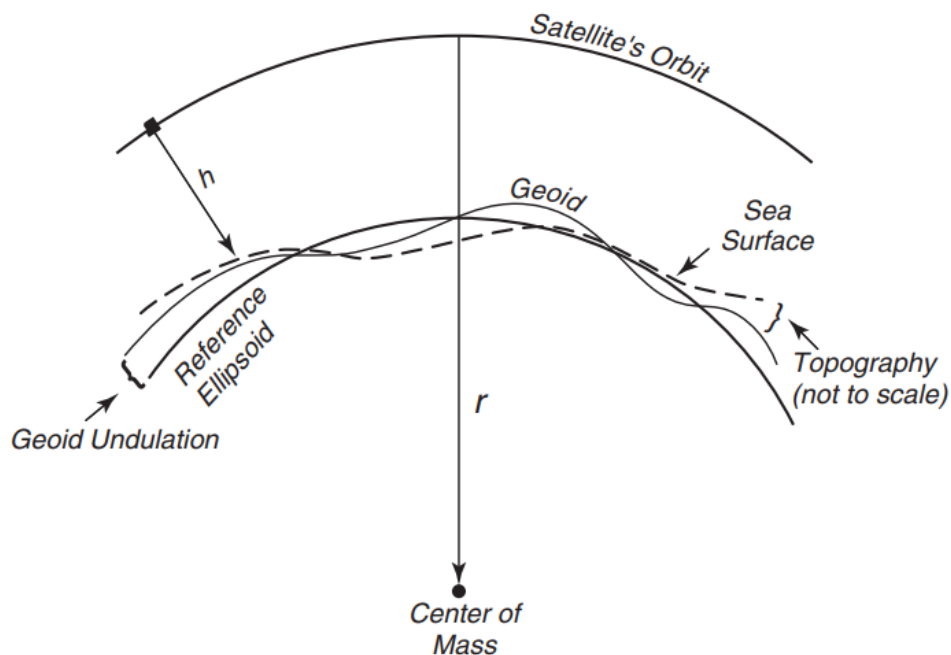


Рисунок 2. Схема измерения высоты спутника над уровнем моря спутниковым альтиметром [61]. При вычитании этого значения из высоты r орбиты спутника (Satellite's Orbit), получим уровень моря (Sea Surface) относительно центра Земли (Center of Mass). Форма поверхности изменяется под воздействием вариаций силы тяжести, которые вызывают ундуляции геоида (Geoid Undulation), и под воздействием океанских течений, которые приводят к образованию океанической топографии (Topography) (отклонениям поверхности моря от геоида). Референц-эллипсоид (Reference Ellipsoid) — наиболее близкая сглаженная аппроксимация геоида.

В зависимости от этапа обработки, данные спутниковой альтиметрии делятся на несколько уровней. В данной работе использованы данные L3-уровня (вдольтрековые) и L4-уровня (интерполированные на регулярную сетку). Продукты L4 представляют собой сглаженные массивы, полученные путём пространственно-временной интерполяции вдольтрековых измерений с нескольких спутников. Эти данные удобны для мониторинга на больших масштабах, однако в районах с узкими и резко выраженными структурами (такими как САФ) они могут терять точность, особенно вблизи континентального склона. Поэтому особенностью данной работы является акцент на анализ именно вдольтрековых данных уровня L3, которые позволяют получить более точную информацию о структуре фронтов.

Пространственное разрешение вдоль трека здесь составляет 6.2 км, что сопоставимо с шириной прибрежных струй Мальвинского течения и позволяет выделить их положение с высокой точностью. Такой подход, хоть и требует более сложной обработки и фильтрации, открывает возможности более детального изучения фронтальной структуры.

Вдольтрековые спутниковые данные взяты с ресурса Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>, дата обращения 29.11.2024 [18]) 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 час 58 минут. Пространственный шаг между точками измерений составляет 6.2 км вдоль трека; расстояние между подспутниковыми треками в исследуемом районе составляет 155 км. Данный спутник выполняет миссию с 26.05.2016 по настоящее время. Ранее на этих же треках работали Торех/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 29 лет. Для анализа временной изменчивости САФ в проливе Дрейка выбран трек №28, ближайший к разрезу с натурными измерениями, ориентированный практически параллельно треку судна и находящийся на расстоянии около 45 км от разреза. Треки № 102, 26, 204, 128, 52, 239 (Рисунок 1) были выбраны для анализа положения и пространственной изменчивости Мальвинского течения в северной его части. Расстояние между соседними треками спутников зависит от широты места; в исследуемом регионе это расстояние составляет около 130 км.

Для оценки пространственного распределения градиентов АДТ использовался массив данных под идентификатором с сайта CMEMS [18] – SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047 уровня L4, 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 [6, 25, 26, 28, 30]. Тем не менее, использование обоих типов данных — L3 и L4 — позволило сопоставить разные подходы и выявить преимущества вдольтрекового анализа в задачах детализированного позиционирования фронтов.

2.3. Методика определения фронтов

В настоящее время существует несколько критериев для определения фронтальных зон и струй АЦТ на основе спутниковой альтиметрии. Для САФ-с авторы [14] предлагают использовать изолинию АДТ 23 см, в работе [2] использовалась изолиния 25 см. Главную ветвь авторы [14] определяли по изолинии -10 см, авторы [2] по 0 см. В работе [7] выделяют САФ по фиксированной изолинии АДТ равной 12 см, [63] 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 от различных выбросов [21], поэтому некоторые треки содержат неполный набор точек измерений. Часто

отсутствуют результаты измерений в шельфовой зоне, над глубинами менее 300 м. Поскольку пространственный шаг вдоль трека составляет 6.2 км, а ширина САФ-с в среднем 10-20 км [28, 39], было важно оставить для дальнейшего анализа наиболее полные треки. В связи с этим, для анализа не использовались треки, содержащие пропуски в трех и более точках подряд, или пропуски более 20 км. Кроме этого, были выбраны треки, заполненные на 90% и с имеющимся непрерывными измерениями над континентальным склоном. Каждый трек прошел фильтрацию на основе непрерывности точек измерения. Изначально каждый трек содержит от 1048 до 1057 пролётов в одних и тех же координатах с января 1993 по февраль 2022 года. Сохранены для дальнейшей обработки треки, заполненные не менее чем на 90%. Треки с пробелами более 20 км подряд удаляются, так как расстояние между двумя точками измерений составляет 6.2 км, большие пробелы могут привести к пропуску прибрежной струи. Промежутки менее 20 км заполнялись линейной интерполяцией между двумя крайними точками. На данном этапе наш набор отфильтрованных данных содержит от 700 до 950 повторов одного и того же трека.

Согласно работе [58], струи Антарктического циркумполярного течения идентифицируются по продольному (вдоль трека спутника) градиенту абсолютной динамической топографии (АДТ), превышающему 25 мм/км. В данной работе этот критерий применялся для предварительного отбора треков: если на всём рассматриваемом участке трека значение градиента ни в одной точке не превышало порог 25 мм/км, такой трек исключался из дальнейшего анализа.

Далее для определения фронтов отмечаются точки трека, соответствующие градиенту АДТ более 25 мм/км, а также над глубинами более 190 м. Ближайший к изобате 200 м сильный градиент маркируется как прибрежная струя, а следующий градиент, удовлетворяющий условиям как основная струя. Однако если на этом участке трека обнаружен единственный

сильный градиент, он маркируется как одна слившаяся струя Мальвинского течения. В качестве дополнительного условия, если между двумя рядом стоящими пиками градиента не было перехода градиента через -0.0025 м/км, такой случай так же маркируется как одна слившаяся струя. Например, по итогам очистки данных от неполных и неподходящих треков для подробного анализа трека №28 в проливе Дрейка осталось 780 из 942 пролетов спутников за промежутки времени с 10.02.1993 по 03.06.2020.

Таблица 1. Количество пролетов альтиметрических спутников за период 1993-2022 по отдельным трекам, использованных для анализа положения фронтов в юго-западной Атлантике.

№ трека	Средняя широта, °	Средняя долгота, °	Кол-во пролётов	После фильтрации	Найдено САФ-с	Найдено САФ-гл	Найдено САФ	% использовано
28	51.2	61.5	942	780	-	-		82.8
102	50.9	62.7	1057	691	0	0	691	65.4
26	49.9	62	1052	776	75	75	701	73.8
204	48.5	61.6	1051	832	47	47	785	79.2
128	47.6	61.2	1048	831	162	162	669	79.3
52	46.2	60.8	1054	861	601	601	260	81.7
163	44.6	60.4	1049	831	365	365	457	79.2
239	43.6	59.8	1051	887	314	314	573	84.4
61	42.5	59.6	1052	883	383	383	500	83.9

Уровень АДТ в мировом океане возможно пересчитать в компоненты геострофической скорости поверхностных течений, используя формулы:

$$u_s = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad v_s = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial x},$$

где g – ускорение свободного падения, f – параметр Кориолиса, ζ – возвышение уровня над ровной поверхностью [61].

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 [58]. САФ-с прижимается к изобатам 200-300 м вдоль кромки континентального шельфа и редко отходит от него дальше изобаты 3500 м [47, 54]. 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. Пример определения фронта по выработанному критерию представлен на рисунке 3.

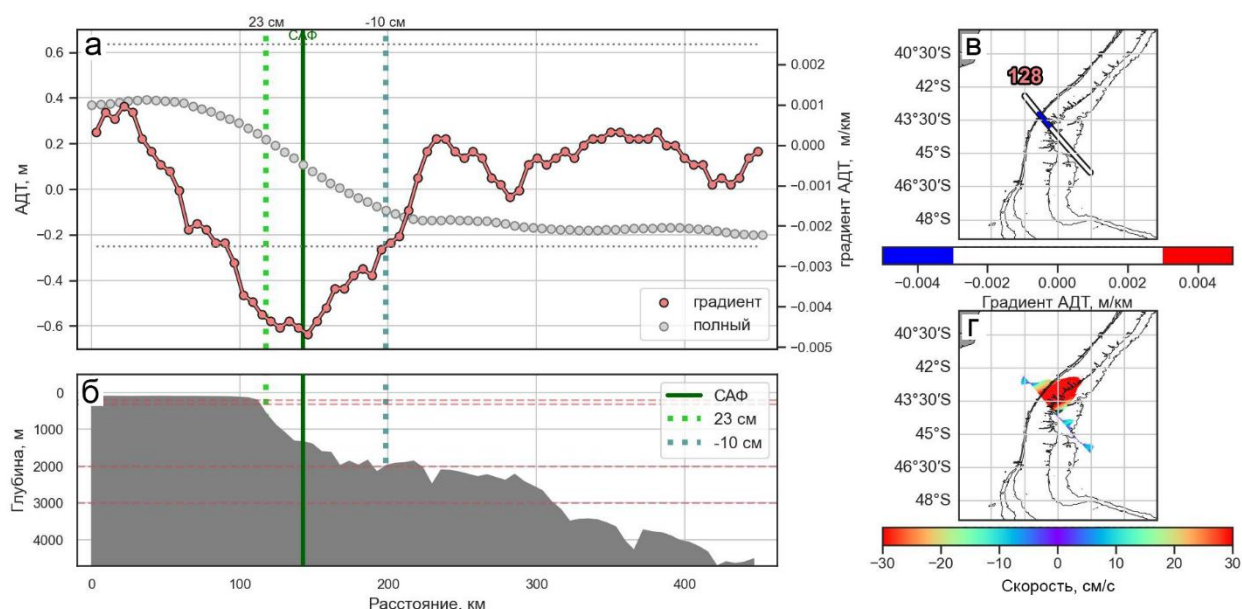


Рисунок 3. Пример определения САФ по вдольтрековой альтиметрии. График а – розовой линией показан градиент АДТ, серой линией показан АДТ, тёмно-зеленой вертикальной линией показано положение слившейся струи САФ согласно максимуму градиента АДТ, пунктирными вертикальными линиями показаны положения АДТ 23 и 10 см, принятые [14] для идентификации САФ-с и САФ-гл. в – карта с номером и расположением трека, синий цвет на треке соответствует градиенту сильнее 25 мм/км. г – карта с распределением геострофических скоростей течения, вычисленных из вдольтрековой АДТ. Блок б содержит батиметрию под треком альтиметра, которая взята с ресурса GEBCO, 2023 [31].

ГЛАВА 3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СУБАНТАРКТИЧЕСКОГО ФРОНТА

3.1. Судовые измерения

В данном разделе приведён сравнительный анализ результатов судовых измерений и спутниковых данных, направленный на идентификацию и характеристику пространственной структуры САФ. Особое внимание уделено точности совпадения критериев определения фронтов, а также влиянию батиметрии на пространственную вариативность ветвей.

Разрез термохалинной структуры в северной части Мальвинского течения представлен на рисунке 4 (а–с). В верхней панели (Рисунок 4а) хорошо выражен наклон изотерм к материковому склону, при этом на станциях, расположенных над шельфом, температура в поверхностном слое достигает 13°C , тогда как в струе Мальвинского течения наблюдается быстрое понижение до 6°C . В зоне фронта отмечено интенсивное перемешивание: на глубинах 50–150 м изотермы резко опускаются, а над шельфом на станциях 7395–7397 наблюдаются участки даунвеллинга (указаны чёрными стрелками). На станциях 7400–7401 над кромкой шельфа и континентальным склоном отмечены зоны апвеллинга (белые стрелки), что также характерно для фронтальной области.

Распределение солёности (Рисунок 4б) также демонстрирует ярко выраженную градиентность. Внутри шельфовых вод наблюдается относительно пониженная солёность (менее 33.6 PSU), тогда как в струе Мальвинского течения солёность достигает 34.2 PSU. Положение фронта определяется по резкому наклону изохалин и проникновению солёных вод на шельф в следствии перемешивания.

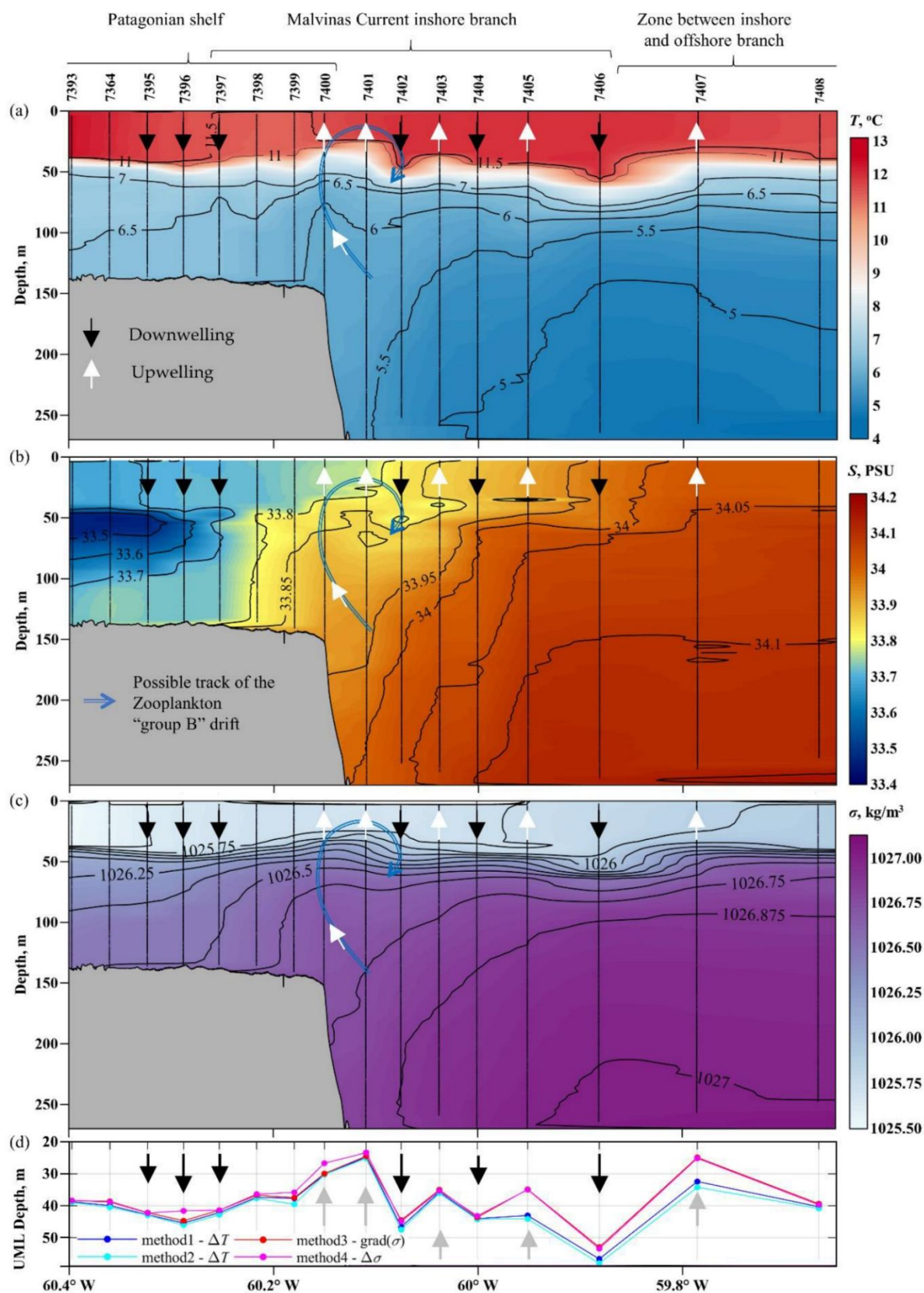


Рисунок 4. Зональный разрез STD на 46° ю.ш. через прибрежную ветвь Мальвинского течения [50] выполненный на НИС «Академик Мстислав Келдыш» через САФ-с в феврале 2022 года. Распределение потенциальной температуры (а), солёности (б) и плотности (с). В блоке (д) показана глубина

верхнего перемешанного слоя, определенная разными методами. Вертикальными линиями отмечено положение STD-станций; номера станций указаны вдоль верхней оси. Черными и белыми стрелками показаны зоны даунвеллинга и апвеллинга соответственно.

Структура потенциальной плотности (Рисунок 4с) подтверждает наличие фронта, о чем свидетельствует сильный наклон изопикн. На горизонте 100 метров плотность возрастает с запада на восток более чем на 0.5 кг/м^3 . Сильнейший наклон наблюдается над континентальным склоном, где фронт наиболее устойчив и чётко выражен. Эти данные согласуются с распределением восходящих и нисходящих движений вод. Глубина верхнего перемешанного слоя (Рисунок 4d), определённая четырьмя методами, варьирует вдоль разреза от 20 до 90 м, показывая локальные минимумы в районе фронта. Это дополнительно указывает на фронтальную зону как область активного обмена и перемешивания вод.

На рис. 5 (а, б) представлен разрез температуры и солёности в проливе Дрейка по данным САФ-с, где отмечается резкий наклон изотерм и изохалин в сторону материкового склона. В зоне над континентальным склоном верхний слой океана обладает менее выраженной стратификацией, чем в открытой части. Глубина верхнего перемешанного слоя на станциях 6632–6636 составляет 50 м, увеличиваясь по мере приближения к шельфу. На станции 6640 зарегистрировано ядро течения по данным судового профилографа, а также слабый вертикальный градиент температуры: на 100 м — 6.9°C , на 200 м — 6.3°C (средний градиент 0.006°C/м). Вне течения, на станции 6632, градиент резче: между 50 и 100 м температура снижается на 2°C (градиент 0.04°C/м). Аналогичная картина наблюдается для солёности: в перемешанном слое — менее 34 PSU, а в глубоководной части — до 34.2 PSU.

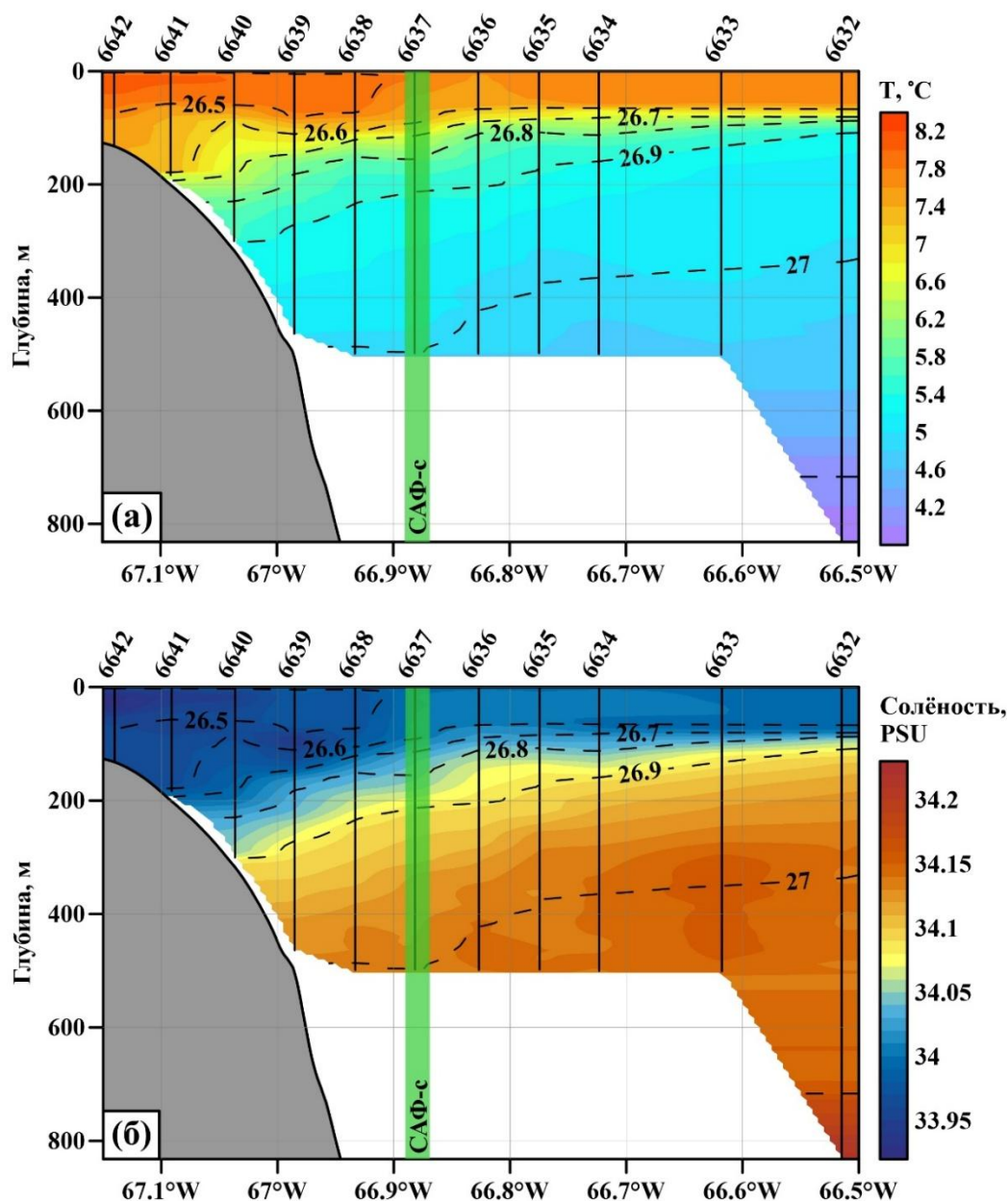


Рисунок. 5. Распределение потенциальной температуры (а) и солёности (б) на разрезе, выполненном на НИС «Академик Мстислав Келдыш» через САФ-с в проливе Дрейка 06.02.2020 [43]. Изолинии потенциальной плотности показаны штриховыми линиями. Вертикальными линиями отмечено положение STD-станций; номера станций указаны вдоль верхней оси. Зеленой полосой показано положение САФ-с по максимуму градиента АДТ по данным альтиметрии на регулярной сетке на 06.02.2020 в соответствии с критерием [14]. Большинство станций выполнялось до глубины 500 м; станции 6639-6642 на глубине меньшей 500 метров выполнялись до дна; измерения на станции 6632 были проведены до глубины 832 м.

Оба разреза (Рисунки 4 и 5) демонстрируют схожую термохалинную структуру Субантарктического фронта. Во всех случаях наблюдается

отчётливый наклон изотерм и изохалин в районе материкового склона, что свидетельствует о наличии фронтальной зоны. Внутри фронта отмечается ослабление вертикальной стратификации, наличие перемешанных вод и признаков вертикальных движений. Температурные и солёностные градиенты максимальны на глубинах 50–200 м, где сосредоточено ядро течения. Плотностная структура также подчёркивает устойчивость фронта и его выраженность на всём протяжении. Эти наблюдения согласуются с концепцией САФ как мощного бароклинного фронта, контролирующего обмен вод между шельфом и открытым океаном

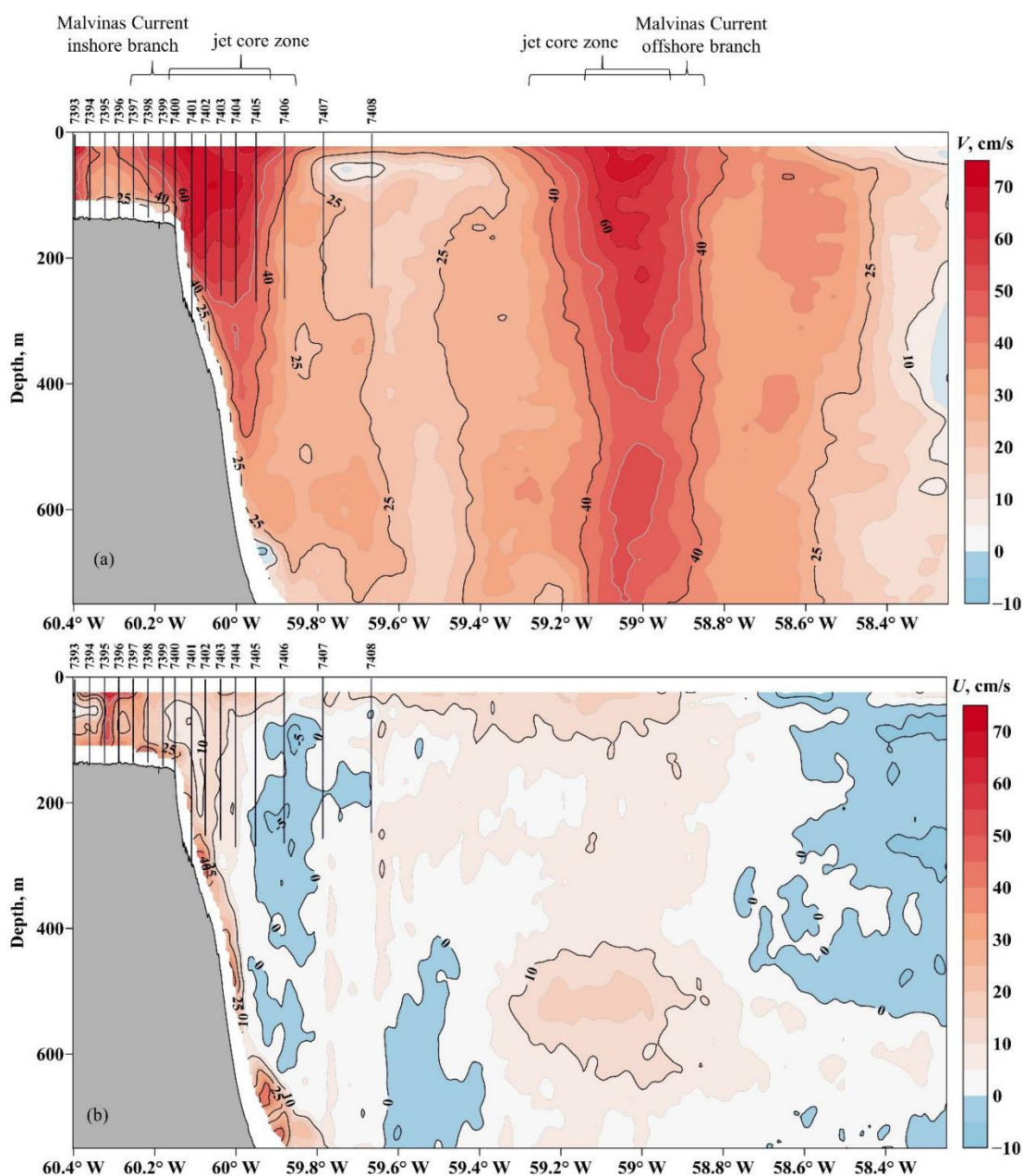


Рисунок 6. Распределение северной (а) и восточной (b) компонент скорости течения по данным SADCP на 46° ю.ш. через прибрежную и основную ветви Мальвинского течения [50] выполненный на НИС «Академик Мстислав Келдыш» через САФ-с в феврале 2022 года. Вертикальными черными линиями отмечены станции CTD-измерений, сверху подписаны номера станций. Malvinas Current inshore branch – прибрежная ветвь САФ/МТ, jet core zone – зона ядра струи (ограниченная по изолинии скорости 60 см/с), Malvinas Current offshore branch – глубоководная ветвь САФ/МТ.

Кинематическая структура САФ/МТ была исследована во время попутных измерений с помощью SADCP во время 87-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в районе 46° ю.ш. (Рисунок 6). Представляет собой две выраженные струи с максимальными скоростями более 65 см/с. Распределение восточной компоненты (Рисунок 6b) скорости показывает, что обе струи направлены на север. На верхней панели рисунка 6 (а) чётко выражена прибрежная струя на станциях 7397-7406 со скоростями выше 40 см/с. Эти высокие скорости течения проникают до дна на глубину 500 м над континентальным склоном. Далее скорости уменьшаются до 25 см/с на глубинах с 500 до 700 м. В САФ-гл наблюдаются скорости выше 40 см/с по всей исследуемой толще до глубин более 700 м. Данный разрез подтверждает привязку САФ-с к кромке шельфа.

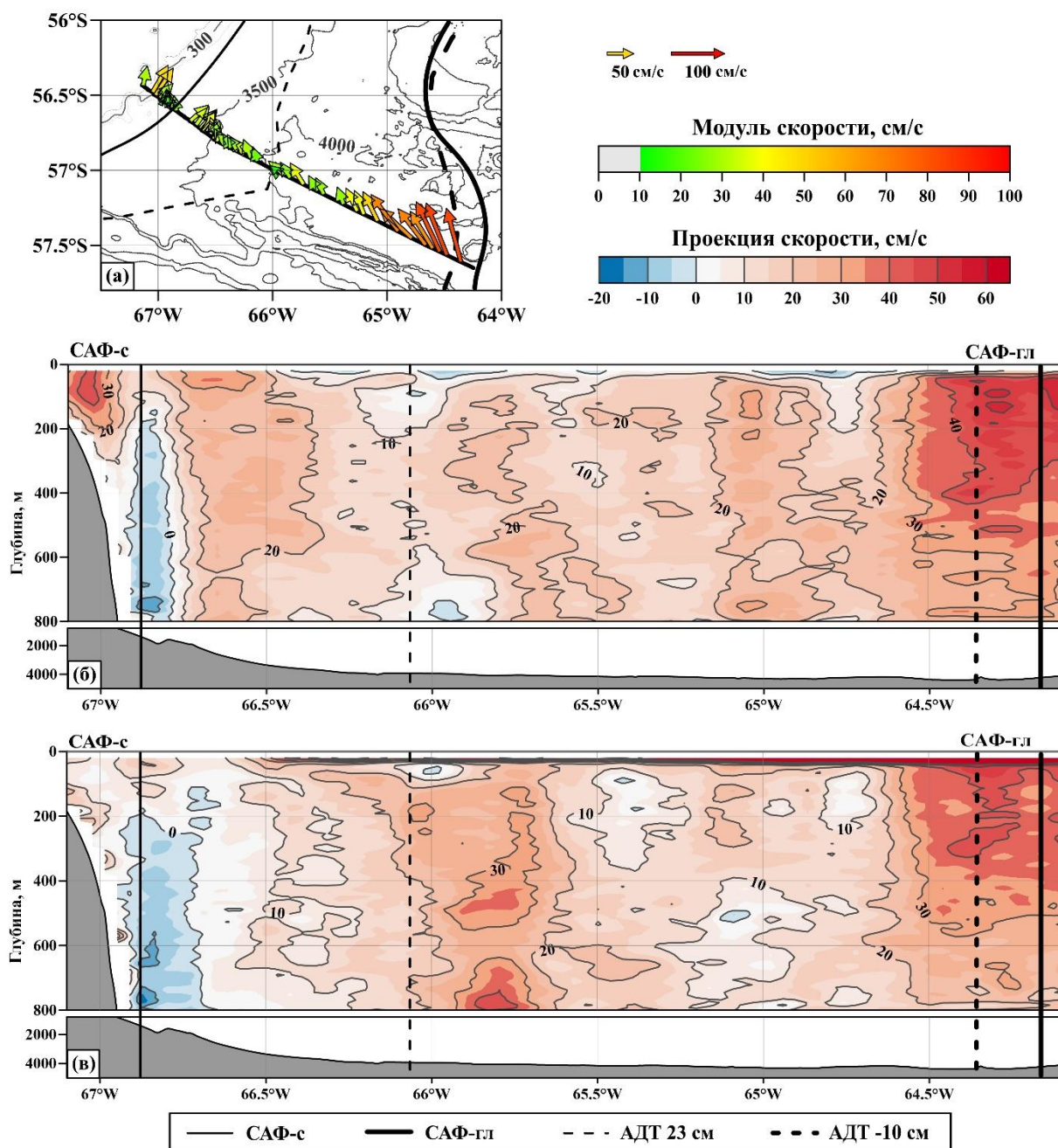


Рисунок 7. (а) Скорости течений, измеренные бортовым профилографом скорости, осредненные в верхнем 50-м слое [43]. (б). Распределение проекции измеренной скорости течения на направление 47° (соответствует направлению склона вдоль изобаты 300 м). Положительные скорости показаны красным цветом, направлены северо-восток. (в) Распределение компоненты скоростей течения поперек изобаты 300 м (положительное направление скорости соответствует азимуту 317°). Положительные скорости показаны красным цветом, направлены на северо-запад. Данные SADCP в придонном слое толщиной в 15% глубины исключены из рассмотрения в связи с ошибками, вызванными отражением акустического сигнала от дна. Штриховыми линиями отмечены положения фонов по АДТ 23 и -10 см,

согласно [14], сплошными линиями отмечены положения максимумов градиента АДТ по данным альтиметрии на регулярной сетке на 06.02.2020. Рельеф дна взят из базы данных GEBCO, 2023 [31].

По результатам попутных измерений бортовым профилографом скорости течений (SADCP) в проливе Дрейка в 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», наблюдаются две струи САФ (Рисунок 7б) [43]. 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 SADCP. Осредненные в верхнем 50-м слое скорости подтверждают, что САФ-с прижат к 300-метровой изобате (Рисунок 7а), 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° (Рисунок 7в). Поперек склона скорости течения САФ-с не превышают 10 см/с, а скорости САФ-гл достигают 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 судовых измерений скорости. При этом по данным альтиметрии на регулярной сетке изолиния АДТ 23 см, принятая для определения положения САФ-с, наблюдается на расстоянии около 50 км от максимума градиента и в

60 км от максимума скорости течения по данным SADCР. 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.

3.2. Спутниковые наблюдения

Пространственная структура Субантарктического фронта была исследована на основе спутниковых альтиметрических данных. Использование продуктов L3-уровня (вдольтрековая абсолютная динамическая топография и геострофические скорости) позволяет проследить положение фронтальных струй вдоль подспутниковых треков с высоким пространственным разрешением. Такой подход особенно ценен в районах, где фронтальные зоны приурочены к неровностям рельефа и могут быть недостаточно чётко выражены в регулярных полях L4. В этом разделе рассматривается распределение фронтов по данным альтиметрии, их временная и пространственная изменчивость, а также особенности положения прибрежной (САФ-с) и глубоководной (САФ-гл) ветвей вблизи Патагонского шельфа.

Сравнение определения положения фронта по термохалинной структуре и по данным SADCР показало, что фиксированные изолинии АДТ не позволяют с высокой точностью детектировать положение фронта с помощью спутниковой альтиметрии (Рисунок 7). Также при рассмотрении альтиметрии на регулярной сетке (Рисунок 8) можно отметить, что максимумы градиента АДТ совпадают с направлением кромки шельфа и положением прибрежной струи по натурным наблюдениям, однако фиксированные изолинии АДТ, выбранные авторами [14] отдалены от кромки шельфа на расстояние превышающие ширину САФ-с. При этом

максимумы градиента АДТ и изолинии АДТ -10 см совпадают по положению для САФ-гл на всём исследуемом участке в проливе Дрейка. Это говорит о том, что фиксированные изолинии возможно использовать для определения положения крупных струй, таких как САФ-с, но при определении прибрежной узкой струи САФ-с такой метод даёт неточности. Поэтому далее для определения фронта и его характеристик используется идентификация фронтов по максимумам градиента АДТ.

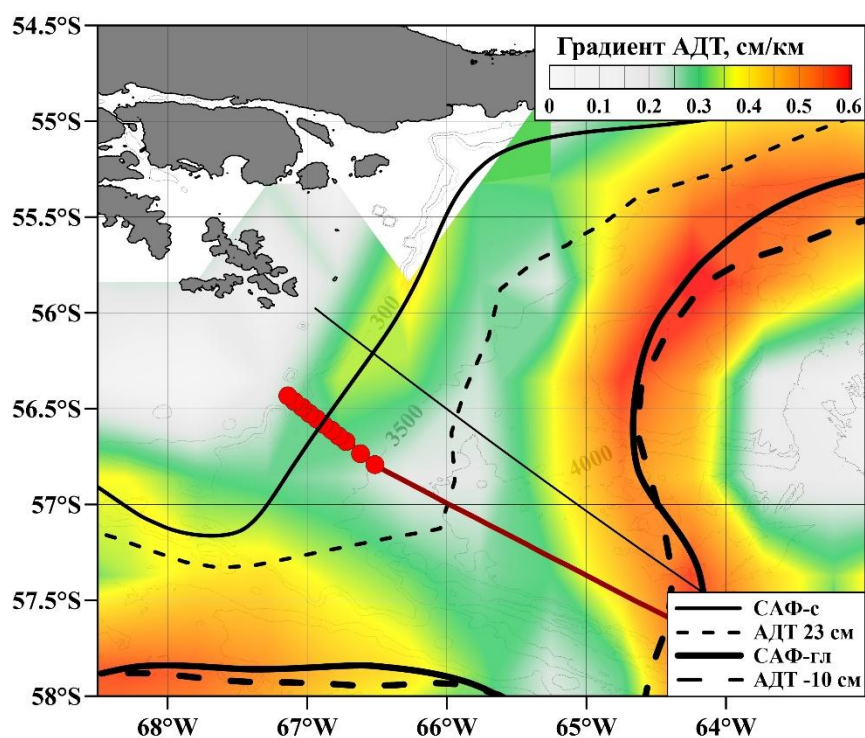


Рисунок 8. Распределение градиента АДТ по данным спутниковой альтиметрии на 06.02.2020. Штриховыми линиями показаны изолинии АДТ 23 см и -10 см. Локальные максимумы градиента АДТ в районе САФ-с и САФ-гл соединены тонкой и толстой сплошными черными линиями, соответственно. CTD-станции 6 февраля 2020 г. показаны красными точками, маршрут 79-й экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш» во время попутных измерений скоростей течений SADCIP – красной линией. Черной тонкой сплошной линией отмечен подспутниковый трек №28 Jason-3.

Применив метод определения положения фронта по максимуму градиента АДТ вдольтрековой альтиметрии проведён анализ положения САФ-с, САФ-гл, а также случаев, когда две эти струи сливались в одну (САФ-сл). Оценена пространственная изменчивость САФ/МТ в северной его

части от Фолклендских островов до зоны конfluenceции с Бразильским течением. На рисунке 11 представлены диапазоны встречаемости фронтов по данным спутниковой альтиметрии за период с января 1993 года по февраль 2022 года.

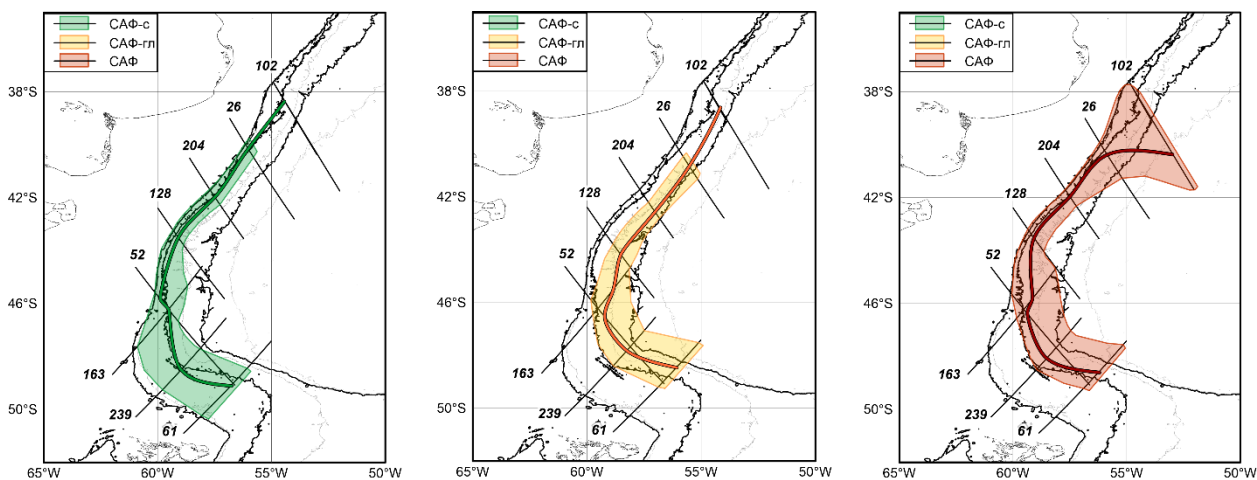


Рисунок 9. Диапазон местонахождения ядер струй Мальвинского течения (фронтов САФ-с, САФ-гл, САФ) в различные моменты времени за период 1993-2022. Зеленым выделена зона распространения прибрежной ветви течения, желтым обозначена зона распространения основной ветви течения, красным местоположение в случае слияния ветвей в одну струю. Прямыми линиями соединены точки среднего положения ветвей на треке за 29 лет согласно среднему арифметическому. Прямыми черными линиями обозначены траектории вдольтрековых альтиметров, цифрами подписаны номера треков.

Диапазон положений фронта варьируется как по широте, так и по долготе, в зависимости от рельефа дна и динамики течения. В северо-западной части карты (Рисунок 9), между 36.5° и 38.5° ю.ш. (район устья Рио-де-ла-Платы), ширина зоны встречаемости слившейся струи (САФ) достигает 3.5° по долготе — от примерно 58° до 54.5° з.д. Ширина зоны встречаемости в этом районе составляет 330–370 км. Здесь фронт может располагаться как у самой кромки шельфа, так и смещаться на восток в открытый океан. Это одна из самых нестабильных зон по положению струи, что связано с ослаблением зависимости от рельефа и интенсивной вихревой активностью в зоне конfluenceции.

Наиболее широкий диапазон положений двух отдельных ветвей САФ-с и САФ-гл зафиксирован в центральной части исследуемой зоны — между 45° и 50° ю.ш. Здесь расстояние между средними положениями прибрежной и глубокой струй достигает 160–180 км. Зоны встречаемости каждой из ветвей по отдельности простираются примерно на 130–170 км по широте и долготе. Такая структура обусловлена более пологим континентальным склоном Фолклендского плато, позволяющим струям меандрировать и расходиться друг от друга.

Южнее 45° ю.ш., по мере увеличения крутизны континентального склона, диапазон положений САФ становится меньше. В районе 43 – 41° ю.ш. фронтальные ветви фиксируются в полосе шириной 40–70 км, и перемещения фронта ограничены — как по широте, так и по долготе. Например, на треках №204 и 26 ширина зоны встречаемости слившейся струи не превышает 60 км (всего 0.5° по широте), что говорит о жёсткой фиксации струи вдоль изобат 200–1000 м.

Севернее 41° ю.ш., в районе конfluenceции Бразильского и Мальвинского течений, ширина зоны встречаемости вновь увеличивается, превышая 2.5° по долготе. Здесь фронт часто теряет чёткую структуру, а максимум градиента АДТ смещается между треками альтиметров, отражая нестабильность положения струи на фоне активной мезомасштабной динамики.

Таким образом, в наиболее стабильных (узких) участках, связанных с резким континентальным склоном (например, 42 – 44° ю.ш.), ширина положения фронта составляет 40–70 км, в то время как в наиболее широких — в районе Фолклендского плато и устья Рио-де-ла-Платы — достигает до 350 км, что подчёркивает важную роль подводного рельефа в структурировании фронта.

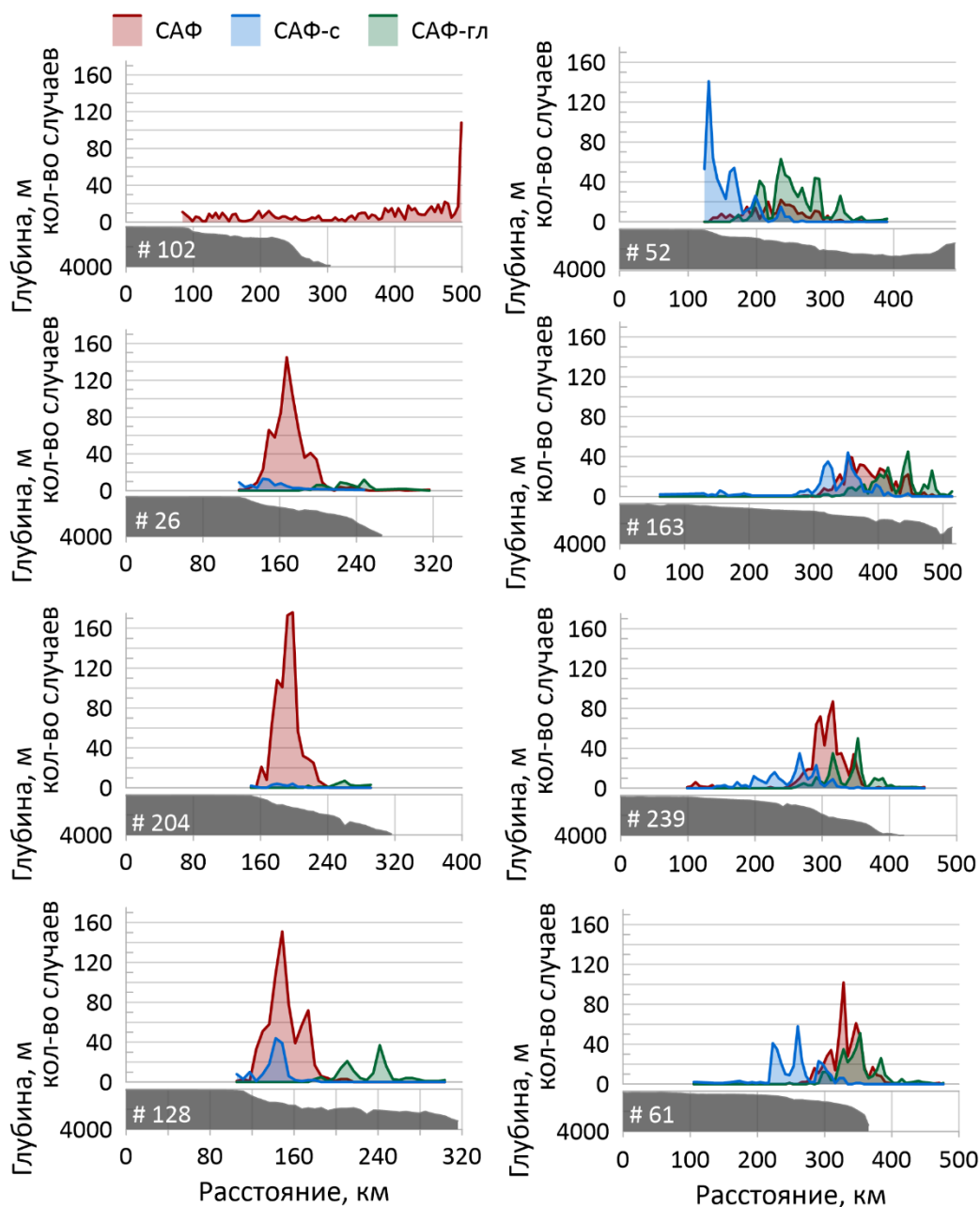


Рисунок 10. Распределение частоты встречаемости ветвей Мальвинского течения вдоль трека спутниковых альтиметров. Нижняя часть графика показывает профиль дна под треком. Синим цветом отмечено распределение прибрежной ветви, зеленым – основной/глубоководной, красным цветом слившаяся одна ветвь. Расстояние отсчитывается от первой точки измерения на выбранном участке альтиметрического трека.

На треках, проходящих над крутым и узким континентальным склоном (например, треки № 102 и 204), фронт практически всегда фиксируется в виде единой слившейся струи (Рисунок 10). Распределение таких струй сосредоточено в узком интервале расстояний (менее 60 км), при этом пик

частоты встречаемости фронта совпадает с резким переходом глубин от шельфовой части к абиссальной равнине. Подобная картина прослеживается и на треках № 26 и 128, однако на них уже наблюдаются эпизодические появления отдельных прибрежной и глубоководной ветвей, что может указывать на нестабильное расщепление фронта.

На треках № 52, 163, 239 и 61, расположенных южнее и пересекающих более пологий и широкий континентальный склон, структура фронта становится гораздо более сложной: все три варианта конфигурации струй присутствуют на протяжении значительной части трека, а зоны встречаемости растягиваются на 150–200 км. Особенно чётко разделение прибрежной и глубокой ветвей видно на треке № 52 (Рисунок 10), где оба пика выражены отчётливо и не перекрываются. Такая картина свидетельствует о том, что фронт в этих районах более подвижен и свободно меняет конфигурацию под влиянием топографии и гидродинамических факторов. В ряде случаев, как на треках № 239 и 61, прослеживается постепенное смещение струй от шельфа в сторону океана, при этом общая ширина зоны фронтальных проявлений достигает 200 км и более.

Анализ частоты встречаемости фронтальных структур по данным вдольтрековой альтиметрии показывает, что при наличии узкого и крутого склона фронт имеет устойчивое, компактное положение, тогда как на широком и пологом склоне наблюдаются множественные конфигурации струй, включая разделённые ветви и зоны слияния, что подчёркивает ведущую роль подводного рельефа в формировании фронтальной структуры САФ/МТ.

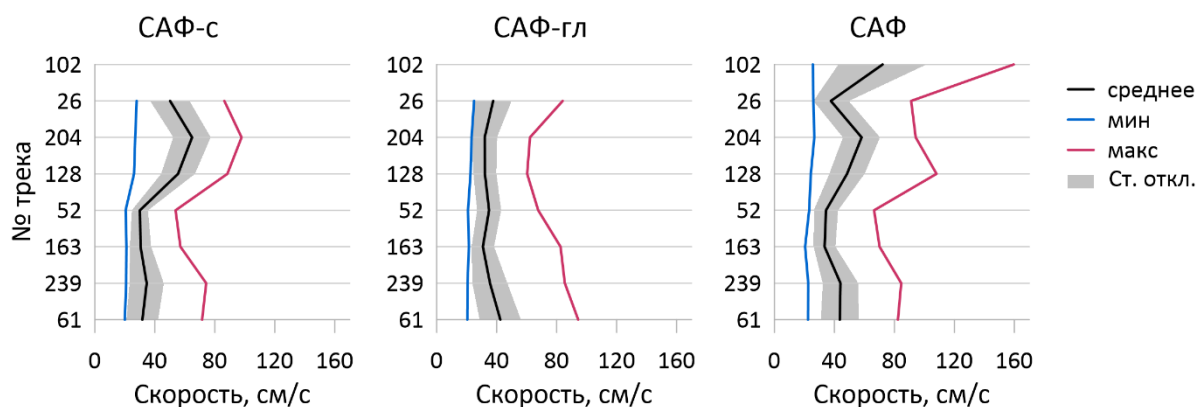


Рисунок 11. Распределение геострофических скоростей ветвей Мальвинского течения в зависимости от номера трека спутниковых альтиметров. Красным показаны максимальные скорости, синим – минимальные, серым выделено стандартное отклонение скоростей, черной линией показаны средние скорости (среднее арифметическое) для ветви на треке. Порядок треков на рисунке в соответствии с расположением треков – от юга к северу снизу вверх.

Рисунок 11 позволяет оценить распределение геострофических скоростей в различных ветвях Мальвинского течения (САФ-с, САФ-гл и САФ) по данным вдольтрековой спутниковой альтиметрии. Можно отметить, что прибрежная ветвь (САФ-с) демонстрирует выраженное нарастание средних и особенно максимальных скоростей по мере продвижения с юга к северу. Прибрежная ветвь (САФ-с) характеризуется значительной изменчивостью скоростей, особенно ярко выраженной на треках 204 и 128, где максимальные значения превышают 90 см/с. При этом минимальные значения остаются примерно на одном уровне, что объясняется особенностями методики — в анализ не включались скорости, соответствующие градиенту АДТ ниже 25 мм/км, т.е. менее 20 см/с. Глубоководная ветвь (САФ-гл) демонстрирует более сглаженные характеристики: как средние, так и экстремальные значения скоростей здесь ниже, а разброс значений меньше, что может указывать на её большую устойчивость во времени. Севернее трека 52 наблюдается заметное снижение скоростей в САФ-гл, тогда как в прибрежной струе напротив — фиксируется ускорение.

Для случаев, когда обе ветви сливаются в единую струю (САФ), характерно резкое возрастание средних и максимальных скоростей к северу. Особенно это заметно от 128 трека и севернее, где пиковые значения достигают 160 см/с, что, вероятно, связано с наложением прибрежной и глубокой струй. В этих случаях также увеличивается стандартное отклонение, что указывает на высокую флуктуационную подвижность и возможную сезонную или межгодовую изменчивость скорости течения в зоне фронта.

Общая структура распределения геострофических скоростей на альтиметрических треках подчёркивает ключевую роль морфологии дна и конфигурации фронта. Эти данные подтверждают наблюдавшиеся ранее закономерности: при увеличении крутизны шельфа прибрежная струя ускоряется и стабилизируется, тогда как на широких участках склонов фронт становится более изменчивым, а скорости — более вариативными. Анализ вдольтрековой альтиметрии позволяет выявить закономерности в структуре и скорости различных ветвей САФ. В районах слияния струй наблюдается наибольшая стабильность положения фронта и максимальные скорости, тогда как в южных регионах, особенно над широкими шельфами, фронт демонстрирует значительную изменчивость. Эти результаты подчёркивают значительное влияние морфологии дна на пространственную организацию фронтальных струй, а также указывают на необходимость использования адаптивных критериев при идентификации фронтов на основе спутниковых данных.

3.3. Рост уровня моря в регионе

Поскольку в работе использовались данные уровня моря (АДТ), дополнительным результатом оказалось подтверждение роста уровня моря в регионе. На рисунке 12 показан уровень АДТ для каждой точки на спутниковом треке за каждый год наблюдения. Регулярные данные

осреднены по годам. Во всех пяти случаях отчётливо прослеживается устойчивый тренд повышения уровня моря.

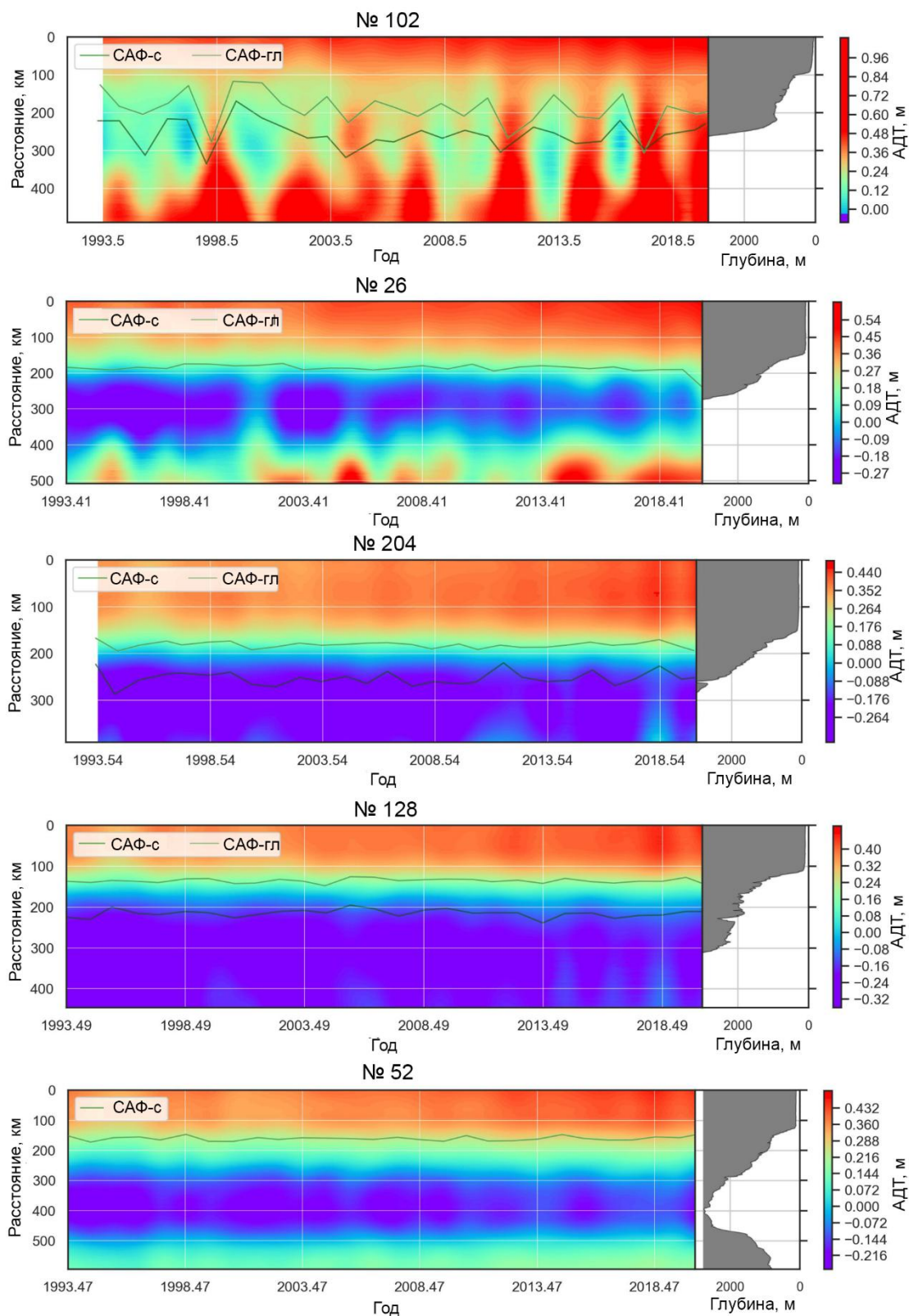


Рисунок 12. Распределение долгопериодных изменений уровня моря в исследуемом регионе по данным спутниковой альтиметрии. Вертикальная

ось соответствует расстоянию от первой точки измерения на выбранном участке альтиметрического трека сверху вниз соответственно. На горизонтальной оси указаны годы наблюдения. Регулярная сетка закрашена исходя из значения АДТ в соответствующей точке на треке в момент времени от отрицательных (фиолетово-синие оттенки) до положительных (оранжево-красные). На каждом графике проведены линии, соответствующие положениям максимума градиента АДТ, которые служат индикаторами положения фронтальных струй: светло-зелёная линия для прибрежной ветви (САФ-с) и тёмно-зелёная — для глубокой ветви (САФ-гл). В правой части показан профиль дна в соответствующих точках трека и закрашен серым.

Для трека 102 среднее по этому фрагменту трека значение АДТ в 1993–1994 годах составляло около 0.25 м, а в период 2018–2022 годов — уже 0.54 м, то есть рост составил примерно 29 см. На треке 26 рост ещё более выражен: от 0.04 м в начале периода альтиметрических наблюдений до 0.40 м в последние годы, то есть почти 36 см. На треках 204, 128 и 52 наблюдается аналогичное повышение: для трека 204 — от 0.05 м до 0.33 м, на треке 128 — от 0.07 м до 0.29 м, и на треке 52 — от 0.08 м до 0.34 м, что даёт прирост в пределах 21–28 см.

Рост АДТ на треках 102 и 16 наблюдается как в зоне шельфа, так и в океанической части, затрагивая всю ширину трека. В остальных случаях рост наблюдается в основном в шельфовой зоне. Несмотря на рост уровня АДТ, пространственная организация фронтовых струй остаётся во многом стабильной. Линии положения фронтов, построенные по максимуму градиента АДТ, не демонстрируют чётко выраженного смещения на десятилетнем масштабе. Исключение составляет трек 102, где заметна большая межгодовая изменчивость положения прибрежной и глубокой струй — фронты смещаются то ближе к шельфу, то в сторону океана на 50–70 км. На остальных треках (особенно 204 и 128) фронты ведут себя устойчиво: за 29 лет положение струй сохраняется практически в одном и том же интервале расстояний. Это подтверждает, что, несмотря на повышение уровня моря, фронтальные струи сохраняют пространственную

устойчивость, вероятно, за счёт привязки к элементам подводного рельефа. Таким образом, определение местоположения фронтов по фиксированным изолиниям АДТ будет со временем всё более некорректным, а использование метода максимума градиента позволит наиболее точно выявить местоположение фронта.

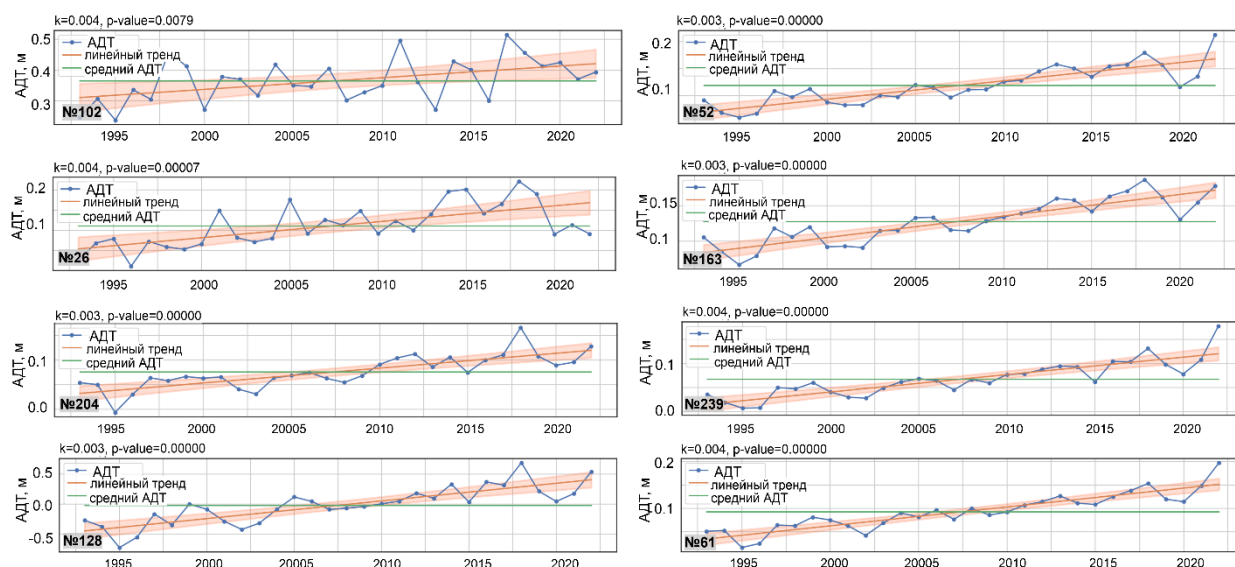


Рисунок 13. Линейный тренд осредненного по годам АДТ для каждого трека за весь исследуемый фрагмент трека. Синей линией с синими точками обозначено среднее для соответствующего трека АДТ за год. Оранжевой линией показана линия линейного тренда в доверительном интервале 95% со светло-оранжевой заливкой. Зеленой линией показано среднее значение для трека за весь период наблюдений – нулевая гипотеза о неизменности уровня АДТ.

Долгосрочный тренд повышения абсолютной динамической топографии численно подтверждается данными, представленными на рисунке 13. Темпы роста варьируются от 2.9 ± 0.17 мм/год до 5.9 ± 0.15 мм/год, в зависимости от географического положения трека. Наибольшие значения наблюдаются на треках 102, 239 и 61, где подъём АДТ достигает соответственно 4.0 ± 0.11 мм/год (113 ± 3.1 мм за 28 лет), 5.9 ± 0.15 мм/год (165.2 ± 4.2 мм за период наблюдений) и 5.6 ± 0.14 мм/год (около 157 мм). На треках 26, 52, 163 и 204 тренд чуть менее выражен, но также остаётся положительным: прирост за весь период составляет от 81 до 120 мм.

Минимальные, но статистически значимые темпы наблюдаются на треках 128 и 204 — 2.9 ± 0.17 мм/год (примерно 81.2 ± 4.8 мм).

Во всех случаях значения p -value < 0.01 , а в большинстве — ниже 0.00001, что указывает на высокую степень статистической значимости тренда. Даже при наличии флуктуаций в отдельные годы, особенно в 1990-х, с начала 2000-х годов все треки демонстрируют устойчивое и согласованное увеличение уровня моря. Совокупность этих результатов указывает на то, что наблюдаемый рост АДТ — это не локальный, а региональный процесс, затрагивающий юго-западную Атлантику в целом и отражающий общемировой тренд климатических изменений.

Заключение

Результаты проведённого исследования показывают высокую пространственную изменчивость положения Субантарктического фронта (САФ) в районе Патагонского шельфа. Наибольший разброс положений струй наблюдается на альтиметрических треках от 50 до 46° ю.ш., где склон континентального шельфа пологий. В этих условиях фронт оказывается менее жёстко привязан к топографии дна и демонстрирует повышенную вариативность положений относительно кромки шельфа. По мере увеличения крутизны континентального склона на север, траектория фронта становится более устойчивой и приближённой к кромке шельфа, что свидетельствует о возрастании роли топографических ограничений в формировании структуры течения.

Особенности конфигурации ветвей фронта также варьируются по широте: в северной части исследуемого района преобладает слияние прибрежной и глубинной струй в единую фронтальную зону, тогда как в южной части фиксируются все три варианта пространственной структуры — разделённые прибрежная (САФ-с) и глубинная (САФ-гл) ветви, а также ситуация, в которой струи оказываются объединены в одно течение.

Было также показано, что в регионе наблюдается устойчивый рост уровня моря. В таких условиях использование фиксированных абсолютных значений уровня динамической топографии (АДТ) для идентификации фронтов может приводить к значительным ошибкам в определении местоположения фронтов. Наиболее надёжным и адаптивным методом выделения фронтальных зон в современных условиях остаётся анализ максимумов градиента АДТ, позволяющий учитывать как долгосрочные изменения, так и сезонную и межгодовую изменчивость.

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. 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>
4. 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>
5. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Струи Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка по данным гидрофизических разрезов 2010 и 2011 гг // Современные проблемы термогидромеханики океана. 2017. С. 167–169. <https://doi.org/10.29006/978-5-9901449-3-4-2017-1-167-169>
6. 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>
7. 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.
8. Arkhipkin A. I., Laptikhovsky V. V., Barton A. J. Biology and fishery of common hake (*Merluccius hubbsi*) and southern hake (*Merluccius australis*) around the Falkland/Malvinas Islands on the Patagonian Shelf of the Southwest Atlantic Ocean // Hakes: Biology and Exploitation. 2015. P. 154–184. <https://doi.org/10.1002/9781118568262.ch6>
9. (a) Artana C., Ferrari R., Koenig Z., Saraceno M., Piola A.R., Provost C. Malvinas Current variability from Argo floats and satellite altimetry // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123. P. 3784–3798.
10. (b) 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>
11. Artana C., Provost C., Lellouche J.M., Rio M.H., Ferrari R., Sennéchaël, N. The Malvinas Current at the confluence with the Brazil current: Inferences from 25 years of Mercator ocean reanalysis. Journal of Geophysical

Research: Oceans. 2019. V. 124. P. 7178–7200.
<https://doi.org/10.1029/2019JC015289>

12. Artana C., Provost C., Poli L., Ferrari R., Lellouche J.-M. Revisiting the Malvinas Current upper circulation and water masses using a high-resolution ocean reanalysis. *J. Geophys. Res.* 2021. V. 126, P. e2021JC017271. <https://doi.org/10.1029/2021JC017271>

13. Barré N., Provost C., Saraceno M. Spatial and temporal scales of the Brazil–Malvinas Current confluence documented by simultaneous MODIS Aqua 1.1-km resolution SST and color images. *Advances in Space Research.* 2006. V. 37. № 4. P. 770–786.

14. Barré N., Provost C., Renault A., Sennéchaël N. 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>

15. Chapman C.C., Lea M.A., Meyer A., Sallée J.B., Hindell M. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate // *Nature Climate Change.* 2020. V. 10. № 3. P. 209–219.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0705-4>

16. Chelton D.B., Schlax M.G., Witter D.L., Richman J.G. 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>

17. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography.* 2011. V. 91. P. 167–216.

18. CMEMS. [Электронный ресурс]/ Содержит информацию о продукте – Режим доступа: <http://marine.copernicus.eu/> – свободный. (дата обращения 29.11.2024).

19. Cunningham, S., Alderson, S., King, B., & Brandon, M. (2003). Transport and variability of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage // *Journal of Geophysical Research.* 2003. V. 108. № C5. P. 8084.
<https://doi.org/10.1029/2001JC001147>

20. Deacon G.E R. The hydrology of the Southern Ocean // *Discovery Rep.* 1937. V. 15. P. 3–122.

21. 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>

22. 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:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)

23. 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>
24. Fetter A. F. H., Matano R. P. On the origins of the variability of the Malvinas Current in a global, eddy- permitting numerical simulation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2008. – T. 113. – №. C11.
25. Ferrari R., Provost C., Renault A., Sennéchaël N., Barré N., Park Y., Lee J.H. 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. P. 2012JC008264. <https://doi.org/10.1029/2012JC008264>
26. Ferrari R., Artana C., Saraceno M., Piola A.R., Provost C. 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>
27. 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. P. C08015. <https://doi.org/10.1029/2011JC006999>
28. Frey D.I., Piola A.R., Krechik V.A., Fofanov D.V., Morozov E.G., Silvestrova K.P., Tarakanov R.Yu., Gladyshev S.V. Direct measurements of the Malvinas Current velocity structure // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2021. V. 126. № 4. P. e2020JC016727. <https://doi.org/10.1029/2020JC016727>
29. Frey D.I., Kubryakov, A.A. Dynamic structure of eddies of the Brazil-Malvinas Confluence zone revealed by direct measurements and satellite altimetry // *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 2023. V. 128. P. e2023JC019957. <https://doi.org/10.1029/2023JC019957>
30. 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. V. 196. P. 104023.
31. GEBCO Compilation Group (2023) GEBCO 2023 Grid. [doi:10.5285/f98b053b-0cbc-6c23-e053-6c86abc0af7b](https://doi.org/10.5285/f98b053b-0cbc-6c23-e053-6c86abc0af7b)
32. Irusta G., Macchi G.J., Louge E., Rodrigues K.A., D'Atri L.L., Villarino M.F., Santos B.A., Simonazzi M. Biology and fishery of the Argentine hake (*Merluccius hubbsi*) // *Revista de Investigación y Desarrollo Pesquero*. 2016. V. 28 P. 9–36. <https://marabierto.inidep.edu.ar/handle/inidep/1665>.
33. 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>
34. Leyba I. M., Saraceno M., Solman S. A. Air-sea heat fluxes associated to mesoscale eddies in the Southwestern Atlantic Ocean and their dependence on different regional conditions // *Climate Dynamics*. – 2017. – T. 49. – C. 2491-2501.

35. *Mason, E., A. Pascual, P. Gaube, S. Ruiz, J. L. Pelegrí, and A. Delepouille.* Subregional characterization of mesoscale eddies across the Brazil-Malvinas Confluence // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 2017. – T. 122. – №. 4. – C. 3329-3357.
36. *Morozov E.G., Tarakanov R.Yu., Ansorge 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.
37. *Morozov E.G., Tarakanov R.Yu., Demidova T.A., Frey D.I., Makarenko N.I., Remeslo A.V., Gritsenko A.M.* 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>
38. (a) *Morozov E.G., Spiridonov V.A., Molodtsova T.N., Frey D.I., Demidova T.A., Flint M.V.* 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>
39. (b) *Morozov E.G., Frey D.I., Fofanov D.V., Krechik V.A., Tarakanov R.Yu., Vinokurov D.L.* 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>
40. *Morozov E.G., Frey D.I., Krechik V.A., Latushkin A.A., Salyuk P.A., Seliverstova A.M., Mosharov S.A., Orlov A.M., Murzina S.A., Mishin A.V., Chukmasov P.V., Kubryakov A.A., Budyansky M.V., Zuev O.A., Mekhova O.S., Ponomarev V.I., Chultsova A.L., Masevich A.V., Torgunova N.I., Kholmogorov A.O., Shtraikhert E.A., Mosharova I.V., Neretin N.Yu., Kolbasova G.D., Syomin V.L., Tretiakov A.V., Tretiakova L.G., Chernetsky A.D.* Multidisciplinary Observations across an Eddy Dipole in the Interaction Zone between Subtropical and Subantarctic Waters in the Southwest Atlantic // *Water.* 2022. V. 14. № 17. P. 2701. <https://doi.org/10.3390/w14172701>
41. *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. № 5. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/1653
42. *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](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00021-W)
43. *Ostroumova S.A., Drozd I.D., Frey D.I.* Structure and Temporal Variability of the Northern Branch of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage // *Oceanology.* 2023. V. 63. № 4. P. 440–452.
44. *Paniagua G.F., Saraceno M., Piola A.R., Guerrero R., Provost C., Ferrari R., Lago L.S., Artana C.I.* Malvinas Current at 40°S–41°S: First assessment of temperature and salinity temporal variability // *Journal of*

Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123. № 8. P. 5323–5340. <https://doi.org/10.1029/2017JC013666>

45. *Piola A.R., Franco B.C., Palma E.D., Saraceno M.* Multiple jets in the Malvinas Current // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. V. 118 № 4. P. 2107–2117. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20170>

46. *Portela J.M., Pierce G.J., Del Río J.L., Sacau M., Patrocinio T., Vilela R.* Preliminary description of the overlap between squid fisheries and VMEs on the high seas of the Patagonian Shelf // *Fisheries Research*. 2010. V. 106. № 2. P. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.06.009>

47. *Provost C., Renault A., Barré N., Sennéchaël N., Garçon V., Sudre J., Huhn O.* 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>

48. *Renault A., Provost C., Sennéchaël N., Barré N., Kartavtseff A.* Two full-depth velocity sections in the Drake Passage in 2006 – Transport estimates // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2011. V. 58. № 25–26. P. 2572–2591. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.01.004>

49. *Rio M.-H., Mulet S., Picot N.* Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into the geostrophic circulation // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. P. 8918–8925.

50. *Salyuk P.A., Mosharov S.A., Frey D.I., Kasyan V.V., Ponomarev V.I., Kalinina O.Yu., Morozov E.G., Latushkin A.A., Sapozhnikov P.V., Ostroumova S.A., Lipinskaya N.A., Budyansky M.V., Chukmasov P.V., Krechik V.A., Uleysky M.Yu., Fayman P.A., Mayor A.Yu., Mosharova I.V., Chernetsky A.D., Shkorba S.P., Shved N.A.* Physical and biological features of the waters in the outer Patagonian shelf and the Malvinas Current // *Water*. 2022. V. 14. № 23. P. 3879. <https://doi.org/10.3390/w14233879>

51. (a) *Saraceno M., Provost C.L., Piola A.R.* On the relationship between satellite-derived sea surface temperature fronts and chlorophyll a in the southwestern Atlantic Ocean // *Journal of Geophysical Research*. 2004. V. 109. C05021.

52. (b) *Saraceno M., Provost C., Piola A.R., Bava J., Gagliardini A.* Brazil Malvinas Frontal System as seen from 9 years of advanced very high resolution radiometer data // *Journal of Geophysical Research*. 2004 V. 109 P. C05027. <https://doi.org/10.1029/2003jc002127>

53. *Saraceno M., Provost C. L., Piola A. R.* On the relationship between satellite- retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005. V. 110. № C11. P. 2004JC002736. <https://doi.org/10.1029/2004JC002736>

54. *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.
55. *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. DOI: 10.1029/JC089iC06p10489
56. *Smyth T.J., Fishwick J.R., Al-Moosawi L., Cummings D., Harris C., Kitidis V., et al.* A broad spatio-temporal view of the planktonic ecosystem structure in the Atlantic Ocean // *Progress in Oceanography*. 2012. V. 102. P. 60–79.
57. *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](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00200-2)
58. (a) *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. P. 2008JC005108. <https://doi.org/10.1029/2008JC005108>
59. (b) *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. P. 2008JC005248. <https://doi.org/10.1029/2008JC005248>
60. *Spadone A., Provost C.* Variations in the Malvinas Current volume transport since October 1992 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. V. 114. № C2. P. 2008JC004882. <https://doi.org/10.1029/2008JC004882>
61. *Stewart R.H.* Introduction To Physical Oceanography. 2008. Texas: Department of Oceanography, Texas A & M University. 345 p.
62. *Tokinaga H., Tanimoto Y., Xie S. P.* SST-induced surface wind variations over the Brazil–Malvinas confluence: Satellite and in situ observations // *Journal of climate*. 2005. V. 18. № 17. P. 3470–3482.
63. *Venables H., Meredith M.P., Atkinson A., Ward P.* 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>
64. *Vivier F., Provost C.* Volume transport of the Malvinas Current: Can the flow be monitored by TOPEX/POSEIDON? // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. V. 104. № C9. P. 21105–21122.
65. *Waluda C.M., Griffiths H.J., Rodhouse P.G.* Remotely sensed spatial dynamics of the *Illex argentinus* fishery, Southwest Atlantic // *Fisheries Research*. 2008. V. 91. № 2-3. P. 196-202.
66. *Wang Z., Chen G., Han Y., Ma C., Lv M.* Southwestern Atlantic Ocean fronts detected from satellite-derived SST and chlorophyll // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 21. P. 4402.
67. *Wessel Pål, Smith W.H.F.* A global, self- consistent, hierarchical, high- resolution shoreline database // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1996. V. 101. № B4. P. 8741–8743.