

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.465(269.4)

DOI: 10.22449/0233-7584-2022-2-127-150

Климатическая структура динамических и температурных фронтов в море Скоша и прилегающих акваториях

Ю. В. Артамонов , Е. А. Скрипалева, Н. В. Никольский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *artam-ant@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.06.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022;
принята к публикации 27.01.2022.

Аннотация

Цель. Уточнить пространственную структуру климатических динамических фронтов (стречней геострофических течений) и оценить связь их положения с положением крупномасштабных температурных фронтов на поверхности в море Скоша и прилегающих акваториях юго-западной части Атлантического сектора Антарктики – цель данной работы.

Методы и результаты. Использовались среднесуточные данные массивов реанализа *CMEMS* за период 1993–2017 гг. и реанализа *NOAA OI SST* за период 1982–2017 гг. в узлах регулярной сетки с шагом $0,25^\circ$. Реанализ *CMEMS* содержит значения составляющих геострофической скорости, реанализ *NOAA OI SST* – значения температуры на поверхности, которые приводились к климатическому виду путем их осреднения для каждого месяца за соответствующие периоды. Положение стречней течений и температурных фронтов определялось по максимумам составляющих скорости и экстремумам горизонтальных градиентов температуры. Построена уточненная схема среднемноголетнего положения динамических фронтов и показано, что в районах с наиболее выраженными неоднородностями рельефа дна (северная граница Фолклендского плато и шельфа Огненной Земли, границы шельфа Фолклендских о-вов и банки Бердвуд, хребет Шеклтона, свал глубин шельфа Южно-Шетландских о-вов) фронты не изменяют широтное положение во все месяцы. Показано, что на большей части акватории максимумам геострофической скорости (динамическим фронтам) соответствуют экстремумы горизонтальных градиентов температуры (температурные фронты). В поле температуры наиболее четко проявляются Северная и Центральная ветви Антарктического циркумполярного течения. В целом на акватории среднегодовое широтное положение Субантарктического и Антарктического полярного фронтов смещено к югу относительно положения стречней Северной и Центральной ветвей Антарктического циркумполярного течения на $0,25\text{--}0,5^\circ$ и на $0,25\text{--}1^\circ$ соответственно.

Выводы. Показано, что крупномасштабные струи геострофических течений под влиянием особенностей рельефа дна формируют интенсивные топографические меандры и рециркуляционные ветви, устойчиво проявляющиеся на климатическом масштабе. Ветви системы Антарктического циркумполярного течения под влиянием донной топографии могут сливаться, формируя общие потоки, а затем расходятся, снова образуя систему отдельных струй. Установлено, что основные пространственные особенности фронтальной структуры в поле геострофических скоростей сохраняются в течение всего года и обуславливаются преимущественно донной топографией. Показано, что большинство динамических фронтов четко проявляется в поле температуры на поверхности в течение всех месяцев. Выявлен высокий уровень линейной связи между положением температурных фронтов и стречней течений, значения коэффициентов корреляции составляют $0,6\text{--}0,97$.

© Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В., 2022

Ключевые слова: море Скоша, пролив Дрейка, море Уэдделла, температура поверхности океана, спутниковая альтиметрия, горизонтальные градиенты температуры, геострофические течения, рельеф дна

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования».

Для цитирования: Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В. Климатическая структура динамических и температурных фронтов в море Скоша и прилегающих акваториях // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 127–150. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-127-150

Climatic Structure of the Dynamic and Temperature Fronts in the Scotia Sea and the Adjacent Water Areas

Yu. V. Artamonov , E. A. Skripaleva, N. V. Nikolsky

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

 *artam-ant@yandex.ru*

Abstract

Purpose. The aim of the work is to clarify the spatial structure of the climatic dynamic fronts (geostrophic current jets) and to estimate the relationship between their position and that of the large-scale temperature fronts on the surface of the Scotia Sea and the adjacent water areas in the southwestern part of the Antarctica Atlantic sector.

Methods and Results. The daily averaged data arrays of the *CMEMS* (1993–2017) and *NOAA OI SST* (1982–2017) reanalyzes at the regular 0.25° grid were used. The *CMEMS* reanalysis contains the sea surface geostrophic velocity values, the *NOAA OI SST* reanalysis – the sea surface temperature ones which were reduced to the climatic form through their averaging for each month of the corresponding periods. Position of the current jets and the temperature fronts was determined using the maximums of the geostrophic velocity components and the extremes of the temperature horizontal gradients. The updated scheme of the average long-term position of dynamic fronts was constructed. It shows that in the areas of the most pronounced bottom topography inhomogeneities (the northern boundary of the Falkland Plateau and the Tierra del Fuego shelf, the boundaries of the Falkland Islands shelf and the Birdwood Bank, the Shackleton Ridge and the South Shetland Islands shelf depths dump), the fronts do not change their latitudinal position during a year. It is revealed that in most of the water area, the temperature horizontal gradient extremes (temperature fronts) correspond to the geostrophic velocity maximums (dynamic fronts). The Northern and Central Branches of the Antarctic Circumpolar Current are most clearly manifested in the temperature field. In general, in the water area under study, the average annual latitudinal position of the Subantarctic and Antarctic Polar Fronts is displaced to the south relative to the position of the Northern and Central branches jets of the Antarctic Circumpolar Current by $0.25\text{--}0.5^\circ$ and $0.25\text{--}1^\circ$, respectively.

Conclusions. It is shown that, being influenced by the bottom topography, the large-scale jets of geostrophic currents form intense topographic meanders and recirculation branches which are stably manifested on the climatic scale. The Antarctic Circumpolar Current branches being affected by the bottom topography, can merge forming the joint flows, and then diverge forming a system of separate jets again. It is found that the main spatial features of frontal structure in the geostrophic velocities field persist throughout the whole year and are conditioned mainly by the bottom topography. The most of the dynamic fronts are shown to be clearly pronounced in the temperature field on the surface during a year. A high level of linear correlation between the positions of temperature fronts and current jets was revealed; the correlation coefficient values are $0.6\text{--}0.97$.

Keywords: Scotia Sea, Drake Passage, Weddell Sea, sea surface temperature, satellite altimetry, temperature horizontal gradients, geostrophic currents, bottom topography

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of FSBSI FRC MHI No. 0555-2021-0004 "Fundamental studies of oceanological processes that determine state and evolution of marine environment under the influence of natural and anthropogenic factors based on the observation and modeling methods".

For citation: Artamonov, Yu.V., Skripaleva, E.A. and Nikolsky, N.V., 2022. Climatic Structure of the Dynamic and Temperature Fronts in the Scotia Sea and the Adjacent Water Areas. *Physical Oceanography*, 29(2), pp. 117-138. doi:10.22449/1573-160X-2022-2-117-138

Введение

Исследование фронтальной системы Южного океана, связанной с ветвями Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), имеет большое научное и прикладное значение [1–7]. В зоне АЦТ прослеживаются крупномасштабные аномалии температуры поверхности океана (ТПО), распространяющиеся в восточном направлении и в значительной степени определяющие глобальные климатические изменения в системе океан – атмосфера [7–11]. Структура и интенсивность этих аномалий определяется изменчивостью гидрологических фронтов. Океанические фронты также оказывают влияние на распределение биогенных элементов, обусловленное усилением вертикального обмена между глубинными и поверхностными водами в зонах фронтов и эффектом «барьера смешения» для фронтальных струй, который препятствует обмену характеристик через фронты [4, 7, 8, 12–16].

Несмотря на значительные успехи в исследовании системы фронтов и течений Южного океана [1–8, 10–13, 17–30], ряд вопросов остается открытым. Даже для таких хорошо изученных регионов, как пролив Дрейка и море Скоша, до сих пор существует неопределенность в количестве струй АЦТ и соответствующих им фронтов. Так, в работах [1–3, 8], базирующихся на данных контактных гидрологических измерений, в проливе Дрейка и море Скоша выделены три основные струи АЦТ (Северная, Центральная и Южная) и соответственно три фронта – Субантарктический (САФ), Полярный (ПФ) и Южный фронт АЦТ (ЮАЦТФ). В работе [3] помимо этих основных фронтов авторы выделили еще один фронт, не связанный с ветвями АЦТ (динамическими фронтами) и определяемый только по термохалинным признакам, – Южную границу АЦТ. В работе [2] Южную границу АЦТ в проливе Дрейка и над материковой окраиной Южных Шетландских о-вов назвали Границей континентальных вод (ГКВ), а в море Скоша – Фронтом моря Скоша (ФМС). Согласно [8], в море Скоша Южная граница АЦТ, называемая также Вторичной фронтальной зоной, соответствует Южной ветви АЦТ, при этом Южный фронт АЦТ как отдельный фронт не выделяется.

В других работах, основанных на данных фактических измерений, показано, что в проливе Дрейка в зависимости от периода проведения измерений могло наблюдаться от четырех до 11 струй АЦТ [22–26]. На основе относительно длинных временных рядов данных спутниковой альтиметрии (1992–2007 гг.), трансокеанских гидрологических разрезов *WOCE* и буев *Argo* во всей циркумполярной зоне АЦТ были выделены 9 струй и соответственно – динамических фронтов. Три струи прослеживались в зоне САФ, три – в зоне ПФ, две – в зоне ЮАЦТФ и одна соответствовала южной границе АЦТ. При этом авторы отмечают, что в проливе Дрейка струи сливаются, образуя несколько «суперструй» [5, 6].

Оценки расходов «суперструй» АЦТ в проливе Дрейка показали, что наиболее интенсивными являются Северная ветвь АЦТ, Центральная ветвь АЦТ и Южная ветвь АЦТ [22–25]. Например, в ноябре 2011 г. суммарные расходы трех струй Северной ветви, трех струй Центральной ветви и двух струй Южной ветви АЦТ составили 57,7; 51,7 и 20,1 Св соответственно [25]. Отмечается хорошее совпадение расходов течений, полученных по данным акустического доплеровского профилометра течений *LADCP* и в результате расчета динамическим методом. Так, в ноябре 2007 г. суммарные расходы струй трех основных ветвей АЦТ составляли по данным *LADCP* 14,0; 58,2 и 48,1 Св, по геострофическим расчетам 13,9; 57,5 и 47,8 Св [23].

По данным моделирования с использованием инверсной боксовой модели, усваивающей данные инструментальных измерений скорости с помощью *LADCP* и гидрологические данные гидрографических станций за период 18 марта – 21 апреля 1999 г., показано, что в море Скоша происходит перераспределение объема переноса между струями АЦТ [27]. Например, отмечалось увеличение в восточном направлении переноса струи Субантарктического фронта (Северная ветвь АЦТ) от 31 ± 7 Св до 48 ± 4 Св и формирование топографических ветвей струи Полярного фронта (Центральная ветвь АЦТ).

В одной из наиболее современных работ [7] отмечается, что до сих пор нет однозначного мнения о количестве фронтов системы АЦТ, так как оно изменяется во времени и пространстве. Поэтому нет и единого мнения о том, как динамические фронты (стрежни течений) соотносятся по положению с температурными фронтами на поверхности, которые благодаря большому количеству длительных рядов спутниковых данных идентифицируются наиболее точно. В ряде работ показано, что зоны высоких градиентов ТПО, отражающих структуру фронтов на поверхности, могут качественно совпадать по положению с зонами высоких градиентов динамических высот (динамическими фронтами), отражающими интегральное влияние всего слоя воды от поверхности до глубины отсчетного горизонта [7, 18–21]. Согласно другим работам, некоторые температурные фронты на поверхности могут быть заметно смещены относительно положения стрежней течений [1, 4, 26, 28]. Так, в работе [1] на основе всех исторических данных попутных судовых измерений за период 1898–1986 гг. отмечалось, что САФ и стрежень Северной ветви АЦТ практически совпадают по положению, а Антарктический полярный фронт (АПФ) смещен примерно на $1,5^\circ$ широты к югу относительно стрежня Центральной ветви АЦТ. В работе [4] на основе данных *World Ocean Atlas* и спутниковых измерений ТПО было установлено, что в юго-западной части Атлантического сектора Антарктики положение стрежней трех ветвей АЦТ смещено примерно на $1\text{--}2^\circ$ широты относительно положения соответствующих им фронтов в поле ТПО. В работе [28] на основе глобальной модели климата *HiGEM* показано, что в районах наклона глубинных изотерм к поверхности максимальные градиенты ТПО (температурные фронты) расположены южнее максимальных градиентов высоты уровня моря (динамических фронтов).

В целом анализ литературных источников показал, что существуют противоречия в определении структуры динамических и температурных фронтов, в значительной степени связанные с использованием разными авторами

различных типов данных и применением разных методик выделения фронтов. В настоящей работе на основе современных реанализов, в которых все доступные данные контактных и спутниковых измерений проинтерполированы в регулярные сетки с одинаковым шагом, уточняются особенности климатической структуры динамических фронтов (геострофических течений) и анализируется их связь с положением температурных фронтов на поверхности в юго-западной части Атлантического сектора Антарктики.

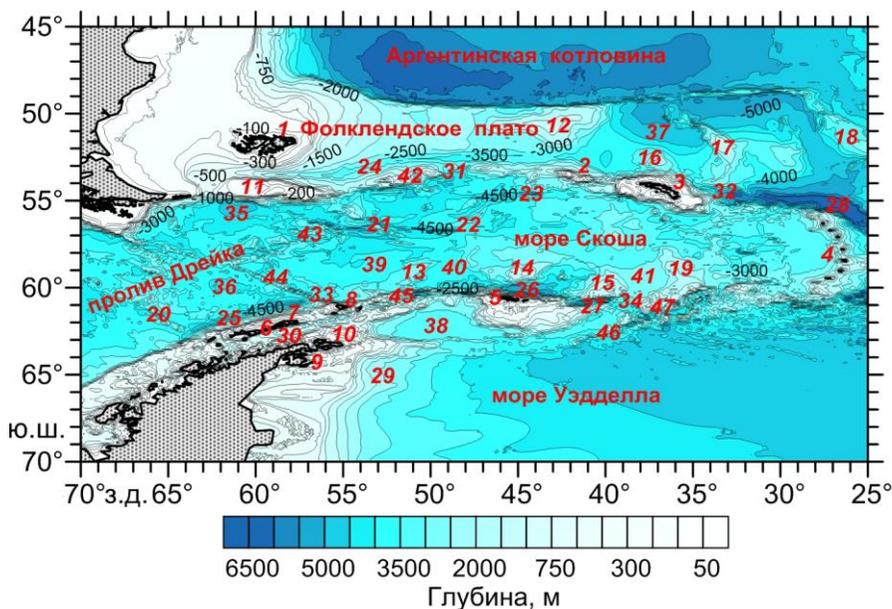
Материалы и методы

В работе рассматривается часть Атлантического сектора Южного океана, расположенная южнее 45° ю. ш., между 70° и 25° з. д. При построении картосхемы донной топографии использовались данные *General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)* (URL: http://www.gebcos.org/data_and_products/gridded_bathymetry_data/) с пространственным разрешением 15 угловых секунд по долготе и широте (рис. 1).

Анализ геострофической циркуляции (динамических фронтов) проводился по данным массива из реанализа *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)* (URL: http://marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SEA_LEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047). Этот массив содержит среднесуточные значения зональной (U_g) и меридиональной (V_g) составляющих геострофической скорости на поверхности в узлах регулярной сетки с шагом $0,25^\circ$ за период 1993–2017 гг., рассчитанные как сумма средней динамической топографии по данным *Aviso+* (URL: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mdt>) и среднесуточных значений аномалий уровня океана по данным спутниковых альтиметров *Jason-1*, *Jason-2*, *Jason-3*, *Sentinel-3A*, *HY-2A*, *Saral/AltiKa*, *Cryosat-2*, *TOPEX/Poseidon*, *ENVISAT*, *GFO* и *ERS1/2*. Применение продуктов реанализа *CMEMS* для других акваторий Мирового океана, в частности для Лофотенского бассейна [31] и Северного Ледовитого океана (СЛО) [32], показало хорошее согласование результатов с реанализом *ORAS5* [31] и моделью морской и океанической циркуляции *Institute of Numerical Mathematic Ocean Model (INMOM-Арктика)*, реализованной для СЛО и прилегающих к нему акваторий [32]. Кроме того, в работе [32] отмечается, что в настоящее время *CMEMS* является наиболее совершенной из функционирующих оперативных систем, предоставляющих данные о состоянии морской среды всего Мирового океана.

Фронтальная структура поля ТПО исследовалась по данным массива реанализа *NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OI SST)* (URL: https://psl.noaa.gov/cgi-bin/db_search/DBListFiles.pl?did=132&tid=89459&vid=2423). Он содержит среднесуточные значения ТПО в узлах регулярной сетки с шагом $0,25^\circ$ за период 1982–2017 гг., полученные методом оптимальной интерполяции спутниковых и контактных измерений с учетом концентрации морского льда [33]. Выбор этих массивов обусловлен тремя основными причинами: во-первых, высокое пространственное разрешение позволяет проанализировать фронтальную структуру в прибрежных районах и устьях проливов; во-вторых, одинаковый шаг сетки дает возможность корректно сопоставить

положение строжней геострофических течений и температурных фронтов; в-третьих, временной период данных в 25 и более лет является достаточным для получения статистически достоверных климатических норм*.



Р и с. 1. Район исследования и рельеф дна: 1 – Фолклендские о-ва; 2 – о-ва Шаг и Блэк; 3 – о. Южная Георгия; 4 – Южные Сандвичевы о-ва; 5 – Южные Оркнейские о-ва; 6 – Южные Шетландские о-ва; 7 – о. Кинг-Джордж (Ватерлоо); 8 – о-ва Мордвинова (Элефант) и Шишкова (Кларенс); 9 – о. Джеймса Росса; 10 – о. Жуэвиль; 11 – банка Бердвуд; 12 – банка Морис Юинг; 13 – банка Шеклтон; 14 – банка Пири; 15 – банка Брюс; 16 – поднятие Северо-Западная Георгия; 17 – поднятие Северо-Восточная Георгия; 18 – поднятие Ислас-Оркадас; 19 – плато Дискавери; 20 – разлом Хиро; 21 – разлом Куэст; 22 – разлом Эндьюранс; 23 – разлом Туэльче; 24 – желоб Мальвинас; 25 – Южно-Шетландский желоб; 26 – Южно-Оркнейский желоб; 27 – впадина Оркней; 28 – Южно-Сандвичев желоб; 29 – каньон Аврора; 30 – пролив Брансфилд; 31 – проход Шаг Рок; 32 – проход Георгия; 33 – проход Шеклтона; 34 – проход Брюс; 35 – котловина Яган; 36 – котловина Феникс; 37 – котловина Георгия; 38 – котловина Поуэлл; 39 – котловина Она; 40 – котловина Протектор; 41 – котловина Скан; 42 – хребет Северный Скоша; 43 – хребет Западный Скоша; 44 – хребет Шеклтона; 45 – хребет Южный Скоша; 46 – хребет Эндьюранс; 47 – хребет Брюс

F i g. 1. Study area and bottom topography: 1 – Falkland Islands; 2 – Shag and Black Rocks; 3 – South Georgia Island; 4 – South Sandwich Islands; 5 – South Orkney Islands; 6 – South Shetland Islands; 7 – King George (Waterloo) Island; 8 – Mordvinov (Elephant) and Shishkov (Clarence) Islands; 9 – James Ross Island; 10 – Joinville Island; 11 – Burdwood Bank; 12 – Maurice Ewing Bank; 13 – Shackleton Bank; 14 – Pirie Bank; 15 – Bruce Bank; 16 – Northwest Georgia Rise; 17 – Northeast Georgia Rise; 18 – Islas-Orkadas Rise; 19 – Discovery Plateau; 20 – Hero Fracture Zone; 21 – Quest Fault; 22 – Endurance Fault; 23 – Tuelche Fault; 24 – Falkland (Malvinas) Trough; 25 – South Shetland Trench; 26 – South Orkney Trough; 27 – Orkney Trench; 28 – South Sandwich Trench; 29 – Aurora Canyon; 30 – Bransfield Strait; 31 – Shag Rocks Passage; 32 – Georgia Passage; 33 – Shackleton Passage; 34 – Bruce Passage; 35 – Yagan Basin; 36 – Phoenix Basin; 37 – Georgia Basin; 38 – Powell Basin; 39 – Ona Basin; 40 – Protector Basin; 41 – Scan Basin; 42 – North Scotia Ridge; 43 – West Scotia Ridge; 44 – Shackleton Ridge; 45 – South Scotia Ridge; 46 – Endurance Ridge; 47 – Bruce Ridge

* Монин А. С. Гидродинамика атмосферы, океана и земных недр. СПб. : Гидрометеиздат, 1999. 523 с.

Среднесуточные значения составляющих геострофической скорости и температуры приводились к климатическому виду путем осреднения временных рядов этих параметров в каждом узле сетки сначала для каждого месяца каждого года, а затем за весь временной период для каждого массива (25 и 36 лет), в результате чего синоптическая и межгодовая изменчивость этих характеристик сглаживалась. Сутки и месяцы, для которых данные отсутствовали вследствие наличия сплошного ледового покрова (в основном в море Уэдделла), при осреднении не учитывались. В целом в работе анализировались области, где сплоченность сезонного льда не превышала 80%, т. е. площадь свободной ото льда воды в пределах трапеции $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ была больше 20%. Далее в каждом узле сетки по климатическим значениям U_g и V_g рассчитывались величина модуля скорости $|\vec{V}_g|$ и направление вектора течений, по значениям ТПО – величины ее меридиональных (МГТ), зональных (ЗГТ) и полных горизонтальных градиентов (ПГТ).

Пространственное положение динамических и температурных фронтальных зон анализировалось по распределениям величин модуля скорости, векторов геострофических течений и полного горизонтального градиента ТПО соответственно. При выделении температурных фронтов использован критерий максимума (по абсолютной величине) горизонтального градиента температуры, при выделении стрежня течения (динамического фронта) – критерий максимума градиента динамической высоты (или максимума геострофической скорости). Широтное или долготное положение максимумов градиентов ТПО и геострофической скорости определялось на меридиональных и зональных выборках МГТ, ЗГТ, U_g и V_g с дискретностью $2,5^\circ$. Положения максимумов скорости на широтных и меридиональных профилях совместно с анализом пространственного распределения модуля и вектора скорости использовались при построении генеральной схемы течений. При наименовании ветвей течений и температурных фронтов применялась номенклатура, используемая ранее [4, 18, 19, 30]; название новых ветвей течений, не описанных в литературе, предложено авторами данной работы (таблица).

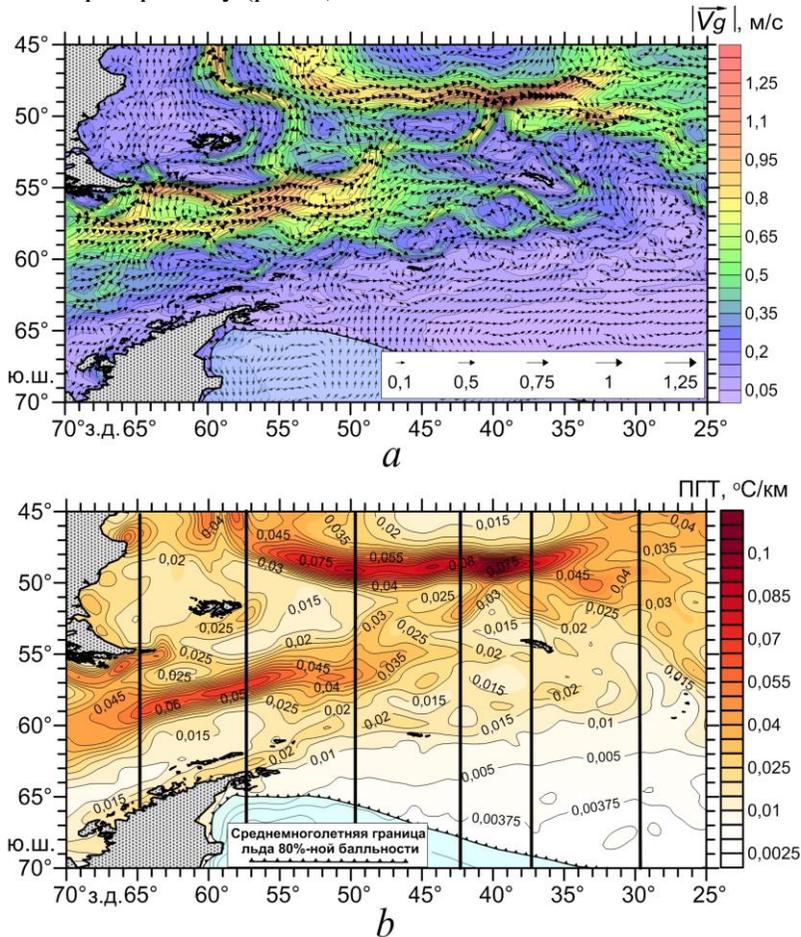
Для оценки согласованности положения температурных фронтов и стрежней течений анализировалась линейная корреляция между пространственными распределениями климатических среднегодовых и среднемесячных значений $|\vec{V}_g|$ и ПГТ, U_g и МГТ вдоль меридианов. Статистическая значимость коэффициентов линейной корреляции оценивалась на уровне 0,01, т. е. с доверительной вероятностью 99%.

Названия течений, температурных фронтов и их условные обозначения Symbols for the names of currents and temperature fronts

Географические течения (динамические фронты) / Geostrophic currents (dynamic fronts)	
Антарктическое циркулярное течение / Antarctic Circumpolar Current	АЦТ / ACC
Струи Северной ветви АЦТ / Jets of the Northern branch of the ACC	СВ АЦТ, СВ АЦТ-1, СВ АЦТ-2 / NB ACC, NB ACC-1, NB ACC-2 ЦВ АЦТ, ЦВ АЦТ-1, ЦВ АЦТ-2, ЦВ АЦТ-3 / CB ACC, CB ACC-1, CB ACC-2, CB ACC-3
Струи Центральной ветви АЦТ / Jets of the Central branch of the ACC	ЮВ АЦТ, ЮВ АЦТ-1, ЮВ АЦТ-2 / SB ACC, SB ACC-1, SB ACC-2 РЦВ АЦТ, РЦВ АЦТ-1 / RNB ACC, RNB ACC-1 РЦВ АЦТ / RCB ACC
Струи Южной ветви АЦТ / Jets of the Southern branch of the ACC	РЮВ АЦТ, РЮВ АЦТ-1, РЮВ АЦТ-2, РЮВ АЦТ-3 / RSB ACC, RSB ACC-1, RSB ACC-2, RSB ACC-3
Рециркуляции струй Северной ветви АЦТ / Recirculations of jets of the Northern branch of the ACC	СВ + ЦВ АЦТ / NB + CB ACC СРЮВ АЦТ-1 / NRSB ACC-1 ЮРЮВ АЦТ-1 / SRSB ACC-1
Рециркуляция Центральной ветви АЦТ / Recirculation of the Central branch of the ACC	ЗФТ, ЗФТ-1 / WFC, WFC-1 ЕFC
Рециркуляции струй Южной ветви АЦТ / Recirculations of jets of the Southern branch of the ACC	ГКВ / CWB
Общий поток Северной и Центральной ветвей АЦТ / Common stream of Northern and Central branches of the ACC	ФМС, ФМС-1, ФМС-2, ФМС-3, ФМС-4 / SSF, SSF-1, SSF-2, SSF-3, SSF-4
Северная струя рециркуляции ЮВ АЦТ-1 / Northern jet of recirculation of SB ACC-1	РФМС / RSSF
Южная струя рециркуляции ЮВ АЦТ-1 / Southern jet of recirculation of SB ACC-1	ГКМУ, ГКМУ-1, ГКМУ-2 / WGB, WGB-1, WGB-2 RWGB-1
Струи Западного Фолклендского течения / Jets of Western Falkland Current	ФМС-1 + ГКМУ / SSF-1 + WGB
Восточное Фолклендское течение / Eastern Falkland Current	ПТ / CC
Граница континентальных вод / Continental Water Boundary	СИМПрьб / NPBSM ЮПМПрьб / SPBSM
Струи Фронта моря Скоша / Jets of Scotia Sea Front	
Рециркуляция Фронта моря Скоша / Recirculation of Scotia Sea Front	
Струи границы круговорота моря Уэдделла / Jets of Weddell Gyre Boundary	
Рециркуляция ГКМУ-1 / Recirculation of WGB-1	
Общий поток струи ФМС-1 и Границы круговорота моря Уэдделла / Common stream of SSF-1 and WGB	
Прибрежное течение / Coastal current	
Северная периферия мейандра пролива Брансфилд / Northern periphery of the Bransfield Strait meander	
Южная периферия мейандра пролива Брансфилд / Southern periphery of Bransfield Strait meander	
Температурные фронты / Temperature fronts	
Ветви Субантарктического фронта / Subantarctic Front branches	САФ, САФ-2 / SAF, SAF-2
Антарктический полярный фронт / Antarctic Polar Front	АПФ / APF
Единый фронтальный раздел, образованный САФ и АПФ / Single frontal section formed by SAF and APF	САФ + АПФ / SAF + APF
Ветви Фронта Южной ветви АЦТ / Branches of the Front of the Southern branch of the ACC	ФЮВ АЦТ, ФЮВ АЦТ-1 / FSB ACC, FSB ACC-1
Фронт прибрежного шельфа / Coastal Shelf Front	ФПШ / CSF
Фронт моря Скоша / Scotia Sea Front	ФМС / SSF
Фронт моря Уэдделла / Weddell Sea Front	ФМУ / WSF
Прибрежный фронт / Coastal front	ПФ / CF

Результаты исследования

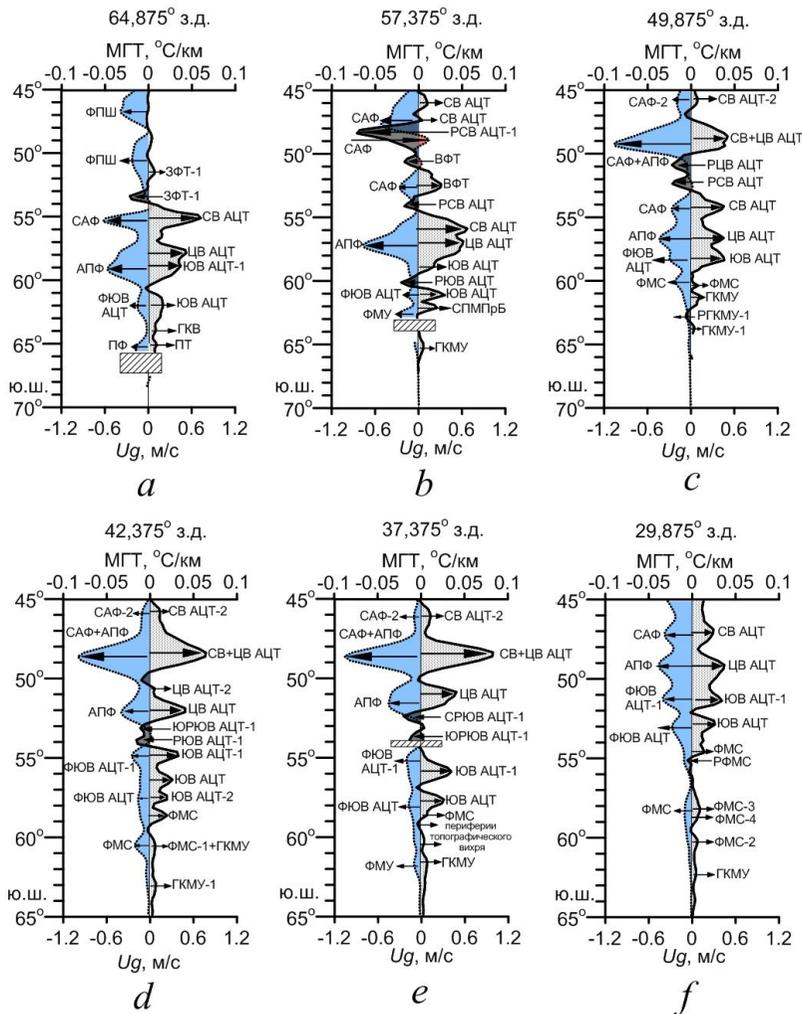
Пространственное распределение среднегодовых векторов геострофических течений, величин их модуля $|\bar{V}_g|$ (рис. 2, *a*) и среднегодовых величин ПГТ (рис. 2, *b*) показывает наличие областей повышенных значений этих параметров. Выявленные области характеризуются достаточно сложной структурой и соответствуют динамическим и температурным фронтальным зонам, внутри которых прослеживаются отдельные струи течений с максимальной скоростью (динамические фронты) и отдельные максимумы значений ПГТ (температурные фронты), количество и положение которых существенно изменяется по пространству (рис. 2).



Р и с. 2. Распределение среднегодовых климатических величин: *a* – модуля скорости $|\bar{V}_g|$ и векторов геострофических течений; *b* – полного градиента температуры (ПГТ) на поверхности океана. Меридианы, для которых представлены среднегодовые распределения МГТ и зональной составляющей скорости U_g , показаны вертикальными линиями

F i g. 2. Spatial distribution of the annual average climatic values: *a* – velocity module $|\bar{V}_g|$ and vectors of geostrophic currents; *b* – total temperature gradient (TTG) on the sea surface. Vertical lines show the meridians for which the annual average distributions of TGM and zonal velocity U_g are presented

На рис. 3 представлены примеры широтных распределений Ug и МГТ вдоль отдельных меридианов, положение которых показано на рис. 2, *b*. Помимо хорошо известных основных динамических фронтов системы АЦТ на этих распределениях прослеживаются менее интенсивные максимумы скорости, которые связаны либо с ветвями и меандрами основных потоков, либо с перифериями других динамических образований (круговорот моря Уэдделла, циклонический меандр в проливе Брансфилд). В целом отмечается качественное совпадение положения динамических и температурных фронтальных зон (рис. 2), максимумам скорости соответствуют экстремумы градиентов ТПО (рис. 3).



Р и с. 3. Распределение климатических среднегодовых значений МГТ (пунктир) и Ug (сплошная) вдоль 64,875° з. д. (a), 57,375° з. д. (b), 49,875° з. д. (c), 42,375° з. д. (d), 37,375° з. д. (e), 29,875° з. д. (f). Отрицательные МГТ показаны синим цветом, положительные – красным

Fig. 3. Distribution of the climatic annual average TMG (dashed curves) and Ug (solid curves) values along 64.875° W (a), 57.375° W (b), 49.875° W (c), 42.375° W (d), 37.375° W (e), 29.875° W (f). Negative TMG values are shown in blue, positive ones – in red

Совместный анализ пространственных распределений векторов геострофических течений и величин модуля скорости (рис. 2, *a*), распределений среднегодовых величин Ug и Vg вдоль меридианов и параллелей позволил построить уточненную схему климатического положения строжней геострофических потоков (рис. 4), при интерпретации которой учитывалось влияние неоднородностей рельефа дна (рис. 1).

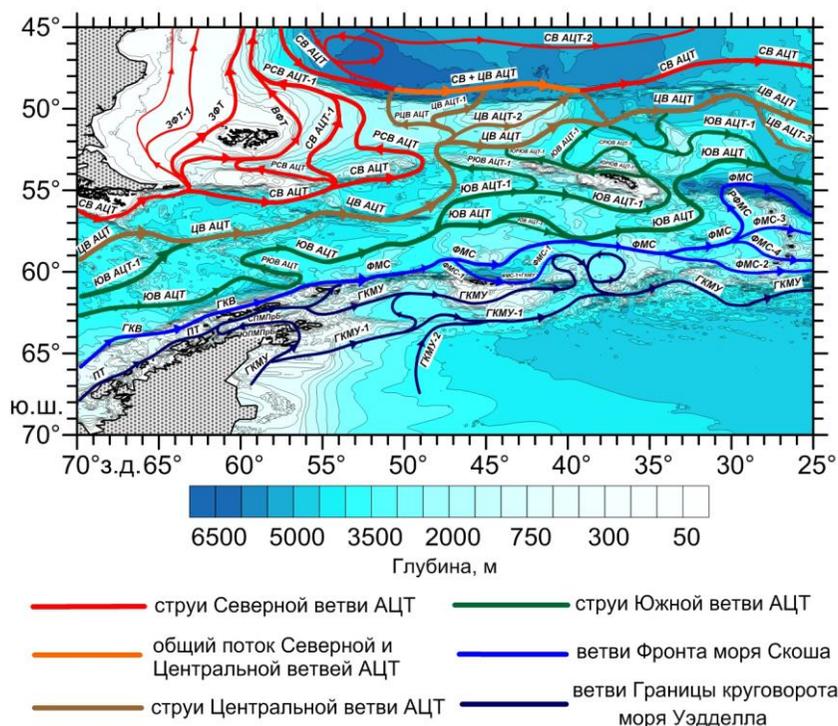


Рис. 4. Схема среднемноголетнего положения строжней основных геострофических течений на фоне донной топографии
Fig. 4. Scheme of the average long-term position of the main geostrophic current jets against the background of bottom topography

Ниже рассматривается среднегодовая климатическая структура динамических и температурных фронтов в порядке их расположения с севера на юг. При упоминании того или иного географического объекта (острова, банки, хребты, проливы и т. д.) в скобках приводится его цифровое обозначение, показанное на рис. 1.

Северная ветвь АЦТ (Субантарктический фронт). В проливе Дрейка строжень СВ АЦТ проходит вдоль свала глубин шельфа о. Огненная Земля (рис. 4). Соответствующий СВ АЦТ в поле температуры Субантарктический фронт располагается примерно на $0,25^\circ$ южнее (рис. 3, *a*). Восточнее часть вод СВ АЦТ проникает на север между о. Эстадос и банкой Бердвуд (11) и огибает Фолклендские о-ва (1) в виде Западного Фолклендского течения, состоящего из двух основных струй (ЗФТ и ЗФТ-1), и более интенсивного

Восточного Фолклендского течения (ВФТ) (рис. 4). Другая часть потока СВ АЦТ следует на восток над котловиной Яган (35) южнее банки Бердвуд. В районе 54–55° з. д. еще одна часть вод СВ АЦТ проникает на север через глубоководный проход между банкой и хребтом Северный Скоша (42) и снова разделяется на две струи. Одна струя разворачивается на запад и проходит вдоль северной границы банки Бердвуд, образуя рециркуляционную ветвь СВ АЦТ (РСВ АЦТ), которая в районе 60° з. д. сливается с ВФТ. Другая струя (СВ АЦТ-1) формирует циклонический меандр над желобом Мальвинас (24) и далее следует на север по антициклонической траектории над свалом глубин Патагонского шельфа примерно вдоль изобаты 1500 м. Между 48° и 49° ю. ш. СВ АЦТ-1 формирует еще одну рециркуляционную ветвь (РСВ АЦТ-1), которая также сливается с ВФТ (рис. 4). Основная струя СВ АЦТ продолжает следовать на восток вдоль южной границы хребта Северный Скоша примерно до 49–50° з. д., затем также разворачивается на север, проходя над западной частью глубоководного прохода Шаг Рок (31), и образует над желобом Мальвинас еще одну рециркуляционную ветвь РСВ АЦТ. Эта ветвь следует примерно вдоль изобаты 2000 м и севернее 50° ю. ш. сливается с другими струями СВ АЦТ (рис. 4). Рециркуляционные ветви РСВ АЦТ и РСВ АЦТ-1, квазизональные участки ВФТ, основная струя СВ АЦТ вдоль южной границы банки Бердвуд и хребта Северный Скоша хорошо прослеживаются на меридиональных профилях скорости в виде ее экстремумов разного знака (рис. 3, *b, c*). В поле ТПО Субантарктический фронт характеризуется экстремумами МГТ также различного знака. К северу от Фолклендских о-вов САФ характеризуется положительными градиентами, поскольку ближе к островам среднегодовая температура на поверхности выше, чем температура вод, приносимых с юга ВФТ. К югу от Фолклендских о-вов и восточнее, у южной границы хребта Северный Скоша, САФ характеризуется отрицательными МГТ и наблюдается южнее СВ АЦТ примерно на 0,5° (рис. 3, *b, c*).

После слияния ЗФТ, ВФТ и РСВ АЦТ-1 общий поток СВ АЦТ следует на север и примерно на 40° ю. ш. (за пределами рассматриваемого района) разворачивается на юго-восток, формируя циклонический меандр над свалом глубин Патагонского шельфа [2, 4, 5]. В пределах анализируемой акватории СВ АЦТ вновь прослеживается восточнее 53° з. д. в виде потока юго-восточного направления, состоящего из двух основных струй. У западной границы Аргентинской котловины, примерно между 55° и 51° з. д., часть потока СВ АЦТ образует замкнутый антициклонический круговорот (рис. 4). Восточнее 52° з. д. СВ АЦТ следует вдоль северной границы Фолклендского плато, при этом на участке между 51° и 37° з. д. поток заметно усиливается за счет подпитки водами ЦВ АЦТ. Этот общий поток, согласно [4], обозначается аббревиатурой СВ + ЦВ АЦТ, а соответствующий ему фронт в поле температуры – САФ + АПФ. Поток СВ + ЦВ АЦТ на всем своем протяжении занимает устойчивое широтное положение между 48° и 49° ю. ш., а положение температурного фронта САФ + АПФ смещено к югу примерно на 0,5° (рис. 3, *c – e*). К востоку от 37° з. д. Северная и Центральная ветви АЦТ разделяются, при этом СВ АЦТ продолжает следовать вдоль южной границы Аргентинской котловины, постепенно смещаясь к северу примерно до

47° ю. ш. (рис. 3, *f*). В поле ТПО САФ располагается примерно на 0,25° южнее (рис. 3, *f*).

Отметим, что к северу от СВ + ЦВ АЦТ и СВ АЦТ между 57° и 32° з. д. прослеживается относительно слабый поток, условно названный СВ АЦТ-2, который проходит севернее самой глубоководной части Аргентинской котловины (рис. 4). В поле ТПО СВ АЦТ-2 проявляется очень слабо в виде некоторого повышения значений МГТ (рис. 3, *c – e*).

Центральная ветвь АЦТ (Антарктический полярный фронт). В проливе Дрейка ЦВ АЦТ следует в северо-восточном направлении, достигая примерно 58° ю. ш. над разломом Шеклтона (рис. 4). В поле ТПО Антарктический полярный фронт, соответствующий ЦВ АЦТ, располагается здесь почти на 1° южнее, чем динамический фронт (рис. 3, *a*). Восточнее ЦВ АЦТ разворачивается на юго-восток, следуя вдоль разлома Шеклтона примерно до 63° з. д., и далее проходит вдоль хребта Западный Скоша (43), пересекает разлом Куэст (21) и проходит вдоль разлома Эндьюранс (22) примерно до 50° з. д. (рис. 4). На этом участке АПФ смещен примерно на 0,5° широты к югу относительно стрежня ЦВ АЦТ (рис. 3, *b, c*). Восточнее 50° з. д. ЦВ АЦТ разворачивается на север и через восточную часть глубоководного прохода Шаг Рок и желоб Мальвинас проникает на Фолклендское плато. Заметные перепады глубин в районе плато приводят к формированию нескольких ветвей ЦВ АЦТ, по крайней мере три из которых сливаются с СВ АЦТ. Одна ветвь (рециркуляционная ветвь РЦВ АЦТ) проходит на запад у южной границы поднятия дна с глубинами менее 2300 м, огибает поднятие с запада и сливается с СВ АЦТ примерно на 51° з. д. Другая ветвь (ЦВ АЦТ-1) проходит над более глубоководной частью Фолклендского плато к западу от банки Морис Юинг (12) и в районе 45° з. д. сливается с СВ АЦТ. Третья ветвь (ЦВ АЦТ-2) проходит вдоль южной границы банки Морис Юинг над глубинами 1000–1500 м и в районе 40° в. д. подходит к СВ + ЦВ АЦТ, затем разворачивается на юго-восток (рис. 3, *c; 4*), следуя вдоль западной границы котловины Георгия (37). Таким образом, слияние вод Центральной ветви АЦТ с потоком Северной ветви происходит не только к востоку от банки Морис Юинг, как отмечалось ранее [2], но и к западу от нее. Основная часть потока ЦВ АЦТ проходит южнее банки Морис Юинг над глубинами 2500–3000 м, огибает ее с юго-востока и восточнее 38° з. д. над котловиной Георгия сливается с ЦВ АЦТ-2 (рис. 4). В этом районе АПФ совпадает по положению с ЦВ АЦТ (рис. 3, *d*). Далее струя ЦВ АЦТ постепенно смещается на север и восточнее 28° з. д. под влиянием поднятия Исла-Оркадас (18) снова разделяется на две ветви – ЦВ АЦТ-3 и ЦВ АЦТ (рис. 4). Здесь АПФ прослеживается примерно на 0,25–0,5° широты южнее стрежня ЦВ АЦТ (рис. 3, *e, f*).

Южная ветвь АЦТ (Фронт Южной ветви АЦТ). В западной части пролива Дрейка прослеживаются две струи ЮВ АЦТ (рис. 4). Северная струя (ЮВ АЦТ-1) ориентирована в северо-восточном направлении, с севера она огибает котловину Феникс (36) и в районе 63–64° з. д. сливается с ЦВ АЦТ. Южная струя (ЮВ АЦТ) пересекает разлом Хиро (20) и следует вдоль северной границы Южно-Шетландского желоба (25) (рис. 1, 4). В поле ТПО

стрежню ЮВ АЦТ соответствует Фронт Южной ветви АЦТ (ФЮВ АЦТ) (рис. 3, *a*). Далее ЮВ АЦТ следует через проход Шеклтона (33) и примерно между 57° и 58° з. д. разворачивается на северо-запад вдоль хребта Шеклтона (44), формируя рециркуляционную ветвь РЮВ АЦТ. Около 60° з. д. эта ветвь снова разворачивается на восток и следует над котловиной Она (39) (рис. 4). Меандрирование и рециркуляция ЮВ АЦТ проявляются на меридиональном профиле скорости в виде экстремумов разного знака (рис. 3, *b*). Здесь ФЮВ АЦТ в поле ТПО совпадает по положению со стрежнем ЮВ АЦТ (рис. 3, *b*). Далее ЮВ АЦТ проходит севернее поднятия дна в районе банки Шеклтон (13) и над северной частью котловины Протектор (40) (рис. 4). Здесь температурный ФЮВ АЦТ также хорошо совпадает по положению со стрежнем ЮВ АЦТ (рис. 3, *c*).

В центральной части моря Скоша ЮВ АЦТ взаимодействует с многочисленными неоднородностями рельефа дна, вследствие чего характеризуется крайне сложной пространственной структурой (рис. 4). Восточнее примерно 48° з. д. поток ЮВ АЦТ, следуя над глубинами более 3500 м, разделяется на две ветви – ЮВ АЦТ-1 и ЮВ АЦТ. Одна ветвь (ЮВ АЦТ-1) поворачивает на северо-восток, затем проходит южнее разлома Туэльче (23) и следует над глубинами 3500–4000 м к югу от о. Южная Георгия (3). При этом около 42° з. д. часть вод ЮВ АЦТ-1 разворачивается на запад, следуя между разломом Туэльче и хребтом Северный Скоша, и формирует рециркуляционную ветвь (РЮВ АЦТ-1), которая в районе 47–48° з. д. сливается с ЦВ АЦТ. Другая часть вод ЮВ АЦТ-1 проходит южнее о. Южная Георгия и, огибая его с востока, формирует к северу от него еще две рециркуляционные ветви. Одна из них (Южная РЮВ АЦТ-1) следует на запад непосредственно вдоль берега о. Южная Георгия, а другая (Северная РЮВ АЦТ-1) огибает поднятие Северо-Западная Георгия (16). В районе 39–40° з. д. эти рециркуляционные ветви подходят близко друг к другу. Затем Южная РЮВ АЦТ-1 продолжает следовать на запад вдоль северной границы хребта Северный Скоша, проходя к северу от о-вов Шаг и Блэк (2), и в районе 43–44° з. д. сливается с ЦВ АЦТ. Другая ветвь (Северная РЮВ АЦТ-1) разворачивается на северо-восток и далее, как ЮВ АЦТ-1, между 38° и 37° з. д. близко подходит к ЦВ АЦТ. Далее ЮВ АЦТ-1 разворачивается на юго-восток и следует вдоль южной периферии котловины Георгия, затем под влиянием поднятия Северо-Восточная Георгия (17) снова разделяется на два потока. Часть вод огибает хребет с северо-запада и сливается с ЦВ АЦТ, а основной поток ЮВ АЦТ-1 огибает хребет с юга и продолжает следовать вдоль северной и восточной границ поднятия дна с глубинами менее 3000 м (рис. 4). В целом выявленное нами по данным реанализа *СМЕМС* существование антициклонического разворота ЮВ АЦТ вокруг о. Южная Георгия подтверждает результаты других авторов, однако система течений в районе указанного острова, согласно нашему исследованию, характеризуется более сложной структурой, чем, например, в работах [3, 27, 29].

После деления общего потока ЮВ АЦТ восточнее 48° з. д. на две ветви более южная ветвь ЮВ АЦТ продолжает следовать на восток. Между 44° и 41° з. д. эта ветвь также разделяется на две ветви – ЮВ АЦТ и ЮВ АЦТ-2, проходящие над изобатами 4000 и 3500 м соответственно. Восточнее ЮВ

АЦТ огибает поднятие дна с глубинами менее 3000 м и заметно смещается на юг. Между 33° и 31° з. д. ЮВ АЦТ образует S-образный меандр, следуя через проход Георгия (32), далее проходит к северу от Южно-Сандвичева желоба (28) примерно вдоль изобаты 3500 м и восточнее 28° з. д. сливается с ЮВ АЦТ-1 (рис. 4).

Отметим, что в центральной и восточной частях моря Скоша фронтальная структура поля ТПО заметно проще, чем структура потоков ЮВ АЦТ. Она характеризуется двумя экстремумами МГТ, соответствующими двум основным ветвям фронта (ФЮВ АЦТ-1 и ФЮВ АЦТ), при этом рециркуляционные ветви ЮВ АЦТ как температурные фронты не проявляются (рис. 3, d–f). В центральной части акватории две ветви ФЮВ АЦТ практически совпадают по положению со стрежнями ЮВ АЦТ-1 и ЮВ АЦТ-2 (рис. 3, d). Восточнее, на долготе о. Южная Георгия, ФЮВ АЦТ-1 располагается почти на 1° севернее стрежня ЮВ АЦТ-1, а ФЮВ АЦТ смещен почти на $0,5^\circ$ к югу относительно стрежня ЮВ АЦТ (рис. 3, e). К востоку от хребта Северо-Восточная Георгия положение ФЮВ АЦТ-1 совпадает с положением стрежня ЮВ АЦТ-1, а ФЮВ АЦТ располагается почти на $0,5^\circ$ южнее ЮВ АЦТ (рис. 3, f).

Динамические и температурные фронты южной части пролива Дрейка и моря Скоша. В южной части пролива Дрейка и моря Скоша к югу от ЮВ АЦТ наблюдаются относительно слабые потоки (рис. 2, a). Согласно существующим представлениям, здесь располагаются два основных фронта: Граница континентальных вод и ее продолжение (Фронт моря Скоша), а также Граница круговорота моря Уэдделла [2, 3, 30].

Граница континентальных вод и Фронт моря Скоша. Анализ векторов геострофических течений и донной топографии (рис. 1; 2, a) показал, что поток, соответствующий ГКВ, проходит над свалом глубин Антарктического шельфа и шельфа Южно-Шетландских о-вов (рис. 4). В проливе Дрейка в среднемноголетнем поле температуры на поверхности ГКВ как фронт не проявляется (рис. 3, a). Восточнее о. Кинг-Джордж (7) поток ГКВ практически сливается с ЮВ АЦТ (рис. 3, b). К востоку от о. Мордвинова (8) ГКВ, согласно [2], носит название Фронт моря Скоша и в западной части моря проходит вдоль северной границы хребта Южный Скоша (45) (рис. 4). В этом районе температурный ФМС прослеживается почти на $0,5^\circ$ севернее динамического фронта (рис. 3, c). Восточнее 48° з. д. на подходе к Южно-Оркнейскому желобу (26) ФМС разделяется на две ветви, при этом основная ветвь проходит над свалом глубин к югу от банки Пири (14) и затем огибает ее с востока. Другая ветвь (ФМС-1) следует вдоль северной границы шельфа Южных Оркнейских о-вов (5) и между 42° и 43° з. д. практически сливается с Границей круговорота моря Уэдделла (ГКМУ) (рис. 4). Температурный ФМС здесь совпадает по положению со стрежнем общего потока ФМС-1 + ГКМУ (рис. 3, d). К востоку от 42° з. д., подходу к банке Брюс (15), поток ФМС-1 + ГКМУ разделяется, при этом ФМС-1 разворачивается на север, огибает банку с запада и затем снова сливается с ГКМУ (рис. 4).

Основная ветвь ФМС после огибания банки Пири поворачивает на восток, следуя над глубинами 3000–3500 м, и в районе 40° з. д. к югу от поднятия дна с глубинами менее 2500 м близко подходит к ЮВ АЦТ. Восточнее 39° з. д. ЮВ АЦТ и ФМС снова расходятся, при этом ФМС несколько смещается к югу и проходит к северу от плато Дискавери (19) с глубинами менее 2000 м (рис. 4). В поле ТПО ФМС здесь не проявляется (рис. 3, *e*). Восточнее 34° з. д. поток ФМС повторно разделяется на две ветви. Южная более слабая ветвь (ФМС-2) продолжает следовать на восток – юго-восток вдоль северной границы поднятия дна с глубинами менее 2000 м и далее проходит южнее дуги Южных Сандвичевых о-вов (4). Основной поток ФМС следует на северо-восток над глубинами более 3500 м и восточнее 30° в. д. в свою очередь разделяется на три ветви. Одна ветвь (собственно ФМС) образует S-образный меандр и огибает островную дугу с севера, проходя над Южно-Сандвичевым желобом (28). Две другие ветви (ФМС-3 и ФМС-4) следуют в квазизональном направлении на восток через относительно глубоководные проходы в межостровной зоне (рис. 4). Здесь температурный фронт прослеживается несколько южнее стрежня ФМС-3 (рис. 3, *f*).

Таким образом, Граница континентальных вод и ее продолжение – Фронт моря Скоша хорошо прослеживаются в среднемноголетнем поле геострофической скорости как отдельный динамический фронт, который на большей части акватории не совпадает с ЮВ АЦТ. Этот результат уточняет более ранние представления о том, что ГКВ и ФМС являются Южной границей АЦТ, определяемой только по термохалинным признакам, но не идентифицируемой как динамический фронт [3].

Граница круговорота моря Уэдделла. Граница круговорота моря Уэдделла (ГКМУ), располагающаяся к югу от ФМС, представляет собой сложную систему относительно слабых потоков, в которой можно выделить несколько ветвей, формирующих топографические меандры и круговороты различного знака (рис. 2, *a*).

Следуя вдоль восточного шельфа Антарктического п-ова, поток ГКМУ южнее о. Джеймса Росса (9) разделяется на две ветви (рис. 4). Одна часть вод ГКМУ через Антарктический пролив проникает в пролив Брансфилд (30) и формирует южную периферию циклонического меандра (ЮПМПРБ), существование которого отмечалось ранее [8] (рис. 4). Отметим, что выявленный по данным реанализа *СМЕМС* на климатическом временном масштабе заток вод моря Уэдделла в пролив Брансфилд наблюдался и по данным отдельных гидрологических съемок [8, 34–36]. Оценки расходов течений в проливе Дрейка на основе боксовой модели [27] также показали существование переноса на запад через пролив Брансфилд и вдоль Антарктического континентального склона. Северная периферия циклонического меандра (СПМПРБ) образуется в результате слияния потока вод из моря Уэдделла, разворачивающегося на восток, и потока Прибрежного течения, проникающего в пролив с запада в районе 64° ю. ш. (рис. 4). В поле ТПО Прибрежному течению соответствует хорошо выраженный Прибрежный фронт (рис. 3, *a*). В восточной части пролива Брансфилд поток СПМПРБ смещается на север к 62° ю. ш. (рис. 3, *b*) и примерно на долготе о. Жуэнвиль (10) разделяется на две струи.

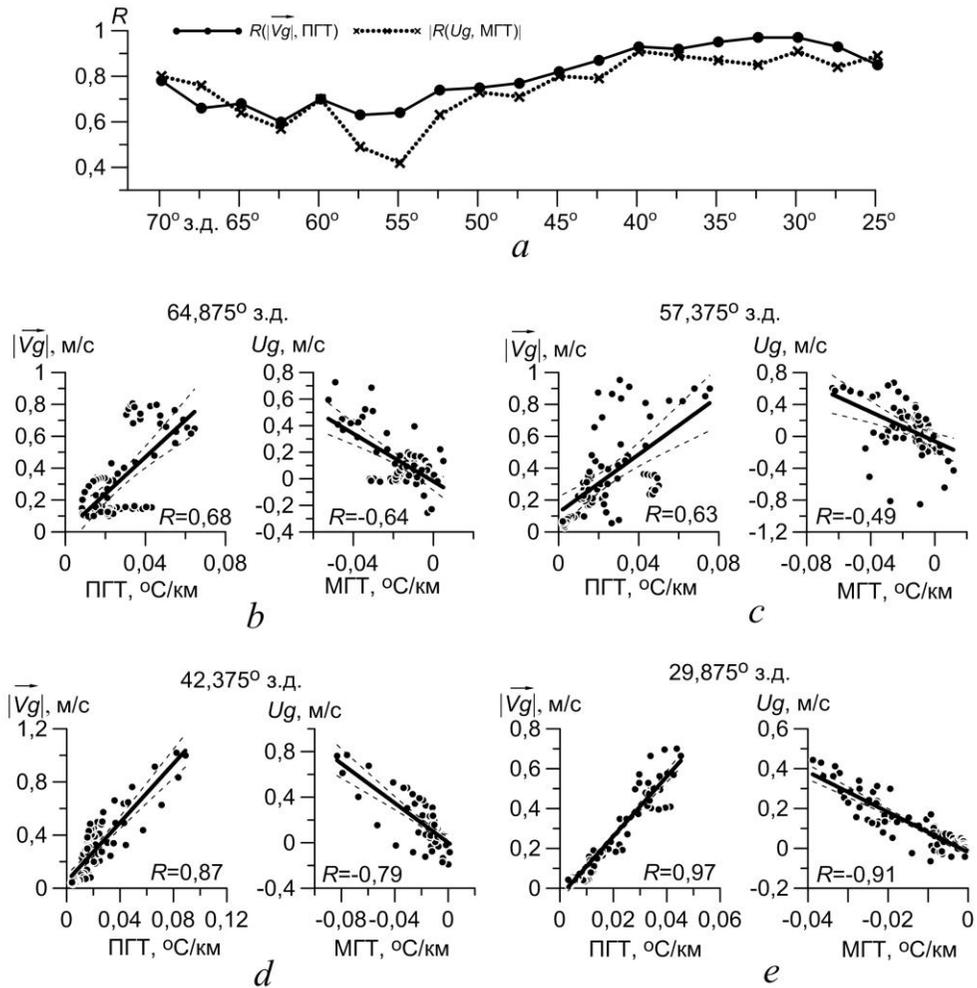
Одна следует вдоль восточного желоба пролива Брансфилд, проникает между о-вами Мордвинова и Шишкова (8) и сливается с ФМС. Другая струя вовлекается в систему циклонической циркуляции круговорота моря Уэдделла и следует на восток как ГКМУ, проходя над северным шельфом архипелага Жуэвиль и далее над северной частью котловины Поуэлл (38) (рис. 3, с; 4). Восточнее ГКМУ огибает мелководную часть Южно-Оркнейского шельфа с глубинами менее 500 м и между 42° и 43° в. д. сливается с ФМС-1, образуя общий поток ФМС-1 + ГКМУ (рис. 4). Восточнее 41° в. д. ФМС-1 и ГКМУ расходятся, ГКМУ проходит вдоль южной границы впадины Оркней (27), следует по S-образной траектории над банкой Брюс и к северу от банки несколько усиливается вследствие повторного слияния с потоком ФМС-1. Затем ГКМУ огибает банку с востока, при этом часть потока разворачивается по антициклонической траектории, образуя топографический вихрь над котловиной Скан (41) (рис. 3, е). Другая часть потока через проход Брюс проникает на юг и восточнее 38° з. д. сливается с еще одной ветвью ГКМУ, получившей название ГКМУ-1. Эта ветвь отделяется от общего потока ГКМУ южнее о. Джеймса Росса и следует на северо-восток к северу от каньона Аврора (29) (рис. 4). Часть потока ГКМУ-1 огибает восточную оконечность Антарктического шельфа, проникает в котловину Поуэлл и следует по S-образной траектории на север, сливаясь с ГКМУ (рис. 3, с; 4). Другая часть вод ГКМУ-1 следует на восток вдоль южной границы котловины Поуэлл.

Между 49° и 48° з. д. отмечается еще одна квазимеридиональная струя – ГКМУ-2, которая на границе котловины Поуэлл разворачивается на восток и ближе к Южно-Оркнейскому шельфу сливается с ГКМУ-1 (рис. 2, а; 4). Далее ГКМУ-1 следует вдоль южной границы шельфа, затем постепенно смещается на север, проходит вдоль северной границы хребта Эндьюранс (46) и сливается с ГКМУ (рис. 3, d; 4). Общий поток ГКМУ следует на восток южнее хребта Брюс и поднятия дна дуги Южно-Сандвичевых о-вов (рис. 3, f; 4).

Отметим, что пространственная структура динамических фронтов в зоне ГКМУ заметно сложнее, чем структура температурных фронтов на поверхности моря Уэдделла [30]. Соответствующий срежнему ГКМУ Фронт моря Уэдделла в среднемноголетнем поле ТПО наиболее четко проявляется в восточной части пролива Брансфилд (рис. 3, b) и у южной границы хребта Брюс (рис. 3, e).

Связь пространственного положения динамических и температурных фронтов. Анализ среднегодовой структуры полей геострофической скорости и температуры поверхности показал, что в большинстве случаев в широтном диапазоне, близком к положению максимума скорости того или иного течения, прослеживается экстремум градиента ТПО, соответствующий температурному фронту. Особенно четко в поле ТПО проявляются ветви АЦТ в виде наиболее интенсивных Субантарктического, Антарктического полярного фронтов и Фронта ЮВ АЦТ. Это не совсем согласуется с результатами работы [28], в которой утверждается, что градиенты ТПО неприменимы для выявления фронтов в Южном океане и исследования временной изменчиво-

сти их положения, так как величины градиентов слишком малы в холодных южных водах.



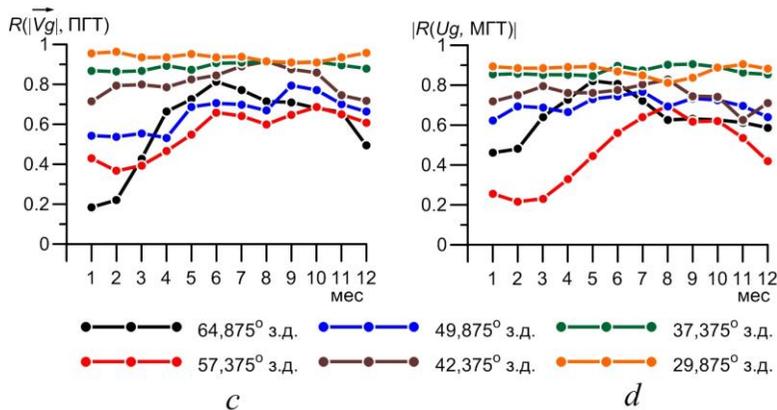
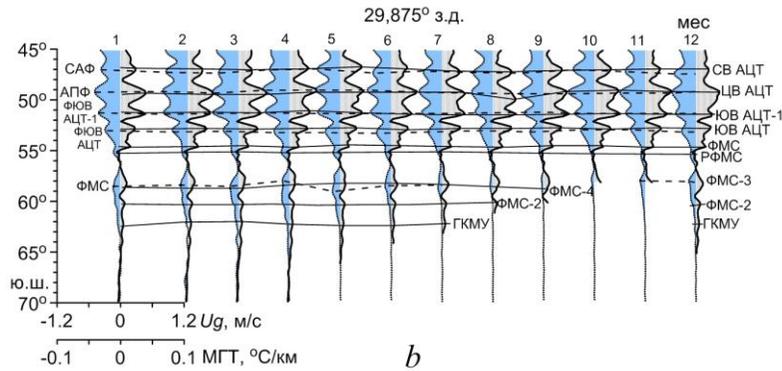
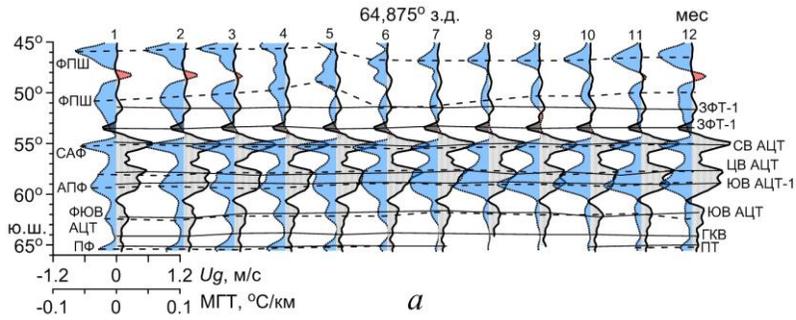
Р и с. 5. Коэффициенты линейной корреляции между среднееголетними распределениями значений модуля геострофической скорости и полного градиента температуры $R(|\vec{v}_g|, \text{ПГТ})$, зональной составляющей скорости и меридионального градиента температуры (по абсолютной величине) $|R(U_g, \text{МГТ})|$ на отдельных меридианах с дискретностью $2,5^\circ$ долготы (а); графики линейной связи между среднееголетними величинами $|\vec{v}_g|$ и ПГТ, U_g и МГТ для меридианов $64,875^\circ$ з. д. (b), $57,375^\circ$ з. д. (c), $42,375^\circ$ з. д. (d), $29,875^\circ$ з. д. (e). Штриховые линии – границы 99%-ных доверительных интервалов

F i g. 5. Values of the linear correlation coefficients R between the average long-term distributions of the values of the geostrophic velocity module and the total temperature gradient $R(|\vec{v}_g|, \text{TTG})$, the zonal velocity and the temperature meridional gradient (in absolute value) $|R(U_g, \text{TMG})|$ on individual meridians with discreteness 2.5° along the longitude (a); graphs of the linear correlation between the long-term average values of $|\vec{v}_g|$ and TTG, U_g and TMG for the meridians 64.875° W (b), 57.375° W (c), 42.375° W (d), 29.875° W (e). Dashed lines denote the boundaries of the 99% confidence intervals

Между распределениями климатических среднегодовых значений $|\bar{V}g|$ и ПГТ, Ug и МГТ вдоль меридианов выявлена значимая линейная связь на 99%-ном доверительном уровне, при этом величины коэффициентов корреляции R между всеми параметрами изменяются по пространству (рис. 5). В западной части пролива Дрейка они составляют 0,8 (по абсолютной величине) (рис. 5, *a*). Восточнее, на меридианах, пересекающих пролив Дрейка и мелководную часть Патагонского шельфа, величины R уменьшаются и не превышают 0,7 (рис. 5, *a, b*). Понижение уровня связи обусловлено тем, что над шельфом наблюдаются интенсивные температурные фронты, а течения ослаблены (рис. 3, *a*). В диапазоне 60–55° з. д. значения коэффициентов корреляции R между $|\bar{V}g|$ и ПГТ составляют 0,65–0,7, между Ug и МГТ 0,4–0,5 (рис. 5, *a, c*). Понижение уровня связи между Ug и МГТ обусловлено тем, что над свалом глубин Патагонского шельфа наблюдается усиление меридиональной составляющей скорости и зональных градиентов, а интенсивные зональные рециркуляционные ветви СВ АЦТ слабо проявляются в поле ТПО (рис. 3, *b*).

Восточнее 55° з. д., где течения более четко проявляются в поле зональной скорости, а температурные фронты преимущественно квазизональны (рис. 3, *c – e*), величины коэффициентов корреляции R между всеми параметрами повышаются и достигают наибольших значений (выше 0,8) к востоку от 42° з. д. (рис. 5, *a, d*). Абсолютный максимум величин R (0,91–0,97) отмечается в районе 30° з. д. (рис. 5, *a, e*), где наблюдается наилучшее совпадение среднемноголетнего положения основных динамических и температурных фронтов (рис. 3, *f, 4*).

Основные особенности фронтальной структуры в полях геострофических скоростей и температуры сохраняются от месяца к месяцу. На рис. 6, *a, b* показаны примеры среднемесячных распределений величин Ug и МГТ вдоль меридианов, пересекающих западную и восточную части акватории. Видно, что все основные динамические и температурные фронты четко прослеживаются в течение всех месяцев. Исключение составляют самые южные фронты – Прибрежное течение и Прибрежный фронт, ветви Фронта моря Скоша в восточной части акватории, Граница круговорота моря Уэдделла и Фронт моря Уэдделла, которые в зимние месяцы Южного полушария в период интенсивного ледообразования и смещения границы льдов на север не прослеживаются (рис. 6, *a, b*). В районах наиболее выраженных неоднородностей рельефа дна (северная граница Фолклендского плато и шельфа Огненной Земли, границы шельфа Фолклендских о-вов и банки Бердвуд, разлом Шеклтона, свал глубин шельфа Южно-Шетландских о-вов) широтное положение фронтов в течение года практически не изменяется. Таким образом, пространственная структура фронтов на поверхности (их количество и положение) на среднегодовом и среднемесячных масштабах обуславливается преимущественно донной топографией, что согласуется с результатами модельных расчетов [28].



Р и с. 6. Распределение климатических среднемесячных значений МГТ (пунктир) и U_g (сплошные) вдоль 64.875° з. д. (a), 29.875° з. д. (b); внутригодовой ход коэффициентов линейной корреляции между распределениями среднемесячных значений модуля геострофической скорости и полного градиента температуры $R(|\vec{v}_g|, \text{ПГТ})$ (c), зональной составляющей скорости и меридионального градиента температуры (по абсолютной величине) $|R(U_g, \text{МГТ})|$ (d) для различных меридианов. Отрицательные МГТ показаны синим цветом, положительные – красным; сплошные линии – положение стрежней течений, штриховые – температурных фронтов

F i g. 6. Distribution of the climatic monthly average TMG (dashed curves) and U_g (solid curves) values along 64.875°W (a), 29.87°W (b); the intra-annual variation of the linear correlation coefficients R between the distributions of the monthly average values of $|\vec{v}_g|$ and TTG (c), U_g and TMG (in absolute value) (d) for different meridians. Negative TMG values are shown in blue, positive ones – in red; solid lines denote positions of the current jets, dashed lines – positions of the temperature fronts

Внутригодовой ход величин коэффициента линейной корреляции R между распределениями среднемесячных значений $|\bar{V}_g|$ и ПГТ (рис. 6, *c*), U_g и МГТ (рис. 6, *d*) показал, что в западной части акватории наблюдаются заметные изменения уровня линейной связи в течение года. Летом Южного полушария (январь – февраль) величины R минимальны и не превышают 0,2–0,45, в период с конца осени до начала весны они повышаются и достигают 0,7–0,8. Это связано с тем, что на Патагонском шельфе выявлены существенные внутригодовые изменения количества, широтного положения и интенсивности экстремумов градиентов, соответствующих прибрежным температурным фронтам. Летом Южного полушария эти фронты заметно усиливаются, тогда как положение и интенсивность очень слабых динамических фронтов (меандры Западного Фолклендского течения) в течение года изменяются незначительно (рис. 6, *a*). В восточном направлении уровень линейной связи между распределениями среднемесячных значений $|\bar{V}_g|$ и ПГТ, U_g и МГТ во все месяцы заметно повышается, и к востоку от 40° з. д. величины R в течение года остаются в пределах 0,85–0,97 (рис. 6, *c, d*).

Заключение

На основе среднесуточных данных составляющих геострофической скорости реанализа *CMEMS* представлена уточненная схема климатического положения стрежней геострофических потоков (динамических фронтов) на поверхности юго-западной части Атлантического сектора Антарктики. Показано, что среднемноголетняя структура динамических фронтов гораздо сложнее, чем представлялось ранее. Пространственное положение и количество динамических фронтов связано с особенностями рельефа дна, под влиянием которых происходит разделение фронтов на отдельные ветви, меандрирование и формирование рециркуляционных ветвей. Интенсивные топографические меандры и круговороты различного знака, формируемые динамическими фронтами, устойчиво проявляются на климатическом масштабе.

Показано, что под влиянием донной топографии крупномасштабные ветви АЦТ могут сливаться, формируя общие потоки, а затем расходиться, снова образуя систему отдельных струй. Установлено, что слияние вод Центральной ветви АЦТ с потоком Северной ветви происходит не только к востоку от банки Морис Юинг, но и к западу от нее, где под влиянием рельефа дна формируются еще две ветви ЦВ АЦТ – рециркуляционная и ЦВ АЦТ-1. Выявлено, что основные особенности фронтальной структуры в поле геострофических скоростей (количество ветвей динамических фронтов и их положение) сохраняются от месяца к месяцу. В районах, где фронты находятся под влиянием наиболее выраженных неоднородностей рельефа дна (северная граница Фолклендского плато и шельфа Огненной Земли, границы шельфа Фолклендских о-вов и банки Бердвуд, хребет Шеклтона, свал глубин шельфа Южно-Шетландских о-вов), они не изменяют широтное положение в течение года.

Показано, что в большинстве случаев динамические фронты проявляются в поле температуры на поверхности. В целом на акватории среднегодовое положение САФ и АПФ в поле ТПО смещено к югу относительно положения стрежней СВ АЦТ и ЦВ АЦТ примерно на 0,25–0,5° и на 0,25–1° широты со-

ответственно. Установлена значимая линейная корреляция между средне-годовым положением динамических и температурных фронтов. Максимальный уровень связи (выше 0,8 по абсолютной величине) выявлен в западной части пролива Дрейка и к востоку от 42° з. д. Абсолютный максимум величин R (0,91–0,97) отмечается в районе 30° з. д.

Показано, что в западной части акватории уровень связи между положением динамических и температурных фронтов заметно изменяется в течение года. Летом Южного полушария величины R минимальны и не превышают 0,2–0,45, в период с конца осени до начала весны они повышаются и достигают 0,7–0,8. В восточной части акватории величины R в течение года практически не изменяются и остаются в пределах 0,85–0,97.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гурецкий В. В.* Поверхностные термические фронты в атлантическом секторе Южного океана // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 8. С. 81–89. URL: <https://www.researchgate.net/publication/263766610> (дата обращения: 15.02.2022).
2. *Peterson R. G., Stramma L.* Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean // *Progress in Oceanography*. 1991. Vol. 26, iss. 1. P. 1–73. doi:10.1016/0079-6611(91)90006-8
3. *Orsi A. H., Whitworth Th. III, Nowlin W. D. Jr.* On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1995. Vol. 42, iss. 5. P. 641–673. doi:10.1016/0967-0637(95)00021-W
4. Structure and Seasonal Variability of Large-Scale Fronts in the Southwestern Atlantic and Adjacent Basins of the Antarctica Based on Hydrological and Satellite Data / Yu. V. Ar-tamonov [et al.] // *Oceanology*. 2005. Vol. 45, iss. 5. P. 617–630.
5. *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. Vol. 114. C11018. doi:10.1029/2008JC005108
6. *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. Vol. 114. C11019. doi:10.1029/2008JC005248
7. Defining Southern Ocean fronts and their influence on biological and physical processes in a changing climate / C. C. Chapman [et al.] // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 209–219. doi:10.1038/s41558-020-0705-4
8. *Масленников В. В.* Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М. : ВНИРО, 2003. 295 с. URL: http://www.atlant.vniro.ru/images/stories/foto_sobitij/sys_inspectirovania_antkom/systema_nau4nogo_nablydenija/ruk_i_spravo4naj_literatura/knigi/Klimati4eskie_kolebania.pdf (дата обращения: 10.02.2022).
9. *Turner J.* The El Niño – Southern Oscillation and Antarctica // *International Journal of Climatology*. 2004. Vol. 24, iss. 1. P. 1–31. doi:10.1002/joc.965
10. *Sallée J. B., Speer K., Morrow R.* Response of the Antarctic Circumpolar Current to Atmospheric Variability // *Journal of Climate*. 2008. Vol. 21, iss. 12. P. 3020–3039. doi:10.1175/2007JCLI1702.1
11. On the interannual variability of ocean temperatures around South Georgia, Southern Ocean: Forcing by El Niño/Southern Oscillation and the Southern Annular Mode / M. P. Meredith [et al.] // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2008. Vol. 55, iss. 18–19. P. 2007–2022. doi:10.1016/j.dsr2.2008.05.020
12. *Sokolov S., Rintoul S. R.* On the relationship between fronts of the Antarctic Circumpolar Current and surface chlorophyll concentrations in the Southern Ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. Vol. 112. C07030. doi:10.1029/2006JC004072

13. Fronts and habitat zones in the Scotia Sea / H. Venables [et al.] // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2012. Vol. 59–60. P. 14–24. doi:10.1016/j.dsr2.2011.08.012
14. Large-Scale, Persistent Nutrient Fronts of the World Ocean: Impacts on Biogeochemistry / J. B. Palter [et al.] // *Chemical Oceanography of Frontal Zones* / Ed. I. M. Belkin. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2013. 38 p. doi:10.1007/698_2013_241
15. *Lohmann R., Belkin I. M.* Organic pollutants and ocean fronts across the Atlantic Ocean: A review // *Progress in Oceanography*. 2014. Vol. 128. P. 172–184. doi:10.1016/j.pocean.2014.08.013
16. *Немировская И. А., Кравчишина М. Д.* Изменчивость концентрации взвеси и органических соединений во фронтальных зонах Атлантического и Южного океанов // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 1. С. 60–69. doi:10.7868/S0030157416010123
17. *Patterson S. L., Sievers H. A.* The Weddell-Scotia Confluence // *Journal of Physical Oceanography*. 1980. Vol. 10, iss. 10. P. 1584–1610. doi:10.1175/1520-0485(1980)010<1584:TWSC>2.0.CO;2
18. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А.* Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // *Исследование Земли из космоса*. 2005. № 4. С. 62–75.
19. *Артамонов Ю. В., Ломакин П. Д., Скрипалева Е. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик Фронта моря Скотия по спутниковым измерениям температуры поверхности океана // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 1. С. 66–76.
20. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А.* Океанографические исследования Морского гидрофизического института в Южном океане // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 63–73. doi:10.22449/0233-7584-2016-6-63-73
21. *Freeman N. M., Lovenduski N. S., Gent P. R.* Temporal variability in the Antarctic Polar Front (2002–2014) // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2016. Vol. 121, iss. 10. P. 7263–7276. doi:10.1002/2016JC012145
22. Абсолютные геострофические течения в проливе Дрейка по наблюдениям 2003 и 2005 гг. / М. Н. Кошляков [и др.] // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 4. С. 487–500.
23. *Гладышев С. В., Кошляков М. Н., Тараканов Р. Ю.* Течения в проливе Дрейка по данным наблюдений 2007 г. // *Океанология*. 2008. Т. 48, № 6. С. 821–833.
24. Течения в западной части пролива Дрейка по данным наблюдений в январе 2010 г. / М. Н. Кошляков [и др.] // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 2. С. 197–209.
25. Течения в проливе Дрейка по данным наблюдений в октябре – ноябре 2011 г. / М. Н. Кошляков [и др.] // *Океанология*. 2013. Т. 53, № 1. С. 5–16. doi:10.7868/S0030157413010073
26. *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. doi:10.1134/S003015741804010X
27. *Naveira Garabato A. C., Stevens D. P., Heywood K. J.* Water Mass Conversion, Fluxes, and Mixing in the Scotia Sea Diagnosed by an Inverse Model // *Journal of Physical Oceanography*. 2003. Vol. 33, iss. 12. P. 2565–2587. doi:10.1175/1520-0485(2003)033<2565:WMCFAM>2.0.CO;2
28. Southern Ocean fronts: Controlled by wind or topography? / R. M. Graham [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2012. Vol. 117. C08018. doi:10.1029/2012JC007887
29. Variability of the southern Antarctic Circumpolar Current front north of South Georgia / S. E. Thorpe [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2002. Vol. 37, iss. 1–3. P. 87–105. doi:10.1016/S0924-7963(02)00197-5
30. *Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Никольский Н. В.* Пространственная структура и внутрigoдовая изменчивость фронта моря Уэдделла по данным реанализа NOAA OISST // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 4. С. 89–102. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-89-102

31. *Наумов Л. М., Гордеева С. М.* Боковой перенос тепла и соли в Лофотенском бассейне: сравнение на основе трех баз данных // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 3. С. 43–55. doi:10.7868/S207366732003003X
32. Система оперативного моделирования Северного Ледовитого океана и прилегающих к нему акваторий на основе российской модели INMOM-Арктика / В. В. Фомин [и др.] // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11, № 2. С. 205–218. doi:10.25283/2223-4594-2021-2-205-218
33. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature / R. W. Reynolds [et al.] // *Journal of Climate*. 2007. Vol. 20, iss. 22. P. 5473–5496. doi:10.1175/2007JCLI1824.1
34. *Nilier P. P., Amos A., Hu J.-H.* Water masses and 200 m relative geostrophic circulation in the western Bransfield Strait region // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1991. Vol. 38, iss. 8–9. P. 943–959. doi:10.1016/0198-0149(91)90091-S
35. Результаты океанографических исследований в западной части пролива Брансфилда в марте 2002 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Украинский антарктический журнал*. 2003. № 1. С. 7–16. URL: <http://uaj.uac.gov.ua/index.php/uaj/article/view/614/510> (дата обращения: 03.02.2022).
36. *Zhou M., Zhu Y., Dorland R. D., Measures C. I.* Dynamics of the current system in the southern Drake Passage // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2010. Vol. 57, iss. 9. P. 1039–1048. doi:10.1016/j.dsr.2010.05.012

Об авторах:

Артамонов Юрий Владимирович, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ResearcherID: AAC-6651-2020**, artam-ant@yandex.ru

Скрипалева Елена Александровна, старший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ResearcherID: AAC-6648-2020**, sea-ant@yandex.ru

Никольский Николай Викторович, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: AAT-7723-2020**, nikolsky.geo@gmail.com