

УДК 551.465 (267.1)

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И
КРУПНОМАСШТАБНЫХ ФРОНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
ИНДООКЕАНСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО ОКЕАНА В РАЙОНАХ
НЕОДНОРОДНОСТИ РЕЛЬЕФА ДНА**

Е.А. Скрипалёва

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь, Seaant@yandex.ru

В работе на основе массива среднемесячных спутниковых измерений температуры поверхности океана (ТПО) из архива AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA исследуется пространственно-временная изменчивость поля ТПО и крупномасштабных фронтов на поверхности Индоокеанского сектора Южного океана в районах с выраженными неоднородностями рельефа дна. Показано, что структура и характеристики сезонного цикла поля ТПО и гидрологических фронтов имеют региональные особенности над хребтом Кергелен, плато Крозе, Австрало-Антарктическим поднятием и другими формами рельефа дна.

**Особливості структури поля температури та великомасштабних фронтів на поверхні
Індоокеанського сектора Південного океану в районах неоднорідності рельєфу дна.**

О.О. Скрипальова.

Реферат. У роботі на основі масиву середньомісячних супутникових вимірів температури поверхні океану (ТПО) з архіву AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA досліджується просторово-часова мінливість поля ТПО й великомасштабних фронтів на поверхні Індоокеанського сектора Південного океану в районах з вираженими неоднорідностями рельєфу дна. Показано, що структура та характеристики сезонного циклу поля ТПО й гідрологічних фронтів мають регіональні особливості над хребтом Кергелен, плато Крозе, Австрало-Антарктичним підняттям й іншими формами рельєфу дна.

The features of SST field and large-scale front's structure on the South Indian Ocean surface in the regions with bottom configuration inhomogeneities.

E.A. Skripaleva.

Abstract. On the base of monthly averaged SST satellite data (AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA) the space-time variability of SST field and large-scale fronts on the South Indian Ocean surface is investigated in the regions with pronounced bottom configuration inhomogeneities. Shown, that the structure and characteristics of climatic seasonal cycle of SST field and hydrological fronts have the regional features above the Kerguelen ridge, Crozet plateau, Australian-Antarctic rise and others bottom relief forms.

Key words: sea surface temperature, meridional gradient of temperature, large-scale front, climatic seasonal cycle, amplitude-phase characteristics, bottom relief, Kerguelen ridge, Crozet plateau, SST satellite data.

1. Введение

Многочисленные исследования гидрологической структуры и циркуляции вод Южного океана показали наличие связи между пространственно-временной изменчивостью термохалинных полей, фронтов и геострофических течений и особенностями рельефа дна. В работах [1–3] по материалам натурных наблюдений и многолетних архивных баз данных установлено, что одним из факторов, обуславливающих меандрирование струй Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), особенности их внутригодовых смещений и формирование многочисленных вихревых структур, является конфигурация берегов и

формы рельефа дна. Так, к северу от Южных Оркнейских островов при взаимодействии Южной ветви АЦТ с поднятием Пири наблюдаются квазистационарный антициклонический меандр над его вершиной и раздвоение течения на два потока – северо-восточного и юго-восточного направлений. Наличие многочисленных вихревых образований топографического происхождения обнаружено в Зоне слияния вод морей Уэдделла и Скотия, вытянутой вдоль дуг Южных Шетландских и Южных Оркнейских о-вов. Активное вихреобразование является одним из факторов, формирующих особый тип вертикальной стратификации вод в данном районе. Влияние рельефа дна на гидрологическую структуру вод обнаружено также в западной части пролива Брансфилда. Здесь Западное прибрежное течение взаимодействует с неоднородностями рельефа дна при перепадах глубин от 200 до 1000 м, что приводит к образованию квазистационарного циклонического вихря.

По спутниковым данным показано, что рельеф дна существенно влияет на структуру гидрологических фронтов в западной части Атлантического сектора Южного океана [3–7]. Субантарктический фронт характеризуется устойчивым внутригодовым положением, которое повторяет особенности рельефа дна (свал глубин Патагонского шельфа, северная граница Фолклендского плато). Установлено также, что к западу от банки Блэк-Рок, где существует глубоководный проход через Фолклендское плато, значительная часть вод Антарктического циркумполярного течения разворачивается на северо-восток, проникая в Аргентинскую котловину, при этом формируется S-образный меандр Антарктического полярного фронта (АПФ). На южной границе шельфовой отмели о. Южная Георгия в результате резкого перепада глубин, достигающего более 3000 м, формируется Северная ветвь Фронта моря Скотия.

Влияние рельефа дна на гидрологическую структуру вод показано и для Южной части Индийского океана [8–10]. По материалам архивных гидрологических измерений выявлено меандрирование и обострение крупномасштабных фронтов в районах плато Крозе и хребта Кергелен [8]. По данным спутниковых измерений ТПО и альтиметрии за 1997–1999 гг. обнаружено интенсивное меандрирование фронтов в районе возвышенности Агульяс, между плато Крозе и хребтом Кергелен. Выявлена повышенная мезомасштабная изменчивость характеристик гидрологических фронтов в глубоководных районах за квазимеридионально ориентированными хребтами (Западно-Индийским, Кергелен, Австрало-Антарктическим поднятием южнее о-ва Тасмания). Показано, что характерной чертой большинства фронтов в районах с особенностями донной топографии является бимодальность их структуры [9, 10].

С каждым годом увеличивается длительность временных рядов спутниковых измерений, на основе которых формируются обновленные климатические массивы данных ТПО. В [11, 12] на основе современных спутниковых данных с детальным пространственным разрешением выполнены исследования сезонного цикла ТПО и фронтов в Индийском океане. Настоящая работа является продолжением этих исследований и уточняет особенности структуры и изменчивости поля ТПО и крупномасштабных фронтов Индоокеанского сектора Южного океана в районах с резко выраженными неоднородностями рельефа дна.

2. Материалы и методика

В работе использован массив спутниковых измерений ТПО со среднемесячным осреднением в узлах сетки 54×54 км за период с 1985 по 2002 г. (архив *AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA*) [13]. Для исследования сезонной изменчивости поля ТПО в каждом узле регулярной сетки по этим данным рассчитывались среднемесячные климатические значения температуры, затем вычислялись амплитудно-фазовые характеристики поля ТПО. Оценки значимости годовой и полугодовой гармоник, выполненные методом нормировки полей соответствующих амплитуд на стандартное отклонение остаточного ряда, показали,

что годовая гармоника ТПО достоверна на всей исследуемой акватории, а полугодовая гармоника – у берегов Антарктиды и в южной части котловины Крозе между о-вами Крозе и хребтом Кергелен.

Идентификация фронтов и анализ их сезонного цикла проводились на меридиональных выборках с дискретностью 10 градусов по долготе согласно методике, изложенной в [3–7, 14]. При описании сезонного цикла фронтов разница между минимумом и максимумом абсолютных величин меридиональных градиентов температуры (МГТ) обозначена символом Δ МГТ. Величины экстремумов МГТ далее приводятся в скобках, при этом их размерность в $^{\circ}\text{C}/54$ км опускается.

3. Анализ результатов

3.1. Рельеф дна

Индоканский сектор Южного океана характеризуется следующими крупномасштабными особенностями рельефа дна (рис. 1) (Рис. 1-3 см. на цв. вклейке между 84 и 85 стр.).

На западе океана расположена обширная Африканско-Антарктическая котловина с глубинами более 5500 м, ограниченная шельфом Антарктиды, Африканско-Антарктическим хребтом, плато Крозе и хребтом Кергелен с глубинами 1000–2000 м. В северной части этой котловины находится поднятие, на котором расположены банки Обь и Лена с глубинами менее 300 м. К югу от Африки, между Африканско-Антарктическим и Западно-Индийским хребтами, находится котловина Агульяс (5500–6000 м), в северной части которой располагается возвышенность Агульяс (менее 2500–3000 м). К северу от Западно-Индийского хребта находятся Мозамбикская и Мадагаскарская котловины (~5000–6000 м), разделенные Мадагаскарским хребтом. Далее на восток, между Западно-Индийским и Центрально-Индийским хребтами, расположена котловина Крозе с глубинами более 5000 м.

В восточной части океана простирается Австрало-Антарктическая котловина с преобладающими глубинами 4500–6000 м, ограниченная хребтом Кергелен, Австрало-Антарктическим поднятием с глубинами менее 2000 м и шельфом Антарктиды. Севернее Австрало-Антарктического поднятия, между южным окончанием Восточно-Индийского хребта и Западно-Австралийским хребтом, находится котловина Амстердам с глубинами около 4000–5000 м. В ней имеется глубоководный (более 6500 м) разлом Дамантин. Южнее материкового склона Австралии располагается Южно-Австралийская котловина с глубинами 5600–5800 м. С юга она ограничена Австрало-Антарктическим поднятием. На восточной границе океана к югу от о-ва Тасмания находится возвышенность Милл с глубиной менее 750 м.

Антарктический шельф Индоканского сектора имеет внутреннюю и внешнюю зоны, разделенные крутым уступом. Внутренний шельф имеет глубины порядка 100–150 м, внешний – 400–500 м. Ширина шельфа в целом составляет 50–150 миль [1, 15].

3.2. Структура и сезонная изменчивость поля ТПО

Пространственное распределение среднегодового климатического поля ТПО (рис. 2, а) показывает ряд особенностей, связанных с неоднородностями рельефа дна. Над возвышенностями и хребтами, особенно в западной части океана, характеризующейся наиболее сложным рельефом дна, прослеживается смещение изотерм к северу, соответственно в диапазонах: 0–3 $^{\circ}\text{C}$ над Африканско-Антарктическим хребтом, 1–3 $^{\circ}\text{C}$ над поднятием дна с банками Обь и Лена, -1 – 12 $^{\circ}\text{C}$ над хребтом Кергелен, 5–12 $^{\circ}\text{C}$ над плато Крозе, 16–19 $^{\circ}\text{C}$ над возвышенностью Агульяс. В глубоководных районах наблюдается смещение изотерм к югу: над западными частями Африканско-Антарктической и Австрало-Антарктической котловин в диапазоне -1 – 3 $^{\circ}\text{C}$, над южной частью котловины Крозе – 5–15 $^{\circ}\text{C}$ и в северо-западной части котловины Агульяс – 16–19 $^{\circ}\text{C}$.

Еще одной особенностью распределения ТПО является заметное сгущение изотерм (и, как следствие, интенсификация фронтов) над Западно-Индийским хребтом в диапазоне 8-17°C и к северу от плато Крозе и хребта Кергелен в диапазоне 5-14°C.

Влияние рельефа дна проявляется в распределении амплитудно-фазовых характеристик поля ТПО. Положение областей максимальных годовых колебаний температуры (рис. 2, б) указывает на то, что помимо основного максимума амплитуды годовой гармонике (~ 3.5°C) в центральной части Южного субтропического антициклонического круговорота прослеживаются локальные максимумы (2.5-3°C) над возвышенностью Агульяс, к северу от плато Крозе и в районах Мозамбикской, Мадагаскарской и Южно-Австралийской котловин. Небольшое увеличение значений амплитуды (до 1.8°C) отмечается в южных частях Африканско-Антарктической и Австрало-Антарктической котловин. Распределение фазы годовой гармонике указывает на устойчивое запаздывание на один месяц во времени наступления максимума ТПО в открытых районах Южного океана (март) по сравнению с шельфом Антарктического континента и Австрало-Антарктическим поднятием (февраль).

Несмотря на то, что амплитуда полугодовой гармонике ТПО в 4-5 раз меньше годовой, на ее пространственном распределении также сказывается рельеф дна. Максимальные величины наблюдаются северо-восточнее о-вов Крозе (до 0.7°C), в морях Дейвиса и Дюрвиля у границы свала глубин Антарктического шельфа (до 0.5°C).

3.3. Структура и сезонная изменчивость фронтов в районах особенностей рельефа дна

На схеме среднегодового положения крупномасштабных фронтов влияние рельефа дна наиболее четко проявляется для Южного субтропического (ЮСбТФ), Субантарктического (САФ) и Антарктического полярного (АПФ) фронтов (рис. 3).

В западной части океана все три фронта, пересекая возвышенность Агульяс и Африканско-Антарктический хребет, несколько смещаются к северу. Восточнее, под влиянием рельефа дна, ЮСбТФ разворачивается на северо-восток, огибая Западно-Индийский хребет. Примерно на 33° ю.ш. ЮСбТФ поворачивает на юго-восток в северную часть котловины Крозе. Между 80° и 90° в.д. фронт опять смещается на север (34° ю.ш.), огибая плато Амстердам и северную оконечность Австрало-Антарктического поднятия. Затем ЮСбТФ следует в генеральном восточном направлении примерно вдоль южной границы разлома Диамантина и над Южно-Австралийской котловиной. В восточной части океана ЮСбТФ смещается на 39-40° ю.ш., проходя к югу о-ва Тасмания.

Субантарктический фронт восточнее возвышенности Агульяс смещается к югу, огибая плато Крозе. У Западно-Индийского хребта (46° ю.ш.) формируется еще одна ветвь САФ – Южная (ЮВ САФ). Она прослеживается и у северной границы поднятия дна с банками Обь и Лена. Проходя между плато Крозе и хребтом Кергелен, основная ветвь САФ огибает хребет и снова смещается на север (44-45° ю.ш.). Далее фронт прослеживается над Австрало-Антарктическим поднятием, постепенно смещаясь на юг до 50° ю.ш. В районе резкого свала глубин между Австрало-Антарктическим поднятием и Южно-Австралийской котловиной (120° в.д., 46-47° ю.ш.) формируется еще одна ветвь САФ – Северная (СВ САФ).

Антарктический полярный фронт к востоку от Африканско-Антарктического хребта смещается на юг и огибает поднятие дна с банками Обь и Лена. Между этим поднятием и хребтом Кергелен АПФ поворачивает на север (52° ю.ш.), а на подходе к хребту Кергелен – на юг (56° ю.ш.), проходя через глубоководный проход в южной части хребта. Далее (80° в.д.) фронт раздваивается, и более мощная ветвь следует вдоль хребта на северо-восток почти до 51° ю.ш. Более слабая ветвь АПФ – Южная (ЮВ АПФ) формируется на 56° ю.ш. и сохраняется над юго-западной частью Австрало-Антарктического поднятия (90° в.д.). Восточнее (100–140° в.д.) АПФ проходит вдоль южной границы Австрало-Антарктического

поднятия, смещаясь к югу до 59° ю.ш. Над квазимеридиональным участком этого поднятия на восточной границе океана (150° в.д.) АПФ смещается к северу (56° ю.ш.).

Рельеф дна влияет на интенсивность и сезонный цикл характеристик фронтов. Южный субтропический фронт наиболее обострен (МГТ ~ -1.2 – -1.5) над котловиной Агульяс (20° в.д.) и к востоку от Западно-Индийского хребта (50° в.д.). Здесь же отмечаются максимальные сезонные колебания его интенсивности (величины Δ МГТ ~ 0.2). Над котловиной Крозе и далее на восток фронт заметно ослабевает (МГТ ~ -0.4 – -0.6) и наблюдается уменьшение амплитуды сезонных вариаций его интенсивности до 0.1 (рис. 4, а). Большие различия отмечаются в сезонных смещениях широтного положения ЮСБТФ. Если к западу от Западно-Индийского хребта эти смещения не превышают одного градуса, что, по-видимому, обусловлено близостью материка, то в центральной открытой части океана амплитуда сезонных смещений фронта достигает почти 6° широты. Восточнее 100° в.д., где ощущается влияние разлома Диамантина и далее Австралийского материка, широтные колебания ЮСБТФ снова уменьшаются до 3° широты (рис. 4, б). Сезонные колебания температуры на оси фронта максимальны (до 6°С) к западу от Западно-Индийского хребта, где фронт мало изменяет свое широтное положение (рис. 4, в). В центральной части океана, где смещения фронта по широте велики, амплитуда температурных колебаний уменьшается до 3°С. Этот эффект объясняется тем, что при широтных смещениях фронта на сезонные колебания температуры накладывается ее климатический широтный ход, который уменьшает летний максимум и увеличивает зимний минимум ТПО.

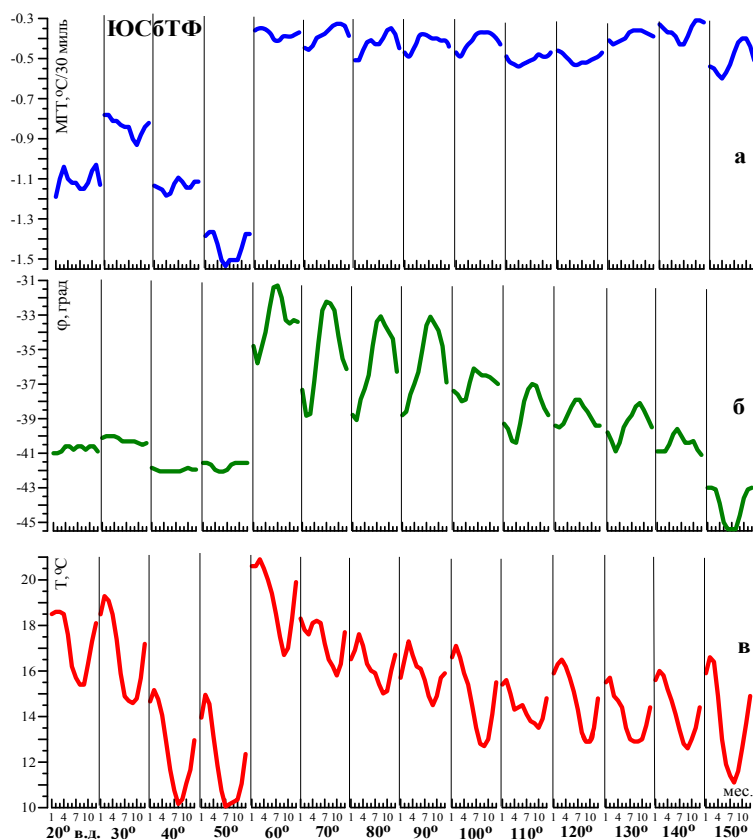


Рис. 4. Внутригодовой ход характеристик Южного субтропического фронта. Здесь и на рис. 5 и 6: величины МГТ – линии а, широтное положение оси фронта – линии б и температура, при которой формируется фронт, – линии в.

Для Субантарктического фронта наибольшие интенсивность (МГТ $\sim -1.2 - -1.4$) и амплитуда ее сезонных колебаний (Δ МГТ ~ 0.3) наблюдаются к югу от Африки ($20-30^\circ$ в.д.), восточнее плато Крозе (60° в.д.) и к северу от хребта Кергелен (70° в.д.). Минимальная амплитуда сезонных колебаний интенсивности (Δ МГТ ~ 0.1) прослеживается в районах, где сезонные смещения фронта минимальны (рис. 5, а, б). Сезонные смещения САФ меньше, чем для ЮСБТФ, и не превышают $1-2^\circ$ широты. Заметное увеличение амплитуды смещений САФ (до $3-4$ градусов) отмечается над западной и восточной частями Австрало-Антарктического поднятия (90° и 150° в.д.). Значительные амплитуды сезонных колебаний температуры на оси фронта (до $5-6^\circ\text{C}$) наблюдаются в западной части океана вплоть до 90° в.д., далее на восток они заметно ослабевают (до $3-4^\circ\text{C}$) (рис. 5, в). Это связано с тем, что САФ смещается в область океана, где амплитуда сезонных колебаний ТПО незначительна (рис. 2, б; 5, в).

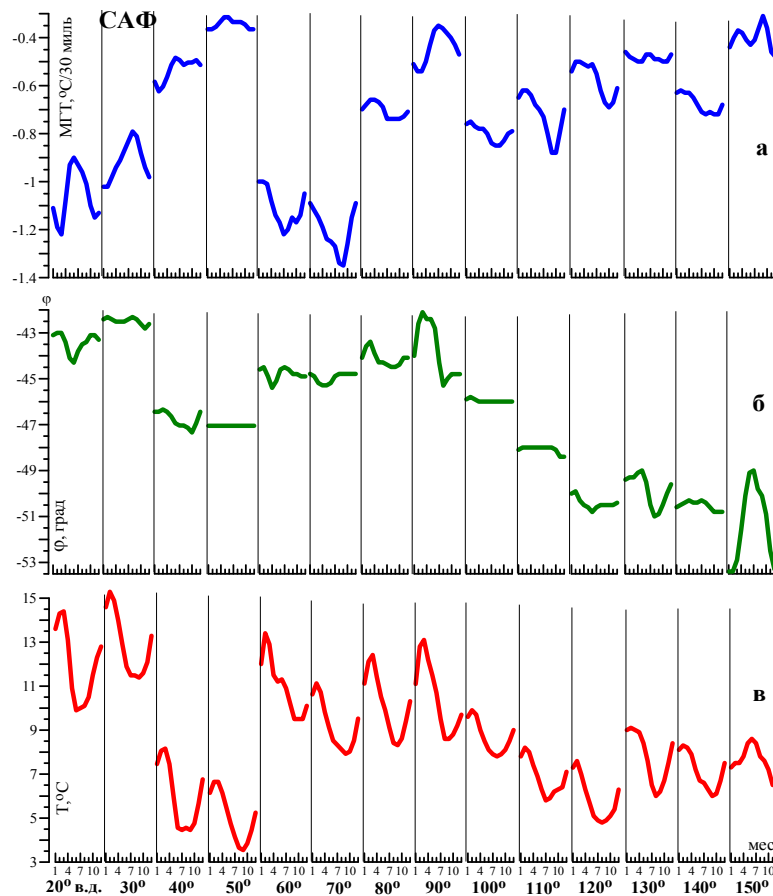


Рис. 5. Внутригодовой ход характеристик Субантарктического фронта

Рассматривая сезонную изменчивость характеристик Антарктического полярного фронта, отметим, что наибольшие интенсивность фронта (МГТ $\sim -0.7 - -0.8$) и ее сезонные колебания (Δ МГТ ~ 0.2) наблюдаются над северными отрогами Африканско-Антарктического хребта, восточнее хребта Кергелен и на востоке акватории над меридионально ориентированным участком Австрало-Антарктического поднятия (рис. 6, а). Амплитуда сезонных смещений АПФ в этих районах относительно невелика и в среднем составляет $1-2^\circ$ широты, при этом отмечаются максимальные сезонные вариации

температуры (до 4°C) (рис. 6, б, в). Наблюдается увеличение сезонных смещений АПФ почти до 3 градусов на подходе к хребту Кергелен (70° в.д.) и над Австрало-Антарктической котловиной (100° в.д.), при этом фронт здесь ослабевает. Характерно, что на этих меридианах наблюдаются минимальные амплитуды сезонных колебаний ТПО (до 2°C) на оси фронта (рис. 6, в).

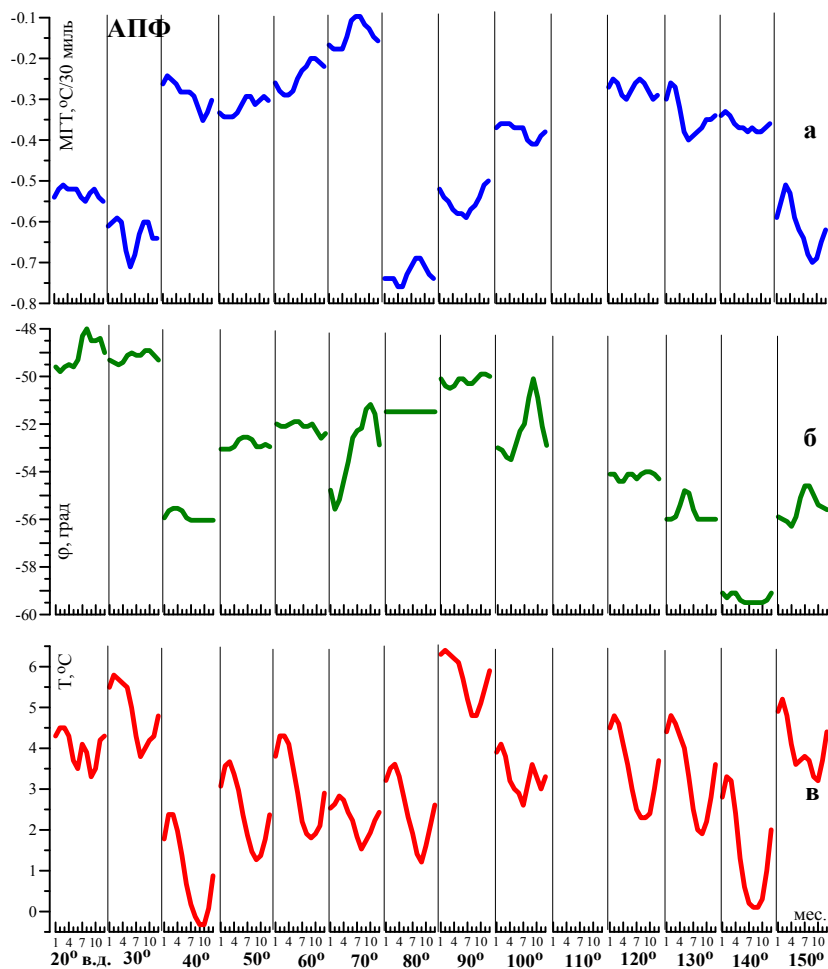


Рис. 6. Внутригодовой ход характеристик Антарктического полярного фронта

4. Заключение

Анализ спутниковых данных позволил уточнить особенности структуры и изменчивости поля ТПО и крупномасштабных фронтов Индоокеанского сектора Южного океана в районах с резко выраженными неоднородностями рельефа дна. Показано, что в климатическом поле ТПО наблюдается смещение изотерм к северу над возвышенностями, особенно в западной части океана, характеризующейся наиболее сложным рельефом дна. Отмечено сгущение изотерм над Западно-Индийским хребтом, к северу от плато Крозе и хребта Кергелен.

Влияние рельефа дна проявляется в распределении амплитудно-фазовых характеристик поля ТПО. Кроме основного максимума амплитуды годовой гармоники в центральной

части Южного субтропического антициклонического круговорота, прослеживаются ее локальные максимумы над возвышенностью Агульяс, к северу от плато Крозе и в районах Мозамбикской, Мадагаскарской и Южно-Австралийской котловин.

Показано, что интенсивность и сезонный цикл характеристик фронтов связаны с особенностями донной топографии. Южный субтропический фронт наиболее обострен над котловиной Агульяс и Западно-Индийским хребтом. Здесь наблюдаются максимальные сезонные колебания интенсивности фронта и минимальные смещения широтного положения. Субантарктический фронт наиболее интенсивен и характеризуется устойчивым внутригодовым положением над котловинами Агульяс и Крозе, к северу от хребта Кергелен. В этих же районах отмечается наибольшая внутригодовая изменчивость его интенсивности. Антарктический полярный фронт наиболее обострен над Африканско-Антарктическим хребтом и у восточной окраины хребта Кергелен, а также над квазимеридиональным участком Австрало-Антарктического поднятия, где фронт характеризуется максимальными сезонными вариациями интенсивности. Сезонные смещения положения фронта в целом невелики и возрастают только севернее квазисезонального отрога хребта Кергелен и над юго-западной частью Австрало-Антарктического поднятия.

Литература

1. Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Водные массы и циркуляция Южного океана. Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 288 с.
2. Peterson R.G., Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean // Prog. Oceanogr. – 1991. – № 26. – PP. 1–73.
3. Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Циркуляция и структура вод юго-западной части Атлантического океана и прилегающих акваторий Антарктики. Монография. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2008. – 116 с.
4. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А. Структура и сезонная изменчивость Субантарктического фронта в юго-западной Атлантике по данным спутниковых измерений температуры поверхности океана // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2005. – С. 237–239.
5. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. и др. Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Юго-Западной Атлантики и прилегающих акваторий Антарктики по гидрологическим и спутниковым данным // Океанология. – 2005. – 45. – № 5. – С. 656–669.
6. Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А. Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик Фронта моря Скотия по спутниковым измерениям температуры поверхности океана // МГЖ. – 2008. – № 1. – С. 57–67.
7. 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.
8. Романов А.В. Основные фронты Индийского сектора Южного океана и их влияние на распределение гидробионтов / Диссертация на соискание ученой степени кандидата географ. наук. – Севастополь, 1999. – 408 с.
9. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Франкинюль М. и др. Исследование фронтов южной части Индийского океана с помощью спутниковых температурных данных // Исследование Земли из космоса. – 2002. – № 5. – С. 39–49.
10. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А. и др. Фронты и мезомасштабная изменчивость в южной части Индийского океана по альтиметрическим данным TOPEX/POSEIDON и ERS-2 // Океанология. – 2003. – 43. – № 5. – С. 671–682.
11. Скрипалева Е.А. Особенности сезонной изменчивости поля температуры на поверхности Индийского океана по контактными и спутниковым данным // Доповіді НАН України. – 2009. – № 12. – С. 126–131.

Е.А. Скрипалёва: ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И КРУПНОМАСШТАБНЫХ ...

12. **Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Бабий М.В.** и др. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрологических фронтов Южного океана // УАЖ. – 2009. – № 8. – С. 147–158.

13. <http://podaac.jpl.nasa.gov/woce/woce3>).

14. **Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А.** Сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов восточной части Тихого океана по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 4. – С. 45–61.

15. **Канаев В.Ф., Нейман В.Г., Парин Н.В.** Индийский океан. Природа и ресурсы Мирового океана. М.: Мысль, 1975. 284 с.