

*С.М. Гордеева, В.Н. Малинин*

**КРУПНОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ  
ЮЖНОГО СУБТРОПИЧЕСКОГО ФРОНТА  
В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА**

*S.M. Gordeeva, V.N. Malinin*

**LARGE-SCALE VARIABILITY OF THE SOUTHERN  
SUBTROPICAL FRONT IN THE SOUTH-EASTERN PART  
PACIFIC OCEAN**

*Обсуждаются результаты пространственно-временного анализа южного субтропического фронта (ЮСФ) в юго-восточной части Тихого океана, выделенного в поле температуры поверхности океана (ТПО) за период с 1982 по 2003 г. На основе кластерного анализа осуществлена классификация характеристик фронта. Показано наличие значимых трендов в межгодовых колебаниях интенсивности и положении фронта (ЮСФ).*

*The space-time analysis results of the southern subtropical front (in the southeastern part of the Pacific Ocean) estimated by ocean surface temperature for the 1982-2003 period are discussed. On the basis of cluster analysis the classification of the front characteristics is done. It is shown that trends in the interannual variations of intensity and their position do exist.*

Фронтальные явления в океане относятся к числу наиболее сложных физических явлений. Возможно, поэтому до настоящего времени не утихают дискуссии не только о природе и структуре гидрологических фронтов, но и даже о терминологии и критериях их выделения. Очевидно, в общем случае все фронтальные явления целесообразно разделить на три самостоятельных категории (типа): фронтальная зона, фронтальный раздел и собственно фронт.

В соответствии с определением К.Н. Федорова [Промыслово-океанолог. исследования..., 2002] фронтальной зоной в океане будем считать такую зону, в которой пространственные градиенты основных термодинамических и химических характеристик значительно обострены по сравнению с их средним равномерным распределением. В свою очередь, фронтальный раздел – это поверхность внутри фронтальной зоны, совпадающая с поверхностью максимального градиента одной или нескольких характеристик (температуры, солености, плотности, скорости и т.д.). Тогда фронт представляет собой след пересечения фронтального раздела с любой выбранной поверхностью, в частности, со свободной поверхностью океана.

Гидрологические фронты, как правило, наиболее ярко выражены в поле температуры воды. Поэтому при выделении крупномасштабных фронтальных зон по температуре воды используется, например, численный критерий вида [Промыслово-океанолог. исследования..., 2002]:

$$G_{\text{фр}} > 10G_{\text{к}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{фр}}$  – горизонтальный градиент температуры во фронтальной зоне;  $G_{\text{к}}$  – средний климатический градиент температуры в рассматриваемой области.

Как известно, фронтальные зоны являются районами повышенной биологической продуктивности и в связи с этим служат областями активного рыбного промысла. В течение длительного периода (1979 – 1991 гг.) юго-восточная часть Тихого океана (ЮВТО) являлась одним из основных районов океанического рыболовства. Основу выловов здесь составляла перуанская ставрида, среднегодовая добыча которой в отдельные годы превышала 1 млн т (рис. 1). Район ЮВТО подразделяется на 3 промысловых подрайона, из которых для нас наибольший интерес представляет Южный подрайон (рис. 1), расположенный южнее  $20^{\circ}$  ю.ш. и восточнее  $105^{\circ}$  з.д., поскольку промысел здесь возможен круглогодично. После 1991 г. он был прекращен, однако в настоящее время в связи с истощением рыбных запасов во многих районах традиционного рыболовства внимание к ЮВТО резко возросло.

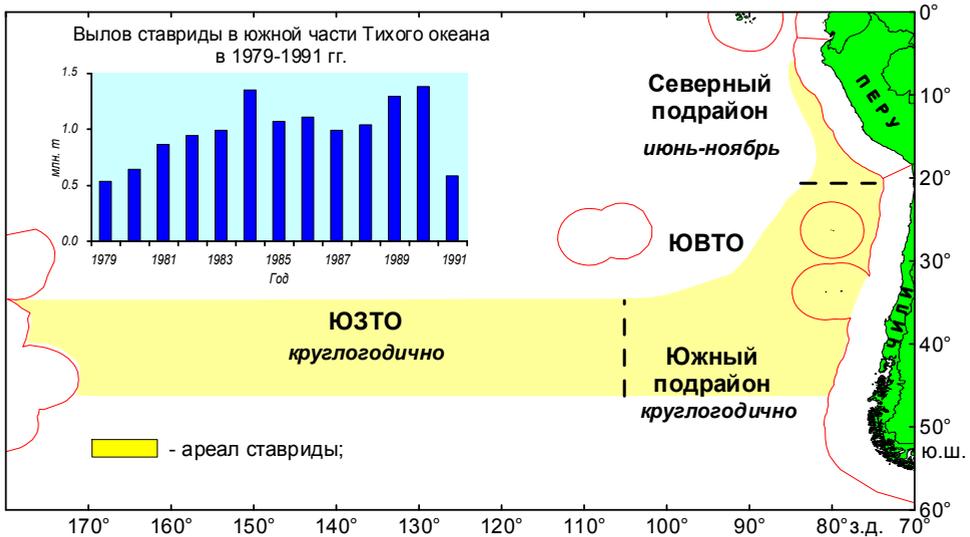


Рис. 1. Схема подрайонов, ареала и периодов промысла скоплений перуанской ставриды.

Основным океанологическим фактором, способствующим высокой промысловой продуктивности в Южном подрайоне, служит система западного переноса водных масс Южно-Тихоокеанским течением (ЮТОТ) и связанная с ним система гидрологических фронтов. Наиболее подробно система гидрологических фронтов в океанах Южного полушария обсуждается в работах [Orsi, 1995; Belkin, 1996; Шульговский, 2005]. Так, Белкин и Гордон [Belkin, 1996] выделили в районе ЮВТО северный субтропический фронт (NSTF) и южный субтропический фронт (SSTF). Первый вытянут по широте  $35^{\circ}$  ю.ш., а второй проходит примерно вдоль широты  $40^{\circ}$  ю.ш. (рис. 2). Именно в этой широтной полосе

проходит стрезень ЮТОТ [Лебедев, 2004]. При этом воды ЮТОТ деформируются с севера струями более соленых и теплых субтропических, а с юга – менее теплых и соленых субантарктических вод.

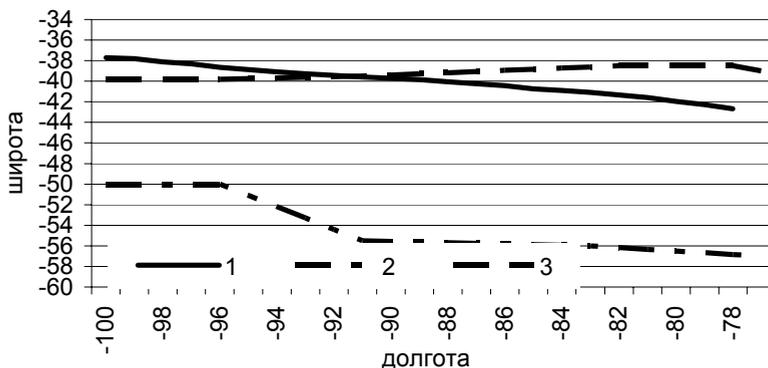


Рис. 2. Пространственное расположение гидрологических фронтов в районе ЮВТО по данным разных авторов:  
1 – настоящая работа; 2 – SAF [Малинин, 2004]; 3 – SSTF [Гинзбург, 2002]

Отметим, что в работе [Шульговский, 2005] данный фронт назван субантарктическим, северная граница которого в зависимости от сезона пульсирует между 33 и 37° ю.ш., а южная – от 40 до 47° ю.ш. Достаточно очевидно, что это ошибка, ибо субантарктический фронт должен разделять воды антарктические и субантарктические, которых на этих широтах просто нет. В соответствии с работами [Orsi, 1995; Степанов, 1983] субантарктический фронт (SAF) проходит значительно южнее: примерно вдоль 55° ю.ш.

Субтропический фронт имеет весьма сложную динамическую структуру. Здесь вследствие взаимодействия разных водных потоков создается сложная динамическая система локальных фронтов, меандров и с противоположным по знаку вращением вихрей, сопряженных с участками подъема и опускания океанических вод. При этом значительное вертикальное перемешивание и формирование в циклонических вихрях и меандрах зон апвеллинга создают благоприятные условия для формирования зон высокой биопродуктивности и, следовательно, могут оказывать существенное влияние на океанический промысел.

Основная цель данной работы заключалась в исследовании пространственно-временной изменчивости характеристик южного субтропического фронта (ЮСФ) по данным среднемесячной температуры поверхности океана (ТПО) за период с января 1982 по декабрь 2003 г. для пространственной области, ограниченной 99,5° и 77,5° з.д. и 20,5° и 49,5° ю.ш. Всего в указанный район вошло 84 одноградусных квадратов. Эти данные заимствованы из глобального архива

Reynolds Sea Surface Temperatures, содержащего информацию о ТПО с ноября 1981 г. по настоящее время для всего Мирового океана, полученные с судов и буев, а также спутниковые данные с 1990 г. Они верифицированы и интерполированы в узлы одноградусной сетки [Reynolds, 1994]. Информация предоставляется National Oceanographic Data Centre (NODC) Climatic Diagnostics Center (CDC), Boulder, United States.

Поскольку гидрологические фронты, как указывалось выше, наиболее ярко выражены в поле температуры воды, то для расчета градиента ТПО может быть использована следующая формула [Девин, 2000; Гинзбург, 2002; Малинин, 2004]:

$$\Delta T/\Delta L = [(\Delta T/\Delta X)^2 + (\Delta T/\Delta Y)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $X, Y, L$  – расстояния в зональном, меридиональном и трансфронтальном направлениях;  $\Delta T$  – составляющая градиента температуры.

Таким образом, фронтальный градиент независим от ориентации фронта [Федоров, 1983; Саруханян, 1986]. Для рассматриваемой акватории с шагом  $1^\circ$  по широте и  $2^\circ$  по долготе рассчитывалось поле градиентов температуры. За положение фронта принималась точка с максимальным градиентом температуры на каждом меридиане рассматриваемой акватории ( $n = 23$ ). В результате расчетов получены поля среднемесячных оценок интенсивности фронта ( $I, ^\circ\text{C}/\text{км}$ ) и его пространственного положения за период с 1982 по 2003 г.

Среднегодовое положение фронта на каждом меридиане, полученное осреднением его среднемесячных значений за весь период наблюдений, приведено на рис. 3. Кроме того, для каждого меридиана были рассчитаны нижний  $x_{0,25}$  и верхний  $x_{0,75}$  квантили, положение которых также нанесено на этом рисунке. Таким образом, вертикальные линии означают интерквантильное расстояние  $Q = x_{0,75} - x_{0,25}$ , которое характеризует степень рассеяния исходного ряда.

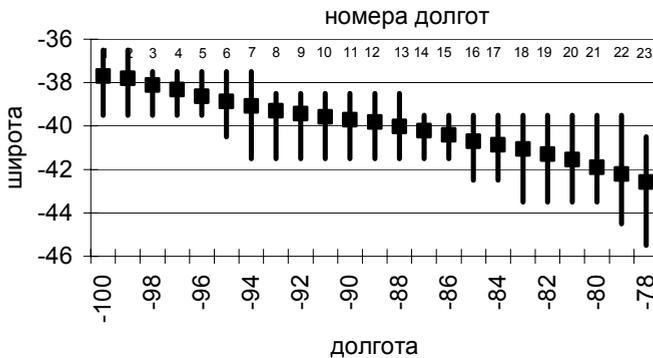


Рис. 3. Среднегодовое положение и квантильный анализ южного субтропического фронта (ЮСФ).

Отметим, что при нормальном распределении исходных данных  $Q = 1,34\sigma$ . Из рисунка видно, что фронт вытянут в юго-восточном направлении. Его крайнее северное положение ( $\varphi = 37,7^\circ$  ю.ш.) отмечается на долготе  $99,5^\circ$  з.д., а крайнее южное положение ( $\varphi = 42,6^\circ$  ю.ш.) – на долготе  $77,5^\circ$  з.д. В общем его климатическое положение достаточно неплохо согласуется с положением SSTF по данным [Belkin, 1996] (рис. 2), однако ЮСФ в отличие от SSTF не вытянут вдоль широты  $40^\circ$ , а имеет наклон к юго-востоку.

Межгодовая изменчивость южного субтропического фронта (ЮСФ) различна на разных меридианах. При этом она максимальна на восточном участке фронта, где интерквантильное расстояние достигает  $5^\circ$ . Минимальные значения  $Q$  отмечаются на некоторых меридианах центральной и западной частей фронта, где  $Q = 2^\circ$ .

Рассмотрим теперь особенности сезонного хода гидрологического фронта. Предварительно была выполнена классификация положения и интенсивности фронта, т.е. проведено разбиение этих характеристик на квазиоднородные сезоны года. С этой целью использовался метод Уорда иерархической классификации, а в качестве меры близости – эвклидова метрика. Исходная матрица имела размер  $12 \times 23$ , где первая цифра означает число месяцев, а вторая – число долгот. Естественно, среднемесячные значения интенсивности и положения предварительно осреднялись за многолетний период.

Анализ дендрограмм (рис. 4) показал, что обе исходные совокупности четко делятся на два класса, которые представляют теплый и холодный периоды года. Но если теплый период является весьма однородным и дальнейшее разбиение его уже не имеет смысла, то холодный период в свою очередь можно разделить на зимний сезон и переходные сезоны (табл. 1). На этом сходство классификаций заканчивается. Продолжительность отдельных квазиоднородных сезонов в обоих случаях отличаются друг от друга. Особенно заметными они оказываются для весны, которая для интенсивности ЮСФ отмечается только в ноябре, в то время как для положения ЮСФ она наблюдается в течение трех месяцев (октябрь–декабрь). Для других сезонов года отличия уже не столь существенны.

*Таблица 1*

**Иерархическая структура разбиения годового хода интенсивности и положения южного субтропического фронта (ЮСФ) на квазиоднородные сезоны**

Характеристики ЮСФ	Теплый период, мес.		Холодный период, мес.	
	лето	осень	зима	весна
Интенсивность	II, I, II, III, IV	V, VI	VII, VIII, IX, X	XI
Положение	I, II, III, IV	V	VI, VII, VIII, IX	X, XI, XII

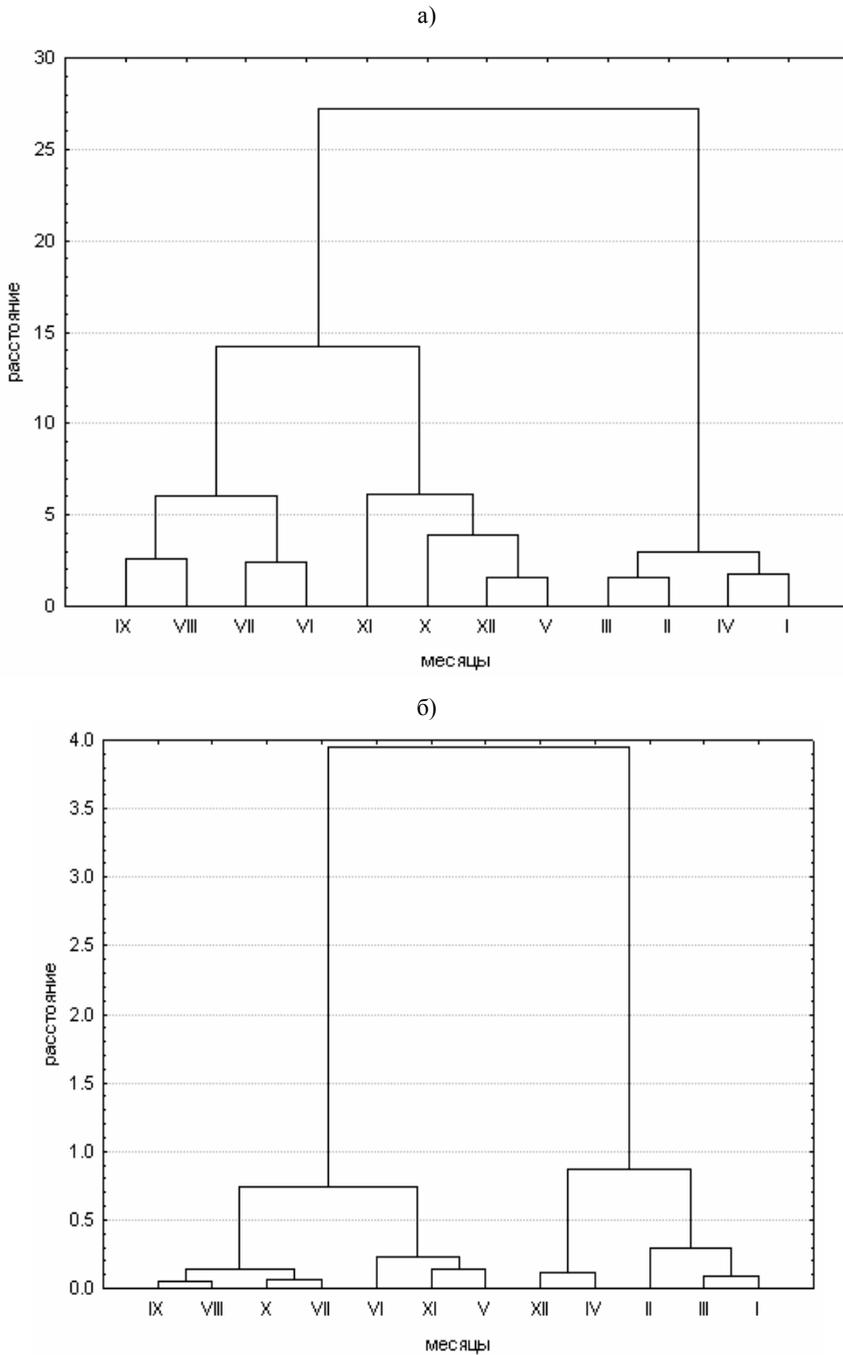


Рис. 4. Дендрограммы сезонного хода положения (а) и интенсивности (б) южного субтропического фронта (ЮСФ).

На рис. 5 приведены особенности пространственного распределения интенсивности и положения ЮСФ для выделенных однородных сезонов года. Как и следовало ожидать, зимой ЮСФ занимает крайнее северное положение, а летом – крайнее южное.

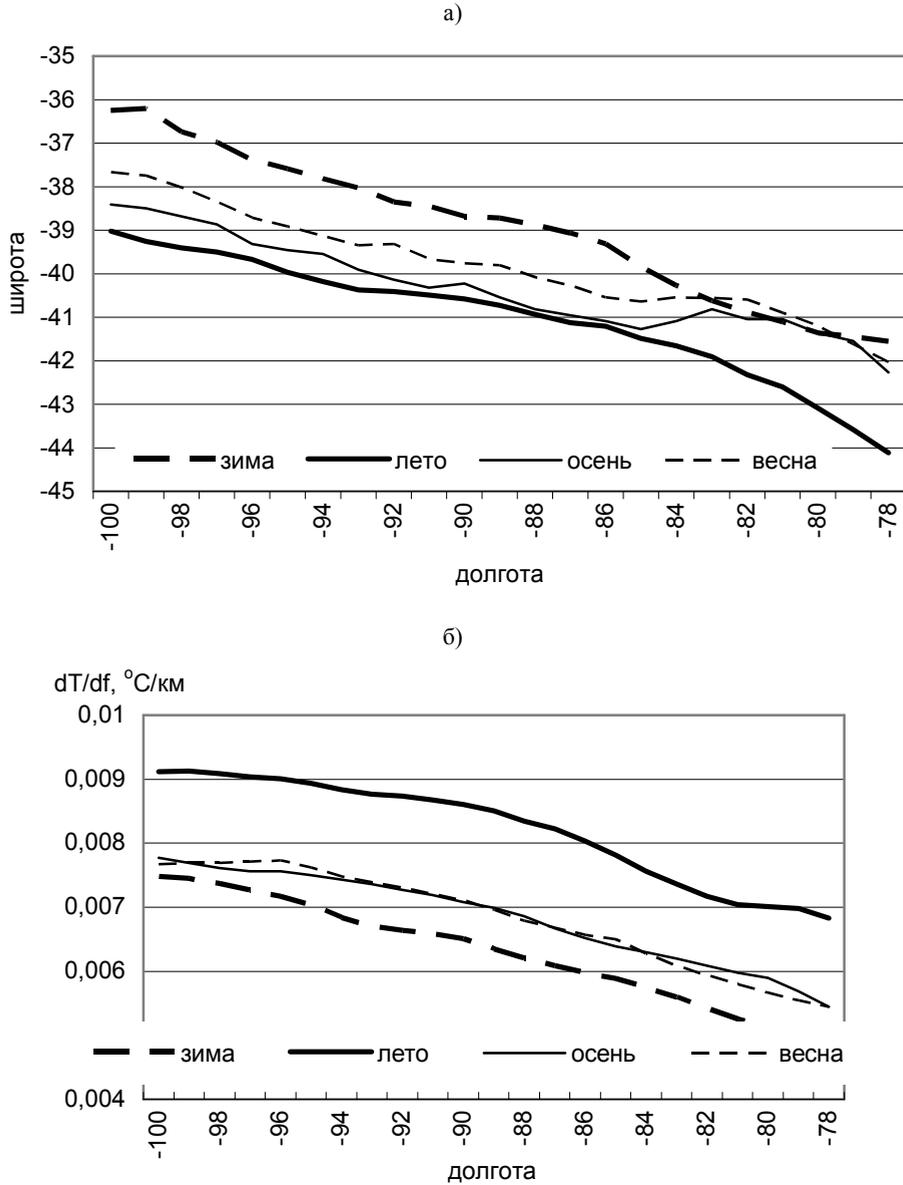


Рис. 5. Особенности среднееголетнего распределения положения (а) и интенсивности (б) южного субтропического фронта для различных сезонов года.

Для переходных сезонов характерно промежуточное положение фронта. Во все сезоны года фронт имеет крайнее северное положение на долготе  $99,5^\circ$  з.д., где зимой он находится на широте  $36^\circ$  ю.ш. и по направлению к востоку фронт смещается к югу. Крайнее южное положение он занимает на долготе  $77,5^\circ$  з.д., где летом достигает  $44^\circ$  ю.ш. Размах пространственного смещения зимой и летом составляет 5 градусов широты. Заметим, что в отличие от работы [Belkin, 1996] ЮСФ не вытянут вдоль широты  $40^\circ$ , а имеет наклон к юго-востоку.

Что касается интенсивности фронта, то его максимальная интенсивность отмечается летом, а минимальная – зимой. При этом ее абсолютный максимум отмечается на крайнем западе района, а минимум – на крайнем востоке. В межгодовых колебаниях характеристик фронта каких-либо закономерностей не выявлено, они в основном носят явно выраженный непериодический характер.

Итак, на основе данных о ТПО удастся выявить и проследить сезонную структуру ЮСФ, причем по своей интенсивности он значительно сильнее северного субтропического фронта (ССФ), выделение (идентификация) которого значительно сложнее. Вследствие этого можно достаточно уверенно говорить, что с точки зрения рыбного промысла именно зона ЮСФ представляет наибольший интерес.

Для оценки межгодовой изменчивости интенсивности и положения ЮСФ оценивалась корреляционная матрица для всех долгот. В результате оказалось, что по положению фронта наиболее коррелируемой со всеми остальными является долгота  $84,5^\circ$  з.д., а по его интенсивности – долгота  $92,5^\circ$  з.д. Межгодовая изменчивость этих характеристик приведена на рис. 6. Нетрудно видеть, что размах межгодовых смещений положения ЮСФ довольно значителен и составляет  $3,5^\circ$ . Крайнее северное положение фронта отмечается на широте  $38,5^\circ$  ю.ш., а крайнее южное положение – на широте  $42^\circ$  ю.ш. При этом четко проявляется нелинейный тренд, на долю которого приходится около 20 % дисперсии. До начала 90-х годов XX в. фронт смещался на юг, а затем начал двигаться к северу. Есть основания полагать, что в ближайшие годы характер тренда не должен измениться, т.е. он должен занимать более северное положение по сравнению со среднемноголетним.

Интенсивность фронта испытывает непериодические межгодовые колебания, на фоне которых отмечается положительный линейный тренд, описывающий 20 % дисперсии исходных данных. Если в ближайшие годы характер тренда не изменится, что, вообще говоря, маловероятно, то это является благоприятным фактором для повышения биологической продуктивности и, следовательно, для развития рыбного промысла.

Первичные статистические характеристики межгодовых колебаний положения и интенсивности фронта, осредненные для отдельных сезонов года (в соответствии с табл. 1), приводятся в таблицах 2 и 3.

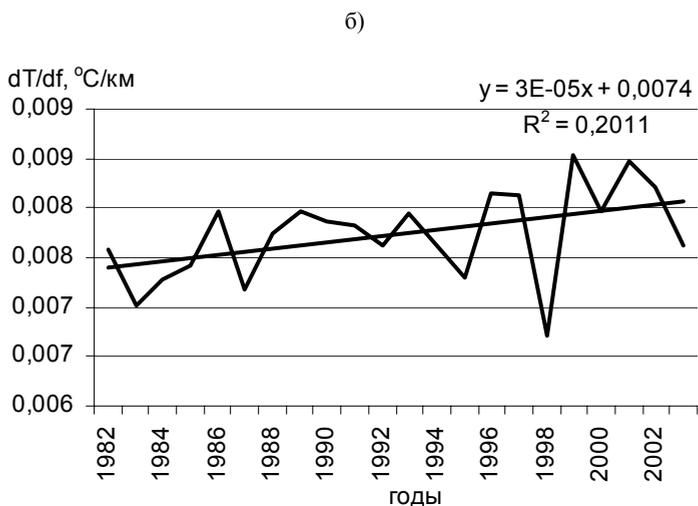
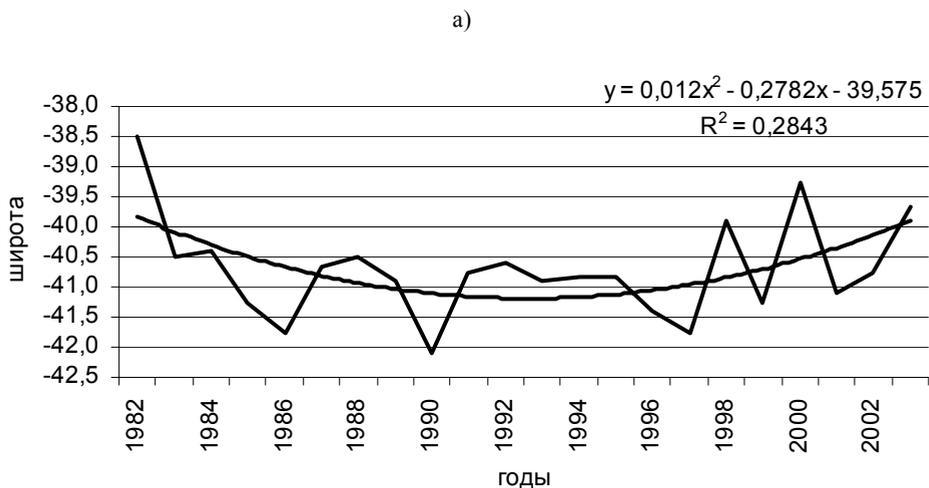


Рис. 6. Межгодовая изменчивость и тренды положения (а) и интенсивности (б) южного субтропического фронта.

Таблица 2

**Статистические характеристики межгодовых колебаний положения ЮСФ, осредненных для отдельных сезонов года в градусах широты**

Сезон	Среднее арифметическое	Стандартное отклонение	Крайнее северное положение	Крайнее южное положение	Размах колебаний
Зима	38,9	2,5	33,0	45,3	12,3
Весна	39,8	2,1	34,5	49,5	15,0
Лето	41,0	1,9	37,0	48,0	11,0
Осень	40,3	2,7	34,5	48,5	14,0
Год	40,0	1,6	35,6	45,0	9,4

Таблица 3

**Статистические характеристики межгодовых колебаний интенсивности ЮСФ, усредненных для отдельных сезонов года в  $10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/км}$**

Сезон	Среднее арифметическое	Стандартное отклонение	Максимальная интенсивность	Минимальная интенсивность	Размах колебаний
Зима	6,4	1,0	9,0	4,0	5,0
Весна	6,9	1,1	10,1	4,1	6,0
Лето	8,3	1,1	11,3	5,9	5,4
Осень	6,9	1,0	9,8	4,5	5,3
Год	7,3	0,9	9,7	5,4	4,3

Как следует из этих таблиц, зимой наблюдается максимальная пространственная изменчивость фронта и одновременно наименьшая изменчивость его интенсивности, а летом, наоборот, отмечается минимальная пространственная изменчивость фронта и наибольшая изменчивость его интенсивности. Размах пространственных смещений фронта мало меняется от сезона к сезону, а вот размах колебаний интенсивности фронта резко увеличивается от весны к лету. При этом изменчивость среднегодовых характеристик фронта, особенно его положения, существенно меньше, чем для квазиоднородных сезонов года.

### **Литература**

1. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Франкиньюль М., Делль Б. Исследование фронтов южной части Индийского океана с помощью спутниковых температурных данных // Исследование Земли из космоса. – 2002. – № 5. – С. 39–49.
2. Девицин В.В., Ковалев А.Д., Ванюшин Г.П. Проявление Субантарктического фронта в поле поверхностной температуры океана в Юго-Западной Атлантике // Исследование Земли из космоса. – 2000. – № 2. – С. 8–15.
3. Лебедев С.А., Сирота А.М. Промыслово-океанологические исследования юго-восточной части Тихого океана с помощью данных спутниковой альтиметрии. // Вопросы рыболовства. – 2004. – Т. 5, № 19, с. 482–488.
4. Малинин В.Н., Шульговский К.Е. Пространственно-временная изменчивость Южного фронта АЦТ в районе Южных Оркнейских островов. // Вопросы промысловой океанологии. Вып.1. М.: изд. ВНИРО, 2004, с. 194–204.
5. Промыслово-океанологические исследования в Атлантическом океане и южной части Тихого океана. Том 2 / Под ред. В.Н. Яковлева. – Калининград: изд. АтлантНИРО, 2002. – 246 с.
6. Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Водные массы и циркуляция Южного океана. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 288 с.
7. Степанов В.Н. Океаносфера. – М.: Мысль, 1983. – 270 с.
8. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 296 с.
9. Шульговский К.Е. Крупномасштабная изменчивость океанологических условий в западной части Атлантического сектора Антарктики и ее влияние на распределение криля. – Калининград: изд-во АтлантНИРО, 2005. – 160 с.
10. Belkin I.M., Gordon A.L. Southern-ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania // J. Geoph. Res., 1996, vol. 101 (C2), p. 03675–03696.
11. Orsi, A.H., Whitworth III. T., Nowlin Jr.W.D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep-Sea Res., 1995, part 1, 42, p. 641–673.
12. Reynolds R.W., Smith T.M. Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation. J. Clim., 7, 1994, p. 929–948.