

УДК 551.46 (265.1)

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ФРОНТОВ ПЕРУАНСКО-ЧИЛИЙСКОГО СЕКТОРА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**Ю.В. Артамонов<sup>1</sup>, доктор геогр. наук, Е.А. Скрипалева<sup>1</sup>, канд. геогр. наук<sup>1</sup>*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь,  
e-mail: zagorod@ibss.iuf.net*

На основе спутниковых данных о температуре поверхности океана (ТПО) за 1985–2002 гг. исследована сезонная и межгодовая изменчивость крупномасштабных фронтов в Перуанско-Чилийском секторе Тихого океана. Показано, что в климатическом сезонном цикле в экваториальной зоне отмечается усиление Фронта Северной ветви Южного пассатного течения во вторую половину года. Фронты тропической и умеренной зон (Южный тропический, Южная ветвь Южного субэкваториального фронта, Южный субтропический и Субантарктический фронты) обостряются преимущественно в первое полугодие. Выявлены существенные межгодовые вариации характеристик фронтов. В периоды Эль-Ниньо отмечаются аномальные изменения интенсивности фронтов. Широтное положение фронтов может изменяться от года к году на 300–400 км, температурный диапазон на 2–3 градуса, а интенсивность на 0,6–0,8°C/54 км. Установлено, что корреляция между изменчивостью характеристик фронтов, аномалиями площадей теплых вод в экваториальной области Тихого океана и индексом SOI может достигать 0,7–0,8.

**Мінливість гідрологічних фронтів Перуансько-Чилійського сектора за супутниковими даними.** Ю.В. Артамонов, О.О. Скрипальова

На основі супутникових даних про температуру поверхні океану (ТПО) за 1985–2002 рр. досліджено сезонну та міжрічну мінливість великомасштабних фронтів у Перуансько-Чилійському секторі Тихого океану. Показано, що в кліматичному сезонному циклі в екваторіальній зоні відзначається підсилення Фронту Північної гілки Південної пасатної течії в другу половину року. Фронти тропічної і помірної зон (Південний тропічний, Південна гілка Південного субекваторіального фронту, Південний субтропічний і Субантарктичний фронти) загострюються, переважно, у перше півріччя. Виявлено істотні міжрічні варіації характеристик фронтів. У періоди Ель-Ніньо відзначаються аномальні зміни інтенсивності фронтів. Широтне положення фронтів може змінюватися від року до року на 300-400 км, температурний діапазон на 2-3 градуси, а інтенсивність на 0.6-0.8°C/54 км. Встановлено, що кореляція між мінливістю характеристик фронтів, аномаліями площ теплих вод в екваторіальній області Тихого океану й індексом SOI може становити 0.7-0.8.

**The variability of the hydrological fronts in the Peru-Chilean region using sst satellite data.**

Yu.V. Artamonov, E.A.

Skrripaleva

The seasonal and interannual variability of the large-scale fronts in the Peru-Chilean region of Pacific Ocean are investigated, based on SST satellite observations during 1985-2002. Shown, that in climatic seasonal cycle in the equatorial zone Front of North branch of South Equatorial Current is intensifying in second half-year. The fronts of tropical and moderate zones (South Tropical, South branch of South Subequatorial front, South Subtropical and Subantarctic fronts) are intensified, predominantly, in first half-year. The essential interannual variations of front's characteristics have discovered. The anomalous changes of front's intensity to be observed during El Niño events. The latitude position of fronts can to change from year to year by 300-400 km, front's temperature range by 2-3 degrees and front's intensity by 0.6-0.8°C/54 km. It is found, that correlation between interannual anomalies of front's characteristics, anomalies of the areas of Pacific warm equatorial water and index SOI can to equal 0.7-0.8.

**Введение**

Исследование фронтальной структуры вод в Перуанско-Чилийском секторе Тихого океана, наряду с прикладной значимостью, обусловленной наличием районов интенсивного промысла, имеет важное, фундаментальное значение. В силу близости экваториальной области Тихого океана, где процессы взаимодействия океана и атмосферы на межгодовом масштабе в несколько лет наиболее выражены (события Эль-Ниньо, Ла-Нинья), здесь можно ожидать наиболее выраженной реакции океанических фронтов на эти колебания. В настоящее время в литературе широко обсуждаются особенности проявления межгодовых вариаций в различных гидрометеорологических полях – атмосферном давлении, температуре воздуха и воды, уровне океана. Показано, что значительная часть межгодового сигнала в юго-восточной части Тихого океана является результатом распространения климатических волн Россби, которые вызывают положительные или отрицательные аномалии температуры поверхности или уровня океана в периоды Эль-Ниньо или Ла-Нинья [1]. Вместе с тем ограниченность гидрологических наблюдений не позволяет исследовать межгодовой сигнал в изменчивости океанических фронтов, хотя понимание особенностей их реакции на события Эль-Ниньо представляется чрезвычайно важным с точки зрения промысловых прогнозов. Появление спутниковых данных с хорошим пространственно-временным разрешением позволяет существенно заполнить этот пробел.

Цель данной работы – исследовать сезонную и межгодовую изменчивость крупномасштабных фронтов в тропических, субтропических и умеренных широтах юго-восточной части Тихого океана и выявить особенности этой изменчивости в периоды событий Эль-Ниньо на основе спутниковых данных о температуре поверхности океана (ТПО) за 1985–2002 гг.

## Материалы и методика

В данной работе исследовались фронты открытой части океана вдоль меридиана 84° з.д., где они имеют преобладающую зональную протяженность, поэтому для их анализа были рассчитаны поля меридиональных градиентов (МГТ) температуры поверхности океана. Расчеты проводились по данным массива спутниковых измерений ТПО за период с 1985 по 2002 гг. со среднемесячным осреднением в узлах сетки 54×54 км из архива AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA. Положение фронтов определялось по экстремумам МГТ на их меридиональных профилях. Названия основных фронтов были даны в соответствии с установившейся в последние годы номенклатурой [2–5]. Идентификация фронтов проводилась по диапазону температуры, соответствующему данному экстремуму, широтному положению экстремума и знаку меридионального градиента. Отрицательное значение МГТ во фронте показывает уменьшение значений температуры в направлении с севера на юг. Величины экстремумов МГТ в °C/54 км далее по тексту приводятся в скобках.

Для анализа климатического сезонного цикла характеристик фронтов поля МГТ осреднялись по месяцам за 18 лет. Предполагалось, что в результате использования среднемесячных климатических значений МГТ мезомасштабные шумы и синоптическая изменчивость отфильтровываются и практически не проявляются в анализируемых полях. Для подавления остаточного шума меридиональные профили МГТ были сглажены трехточечным фильтром ( $0.25\text{МГТ}_{i-1} + 0.5\text{МГТ}_i + 0.25\text{МГТ}_{i+1}$ ).

Для оценки межгодовой изменчивости характеристик фронтов меридиональные градиенты ТПО были рассчитаны для каждого месяца каждого года (всего 216 месяцев) вдоль меридиана 84° з.д. Затем для 216 месяцев определялись характеристики фронтов – величина экстремума МГТ, средняя температура и значение широты, на которой наблюдался данный фронт. Далее рассчитывались среднегодовые и среднемесячные аномалии этих характеристик относительно среднего за 216 месяцев.

В работе выполнена оценка связей между вариациями характеристик фронтов, индексом атмосферной циркуляции SOI (Southern Oscillation Index) и аномалиями площадей теплых тропических вод в Тихом океане. Между двумя последними параметрами выявлена достаточно высокая количественная связь. В качестве показателя событий Эль-Ниньо анализировались изменения аномалий площадей теплых вод с температурой 28–33°C (рис. 1), для которых характерно максимальное стандартное отклонение межгодовых вариаций (см. таблицу).

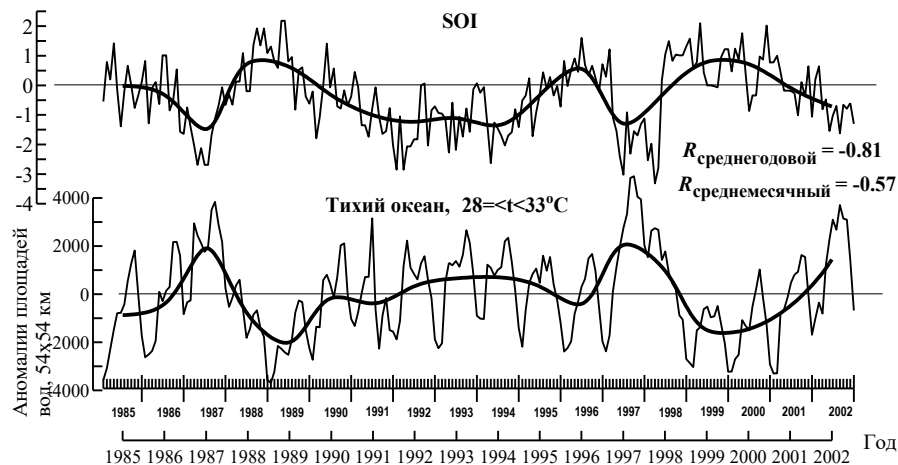


Рис. 1. Межгодовой ход индекса SOI и аномалий площадей теплых вод с температурой 28–33°C в тропической зоне Тихого океана. Жирные линии – среднегодовые значения. R – значение коэффициента корреляции между SOI и аномалиями площадей вод.

Для аномалий площадей этих вод, индексов SOI и аномалий характеристик фронтов (величина МГТ, широтное положение и температура на оси фронта) рассчитывались кросскорреляционные функции с 95%-ным уровнем значимости.

Таблица

Среднегодовое и среднемесячное среднеквадратическое отклонение (СКО) аномалий площадей теплых вод с различными температурными диапазонами

Температурный диапазон аномалий площадей теплых вод, °C	Среднегодовое СКО, 54×54 км	Среднемесячное СКО, 54×54 км
25–33	514,6	1258,3
26–33	706,0	1366,6
27–33	914,5	1700,0
28–33	1119,4	1821,3
29–33	819,7	1231,8
30–33	397,0	690,2

## Анализ результатов. Климатический сезонный цикл фронтов

Анализ климатической внутригодовой изменчивости меридиональных градиентов температуры показал, что основные крупномасштабные фронтальные разделы хорошо прослеживаются в течение всего года (рис. 2). На северной границе рассматриваемого региона между 3° с.ш. и 1° ю.ш. выделяется Фронт Северной ветви Южного пассатного течения (ФСВ ЮПТ). Он достаточно интенсивен в течение года и при этом имеет мощный годовой сигнал с максимумом интенсивности (-0.9 в сентябре (рис. 3). В это время он

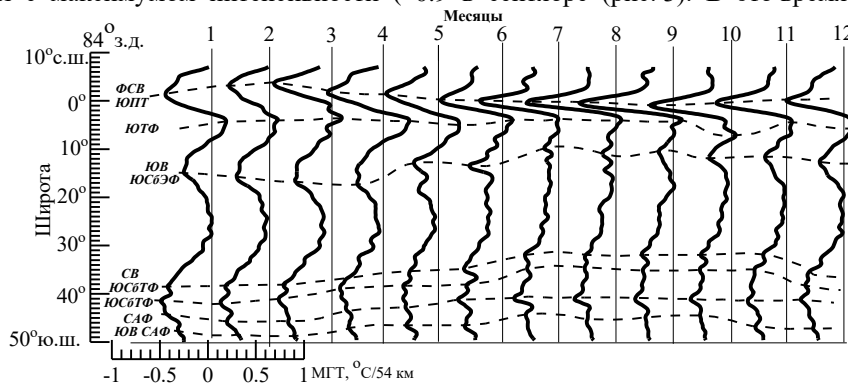


Рис. 2. Внутригодовая изменчивость меридиональных градиентов температуры (МГТ) и положение фронтов вдоль 84° з.д.

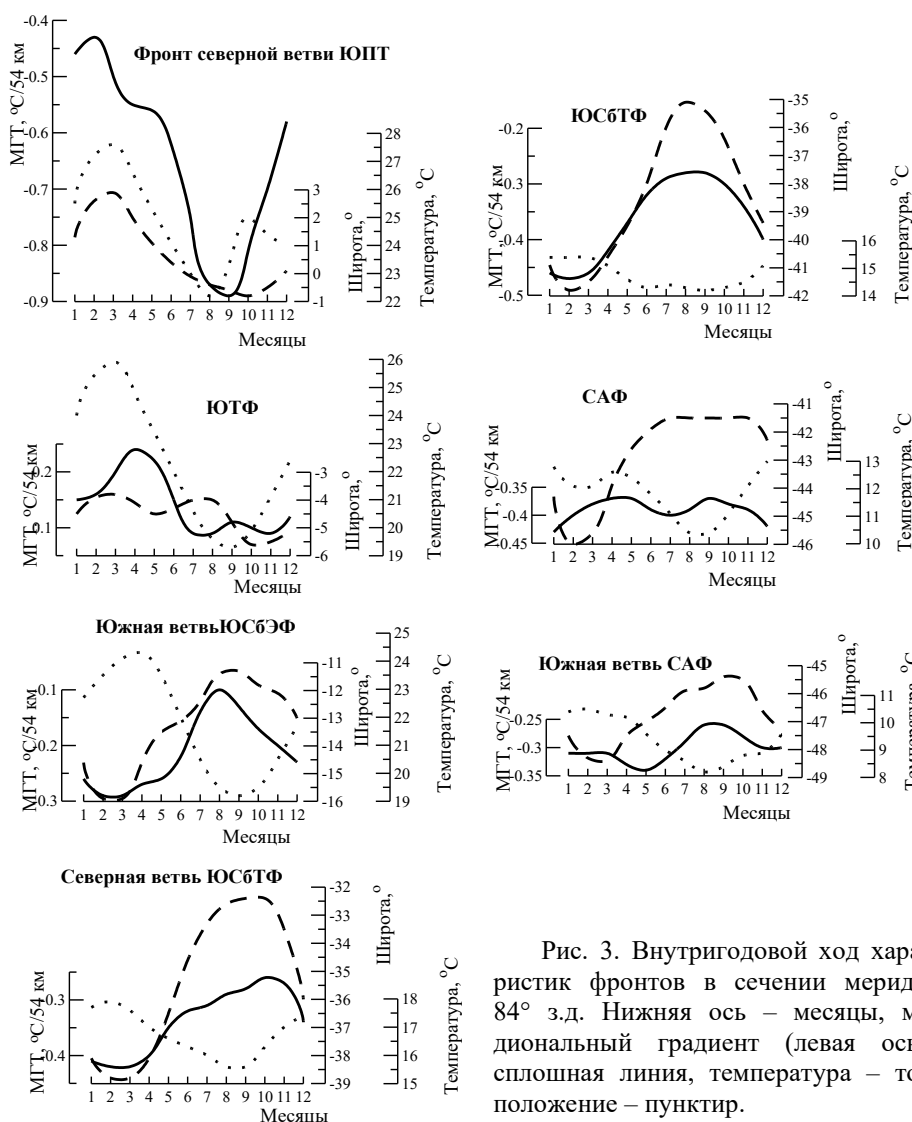


Рис. 3. Внутригодовой ход характеристик фронтов в сечении меридиана 84° з.д. Нижняя ось – месяцы, меридиональный градиент (левая ось) – сплошная линия, температура – точки, положение – пунктир.

находится в крайнем южном положении у 1° ю.ш. Максимальное смещение к северу (до 3° с.ш.) наблюдается в марте, когда фронт наиболее ослаблен. Температурный диапазон изменяется в течение года от 22°C зимой до 27,5°C летом. Внутригодовые колебания интенсивности фронта – до 0.5°C/54 км.

Другой, менее интенсивный, но достаточно важный с точки зрения крупномасштабной структуры вод фронт, ограничивающий с севера Южный субтропический антициклонический круговорот (ЮСАК), имеет положительные градиенты температуры и располагается южнее экватора между 3° и 6° ю.ш. Этот фронт обычно именуют Южным тропическим фронтом (ЮТФ) [3]. Он характеризуется преобладающей годовой

составляющей в сезонных вариациях интенсивности с основным максимумом (0,25) в апреле. В интенсивности фронта можно выделить и полугодовую составляющую, которая характеризуется появлением второго, более слабого максимума (0,13) в сентябре. Сезонные изменения интенсивности фронта невелики и составляют  $0,15^{\circ}\text{C}/54$  км. Внутригодовые смещения положения фронта достигают 3 градусов по широте. ЮТФ максимально смещен на юг ( $6^{\circ}$  ю.ш.) в октябре, на север ( $3,5^{\circ}$ ) – в марте. Температура в течение года изменяется от  $19^{\circ}\text{C}$  зимой до  $26^{\circ}\text{C}$  летом. Наличие системы Южных экваториальных противотечений во всех трех океанах приводит к формированию Южных субэкваториальных фронтов. Как показано в [6], в Атлантике по спутниковым данным на поверхности лучше проявляется Южная ветвь Южного субэкваториального фронта (ЮВ ЮСБЭФ). Аналогичная ситуация наблюдается и в Тихом океане. Здесь Южная ветвь Южного субэкваториального фронта наиболее интенсивна ( $-0,30$ ) в феврале-марте, в период максимального смещения на юг к  $16^{\circ}$  ю.ш., и наиболее ослаблена в августе, в крайнем северном положении у  $11^{\circ}$  ю.ш. Внутригодовые изменения интенсивности фронта не превышают  $0,2^{\circ}\text{C}/54$  км. Температурный диапазон составляет  $19-25^{\circ}\text{C}$ .

Система фронтов к югу от  $30^{\circ}$  ю.ш. образует южную границу ЮСАК. Так же, как и в Атлантическом океане [6], здесь наиболее четко выделяются две ветви Южного субтропического фронта (ЮСБТФ). Северная ветвь Южного субтропического фронта достигает максимальной интенсивности ( $-0,42$ ) в феврале-марте. При этом она находится в крайнем южном положении ( $39^{\circ}$  ю.ш.). Фронт максимально смещается к северу ( $32,5^{\circ}$  ю.ш.) и наиболее ослаблен в октябре. Сезонные колебания интенсивности составляют  $0,20^{\circ}\text{C}/54$  км. Температурный диапазон –  $15-18^{\circ}\text{C}$ .

Собственно Южный субтропический фронт, также как и его Северная ветвь, наиболее обострен ( $-0,47$ ) в феврале-марте, в период максимального смещения к югу ( $42^{\circ}$  ю.ш.), и ослабевает в крайнем северном положении ( $35^{\circ}$  ю.ш.) в августе. Внутригодовые вариации интенсивности фронта –  $0,20^{\circ}\text{C}/54$  км. Изменение температуры в течение года невелико – от  $14^{\circ}\text{C}$  зимой до  $16^{\circ}\text{C}$  летом.

К югу от ЮСБТФ выделены две ветви Субантарктического фронта (САФ). В сезонной изменчивости интенсивности САФ присутствует полугодовая составляющая. Первый основной максимум ( $-0,44$ ) отмечается в декабре-январе, второй ( $-0,40$ ) – в июле. Внутригодовые колебания интенсивности фронта не превышают  $0,1^{\circ}\text{C}/54$  км. Фронт находится в крайнем южном положении у  $46^{\circ}$  ю.ш. в феврале и максимально смещен к северу ( $41,5^{\circ}$  ю.ш.) с июля по ноябрь. Температурный диапазон САФ составляет  $10-13^{\circ}\text{C}$ .

Южная ветвь Субантарктического фронта максимально усиливается ( $-0,35$ ) в мае. Сезонные изменения ее интенсивности не превышают  $0,1^{\circ}\text{C}/54$  км. Фронт занимает крайнее южное положение ( $48,5^{\circ}$  ю.ш.) в феврале-марте, крайнее северное ( $45,5^{\circ}$  ю.ш.) – в октябре. Температура в течение года изменяется слабо – от  $8^{\circ}\text{C}$  зимой до  $11^{\circ}\text{C}$  летом.

Таким образом, проведенный анализ показал, что в климатическом сезонном цикле Фронт Северной ветви Южного пассатного течения, который располагается около экватора, обостряется во вторую половину года (сентябрь). Другие фронты, расположенные в южных тропиках и умеренных широтах, обостряются в основном в первое полугодие. Южный тропический фронт наиболее интенсивен в апреле. Южная ветвь Южного Субэкваториального фронта, Южный субтропический фронт и его Северная ветвь обостряются преимущественно в феврале-марте, т.е. летом Южного полушария. Субантарктический фронт максимально усиливается два раза в год – в декабре-январе и июле. Южная ветвь САФ наиболее интенсивна в мае.

### **Межгодовая изменчивость**

В работе рассматривается относительно короткий, с точки зрения анализа межгодовых вариаций, временной ряд спутниковых измерений ТПО. Тем не менее временные реализации аномалий теплых тропических вод показывают, что по крайней мере три известные события Эль-Ниньо (1986–1988, 1994–1995 и 1997–1998 гг.) [1] проявляются в аномалиях поверхностной температуры и оказывают заметное влияние на межгодовые вариации фронтов (рис. 1, 4). Межгодовая изменчивость фронтальной структуры проявляется в отдельные годы в формировании нескольких ветвей одного и того же фронта, широтное положение некоторых фронтов может изменяться от года к году на  $300-400$  км, температурный диапазон на  $2-3$  градуса, а интенсивность на  $0,6-0,8^{\circ}\text{C}/54$  км. На рисунке 4 приводится пример межгодовой изменчивости аномалий площадей теплых тропических вод и характеристик Южного тропического фронта, для которого обнаружена наиболее тесная связь с индексом SOI. Положительные аномалии площадей теплых тропических вод, обусловленные событиями Эль-Ниньо, сопровождаются положительными аномалиями температуры в ЮТФ, смещением фронта на север относительно среднего положения и отрицательными аномалиями

### Южный тропический фронт, 84° з.д.

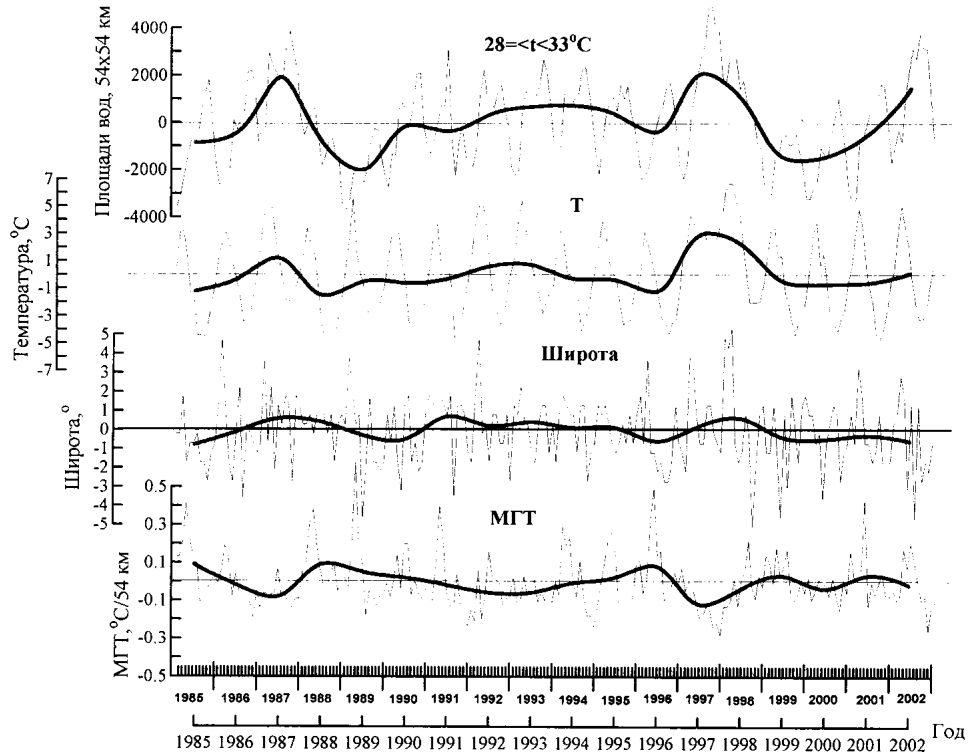


Рис. 4. Межгодовой ход аномалий площадей теплых тропических вод в Тихом океане и аномалий характеристик ЮТФ на 84° з.д. Жирные линии – среднегодовые аномалии вышеуказанных характеристик. Расчет кросскорреляционных функций с 95%-ным уровнем значимости показал высокие значения (0,6–0,7) коэффициентов корреляции между аномалиями теплых вод в экваториальной зоне Тихого океана (рис. 5а), индексом SOI (рис. 5б) и среднегодовыми характеристиками фронта. Для среднемесячных величин анализируемых характеристик также отмечается наличие значимой связи, их абсолютные значения значительно меньше, чем в случае среднегодового осреднения.

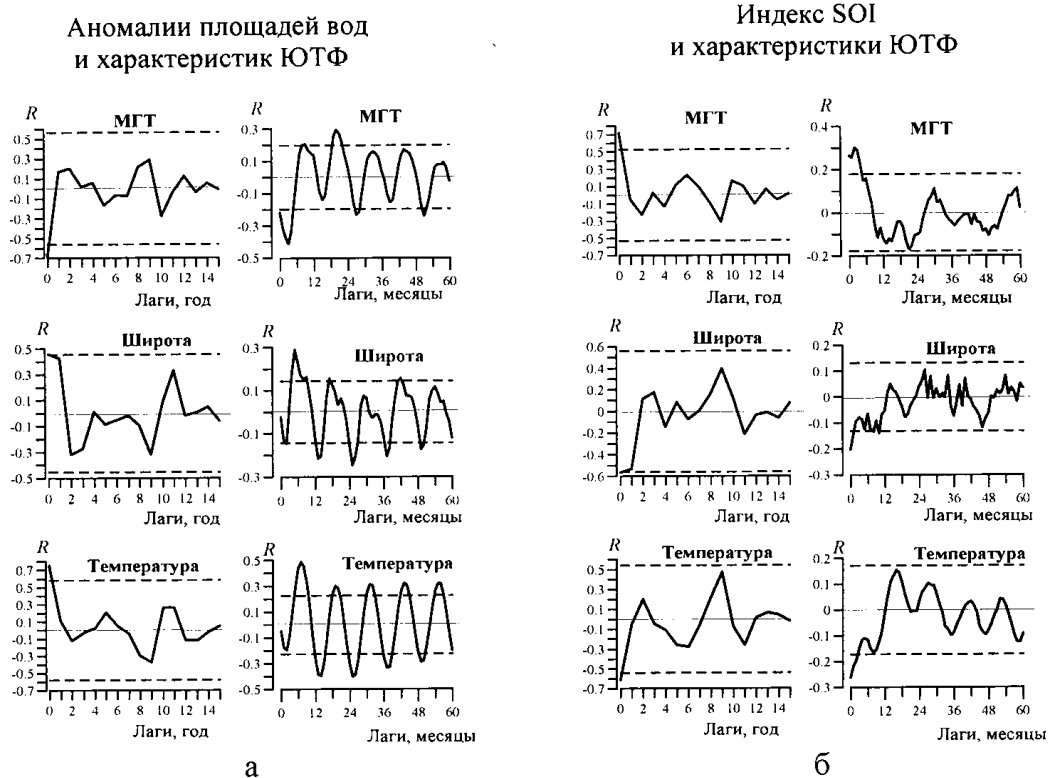


Рис. 5. Кросскорреляционные функции среднегодовых (слева) и среднемесячных (справа) аномалий площадей теплых тропических вод в Тихом океане (а), индексов SOI (б) и аномалий характеристик ЮТФ. Пунктирные линии – границы 95%-ного доверительного интервала.

Реакция характеристик других фронтов на события Эль-Ниньо не столь ярко выражена, как для Южного тропического фронта, и прослеживается не для всех параметров. Наиболее высокие коэффициенты корреляции (0,7–0,8) характерны для интенсивности и температуры Фронта Северной ветви Южного пассатного течения. По мере продвижения на юг эти связи постепенно ослабевают. Так, для Южной ветви Южного субэкваториального фронта и Южного субтропического фронта значения аналогичных коэффициентов корреляции уменьшаются до 0,5–0,6. Таким образом, по мере удаления фронтов от основного очага формирования межгодовых аномалий теплых вод, вызванных событиями Эль-Ниньо, реакция характеристик фронтов на эти события ослабевает.

## Выводы

Современные спутниковые данные существенно расширяют наши представления о структуре и изменчивости фронтальной системы юго-восточной части Тихого океана. Показано, что в климатическом сезонном цикле в экваториальной зоне отмечается усиление Фронта Северной ветви Южного пассатного течения во вторую половину года. Фронты тропической и умеренной зон (Южный тропический, Южная ветвь Южного субэкваториального фронта, Южный субтропический и Субантарктический фронты) обостряются преимущественно в первое полугодие. Выявленные закономерности климатического сезонного цикла фронтов в Тихом океане в целом повторяют особенности сезонной изменчивости фронтов в Атлантическом океане на этих широтах, что может свидетельствовать о подобию механизмов, формирующих эту изменчивость. Впервые для юго-восточной части Тихого океана на основе спутниковых данных выявлены особенности межгодовой изменчивости характеристик фронтов. Показано, что в периоды Эль-Ниньо отмечается аномальное изменение интенсивности фронтов (до 0,8°C/54 км), их широтного положения (300–400 км) и температуры (2–3°C) на оси фронта. Наиболее тесные связи с событиями Эль-Ниньо наблюдаются для Фронта Северной ветви Южного пассатного течения и Южного тропического фронта. Для фронтов южной периферии Южного субтропического круговорота эта связь становится слабее.

## Литература

1. **Turner J.** Review the El Niño – Southern Oscillation and Antarctica // *Int. J. Climatology*. – 2004. – № 24. – С. 1–31.
2. **Peterson R.G.**, Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean // *Prog. Oceanogr.* – 1991. – 26. – P. 1–73.
3. **Артамонов Ю.В.**, Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Фронты Атлантического сектора Южного океана (обзор литературы) // Препринт. – МГИ НАН Украины, Севастополь. – 1999. – 68 с.
4. **Фронтальные** зоны юго-восточной части Тихого океана: (Биология, физика, химия). М.: Наука, 1984. 333 с.
5. **Белкин И.М.** Главные гидрологические особенности центральной части Южного Тихого океана. В сб. «Экосистемы Субантарктической зоны Тихого океана». М.: Наука, 1988. – С. 21–28.
6. **Артамонов Ю.В.**, Скрипалева Е.А. Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // *Исследования Земли из космоса*. – 2005. – № 4. – С. 62–75.