

УДК 551.465

## СВЯЗЬ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОКЕАНИЧЕСКИХ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН С КРУПНОМАСШТАБНЫМ АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

© 2016 г. А. С. Казьмин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва,

e-mail: akazmin@ocean.ru

Поступила в редакцию 26.11.2014 г.

После доработки 16.03.2015 г.

Представлены результаты исследования связи долгопериодной изменчивости океанических фронтальных зон (ОФЗ) с крупномасштабным атмосферным ветровым воздействием на основе анализа глобальных спутниковых измерений температуры поверхности океана (ТПО) и данных о поле ветра из реанализа NCEP/NCAR за 1982–2009 гг. Установлено наличие статистически значимых положительных корреляционных связей между величиной максимального меридионального градиента зонально осредненной ТПО и меридиональным сдвигом зональной компоненты скорости ветра (являющимся оценкой интенсивности конвергенции экмановского переноса) для всех субполярных и субтропических ОФЗ Мирового океана. Показано, что причиной изменчивости широтного положения ядер ОФЗ может быть долгопериодная изменчивость зональной компоненты скорости ветра и связанные с этим вариации экмановской адвекции. Усиление зональной компоненты скорости ветра приводит к смещению ядер субполярных ОФЗ к югу/северу в Северном/Южном полушариях.

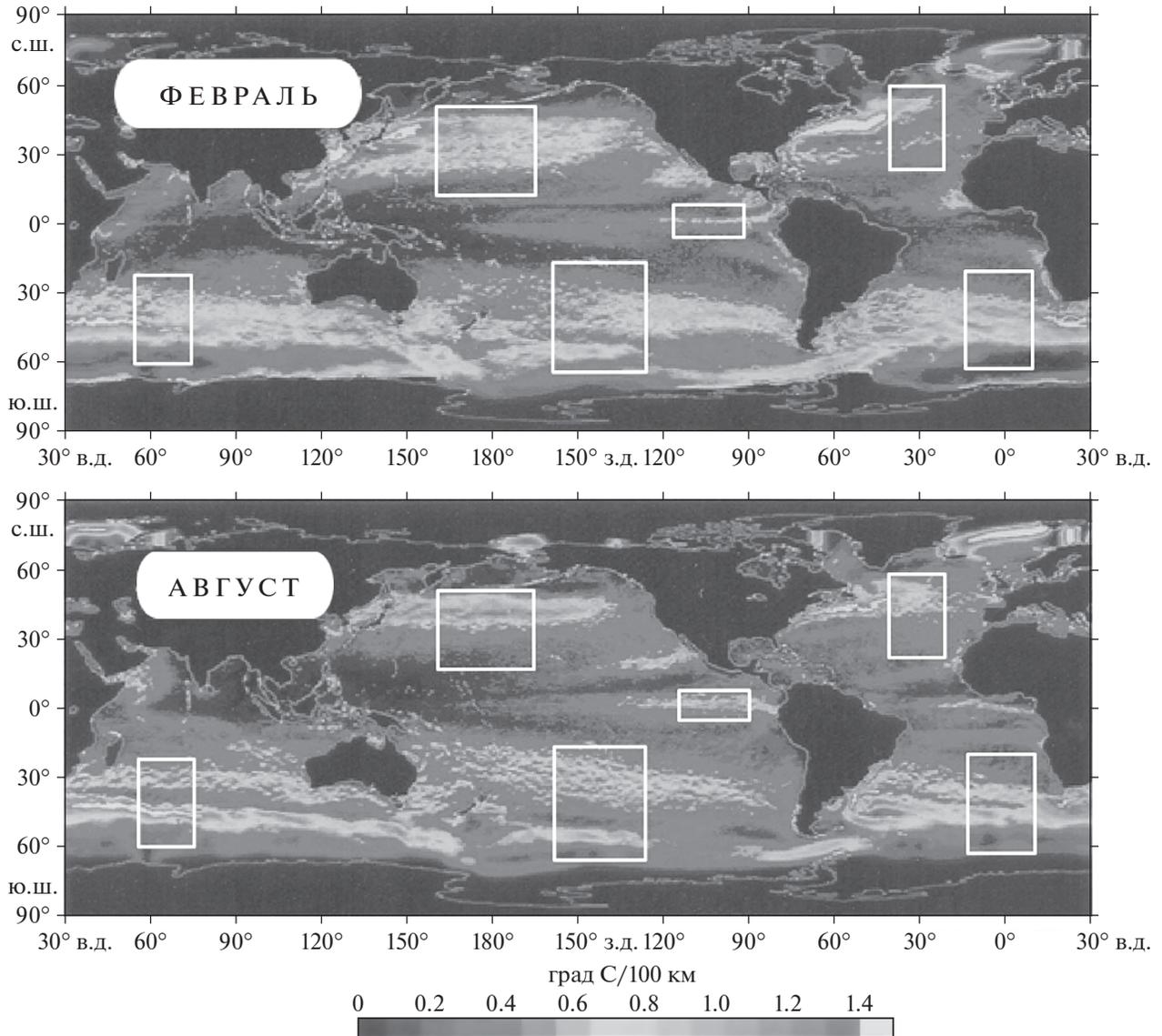
DOI: 10.7868/S0030157416020106

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Фронты и фронтальные зоны являются неотъемлемыми элементами структуры Мирового океана, встречаются во всем спектре пространственных масштабов от десятков метров до размеров самого океана, формируются различными фронтогенетическими механизмами и играют важную роль в гидрофизических и биологических процессах. Наибольший интерес вызывают крупномасштабные океанические фронтальные зоны (ОФЗ), поддерживаемые глобальным перераспределением количества движения и тепла. Изменчивость и фронтогенез в ОФЗ служат интегральным отражением процессов взаимодействия океана и атмосферы. Поскольку климатические ОФЗ являются элементами единой глобальной системы циркуляции, представляется логичным исследовать их изменчивость на всей акватории Мирового океана. Такой анализ возможен только на основе глобальных спутниковых измерений температуры поверхности океана (ТПО). В одной из первых работ такого рода [4] 12-летний ряд глобальных спутниковых измерений ТПО был успешно использован для исследования климатологии и сезонной изменчивости ОФЗ во всем Мировом океане. В недавней работе [1] на основе 28-летнего ряда был представлен сравнительный анализ долгопериодной (квазидекадной) изменчивости всех основных крупномасштабных

ОФЗ (субполярных, субтропических, экваториальных). Показано, что все субполярные и субтропические ОФЗ в Мировом океане обнаруживают хорошо выраженную квазидекадную (с периодом 7–10 лет) изменчивость, проявляющуюся в вариациях их интенсивности и широтного положения ядер зон. При этом усиление градиента ТПО сопровождается смещением ядер зон к северу в обоих полушариях для субполярных и к полюсам для субтропических ОФЗ.

Далее возникает вопрос о возможной связи установленной в [1] долгопериодной изменчивости ОФЗ с крупномасштабным атмосферным воздействием. Известно, что одним из основных первичных крупномасштабных фронтогенетических механизмов образования среднеширотных ОФЗ является конвергенция экмановского переноса в поверхностном слое, связанная с антициклоническим характером меридионального сдвига зональной компоненты напряжения трения ветра (например, [6–8]). Как было показано в [4], фронтогенетический эффект конвергенции экмановского переноса может быть оценен на основе одномерной модели перемешанного слоя (например, [2]) как  $(\partial V_E / \partial y)G$ , где  $V_E = -\tau_x / \rho f h$  – меридиональная компонента экмановской скорости,  $G$  – меридиональный градиент зонально осредненной ТПО,  $\tau_x$  – зональная компонента напряжения трения ветра,  $\rho$  – плотность воды,  $f$  – пара-



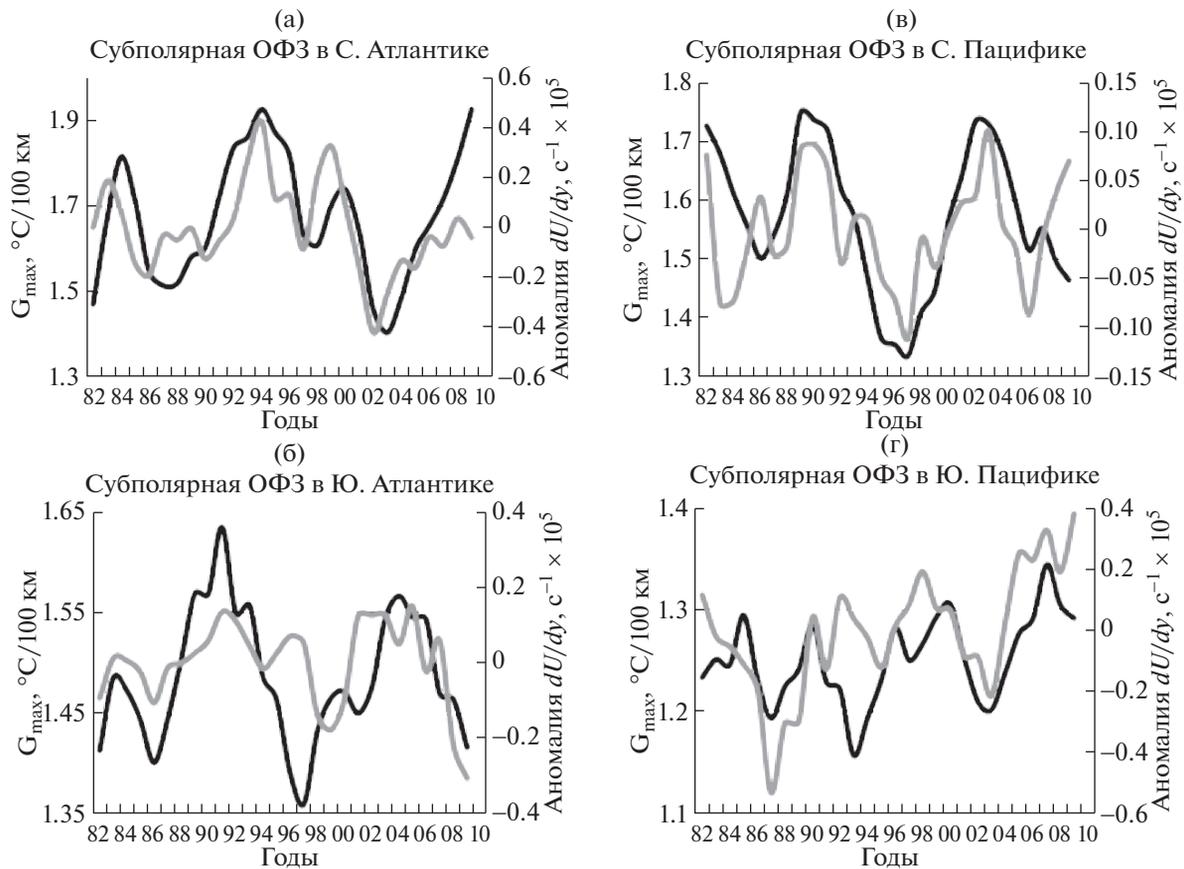
**Рис. 1.** Среднее многолетнее распределение величины локального градиента ТПО в Мировом океане в феврале (вверху) и в августе (внизу). Белые прямоугольники – области зонального осреднения ТПО в районах основных ОФЗ.

метр Кориолиса. Поскольку  $\tau_x = c_D \rho_a U^2$ , где  $c_D$  – коэффициент сопротивления морской поверхности,  $\rho_a$  – плотность воздуха, а  $U$  – зональная компонента скорости ветра, меридиональный сдвиг последней может быть использован в качестве оценки интенсивности конвергенции экмановского переноса. Субполярные ОФЗ в центральных областях среднеширотных зон Мирового океана, вдали от районов продолжений западных пограничных течений, обнаруживаются южнее (в Северном полушарии) и севернее (в Южном полушарии) максимума интенсивности западных ветров, в зоне конвергенции южного (северного) экмановского переноса. Субтропические ОФЗ образуются в зоне конвергенции экмановского

переноса на границе между областями западных ветров и восточных пассатов. Таким образом, долгопериодная изменчивость интенсивности среднеширотных ОФЗ может быть связана с вариациями меридионального сдвига зональной компоненты скорости ветра  $U$  ( $dU/dy$ ), обусловленными изменчивостью крупномасштабных атмосферных циркуляционных систем. Предлагаемая работа посвящена проверке этого предположения.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В работе использованы данные о ТПО высокого пространственного разрешения, полученные по измерениям радиометра AVHRR ( $4 \text{ км} \times 4 \text{ км}$



**Рис. 2.** Долгопериодная изменчивость величины максимального меридионального градиента зонально осредненной ТПО ( $G_{\max}$ ,  $^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ , черная линия) и аномалии меридионального сдвига зональной компоненты скорости ветра ( $dU/dy$ ,  $\text{с}^{-1} \times 10^5$ , серая линия) в субполярных ОФЗ Атлантического (а, б) и Тихого (в, г) океанов (вверху – Северное полушарие, внизу – Южное).

по пространству и 1 месяц по времени; продукт PATHFINDER; <http://www.nodc.noaa.gov/SatelliteData/pathfinder4km>) за 1982–2009 гг. Первоначально были построены глобальные среднеголетние (28 лет) климатологические карты распределения локальных градиентов ТПО для каждого месяца, которые позволили выявить глобальную картину географического распределения основных ОФЗ и их сезонной изменчивости [1]. Примеры карт для февраля и августа представлены на рис. 1. Для фильтрации мезомасштабных флуктуаций и выявления основных особенностей долгопериодной изменчивости было использовано зональное осреднение ТПО в пределах выделенных участков ОФЗ (рис. 1). Зональное осреднение оправдано тем, что выбранные области располагаются в открытых частях океанов и ОФЗ в них ориентированы практически зонально. Ранее такой интегральный подход был успешно использован для выявления основных характеристик квазидекадной изменчивости как в крупномасштабных ОФЗ [1, 4, 5], так и в локальной

области Канарского апвеллинга [9]. Предварительно было проведено осреднение ТПО для сезонов максимальной интенсивности ОФЗ, различных для субполярных и субтропических зон и для Северного и Южного полушарий. Далее, аналогично [1] были рассчитаны величины меридиональных градиентов зонально осредненной ТПО ( $G(y, t) = |(\partial\langle T \rangle / \partial y)|$ , где  $\langle T \rangle$  обозначает зональное осреднение ТПО), и определены их максимальные значения ( $G_{\max}$ ) для каждой ОФЗ и широтное положение  $G_{\max}$  (ядро ОФЗ). В результате были получены временные ряды значений  $G_{\max}$  и его положения для субполярных и субтропических ОФЗ Атлантического и Тихого океанов (оба полушария) и Индийского океана.

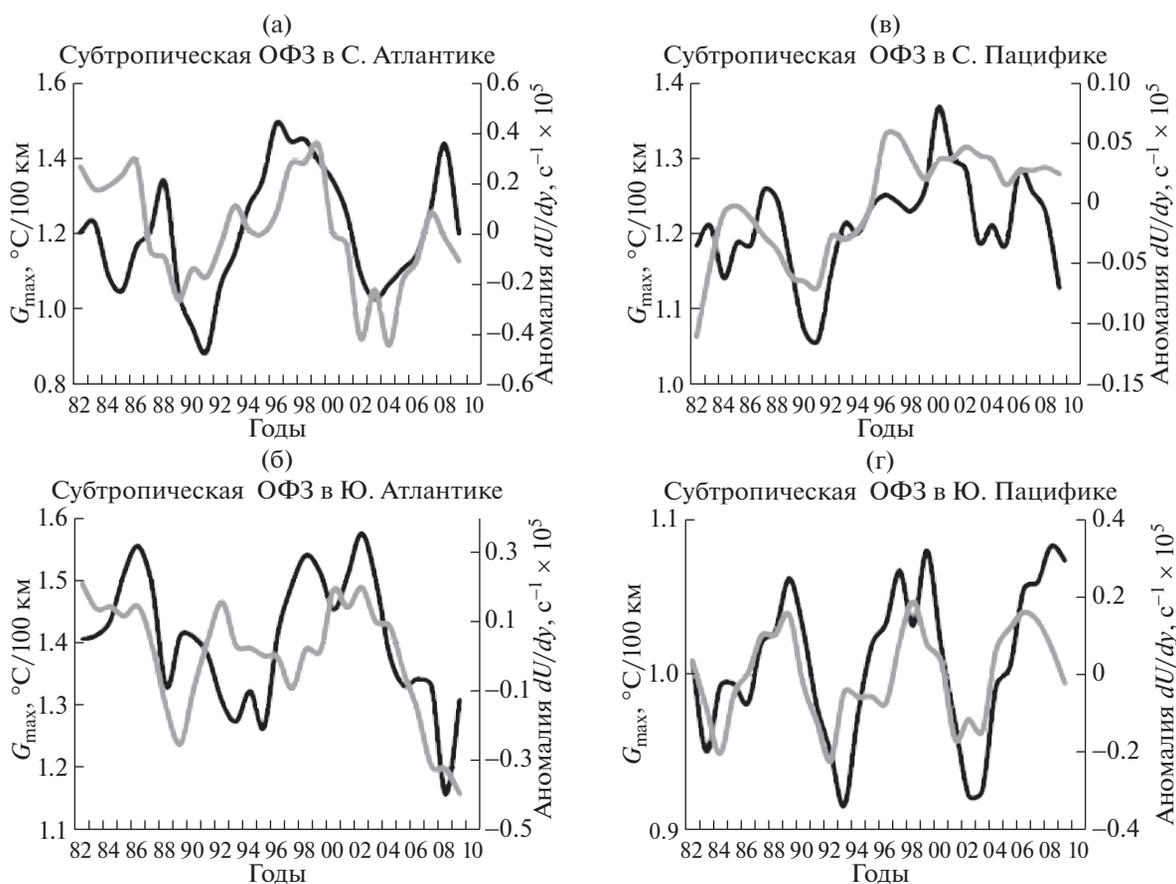
Данные о зональной компоненте ветра ( $U$ ) на высоте 10 м с разрешением  $2.5^{\circ}$  широты  $\times$   $2.5^{\circ}$  долготы по пространству и 1 месяц по времени за период 1982–2009 получены из архива реанализа NCEP/NCAR ([http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep\\_data](http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data)). Массив данных описан в [3]. Для расчета  $dU/dy$  среднемесячные значения  $U$  первоначально-

Значения коэффициента корреляции ( $R$ ) между величиной максимального градиента зонально осредненной ТПО ( $G_{\max}$ ) и меридиональным сдвигом зональной компоненты скорости ветра ( $dU/dy$ ) и уровни вероятности ( $p$ )

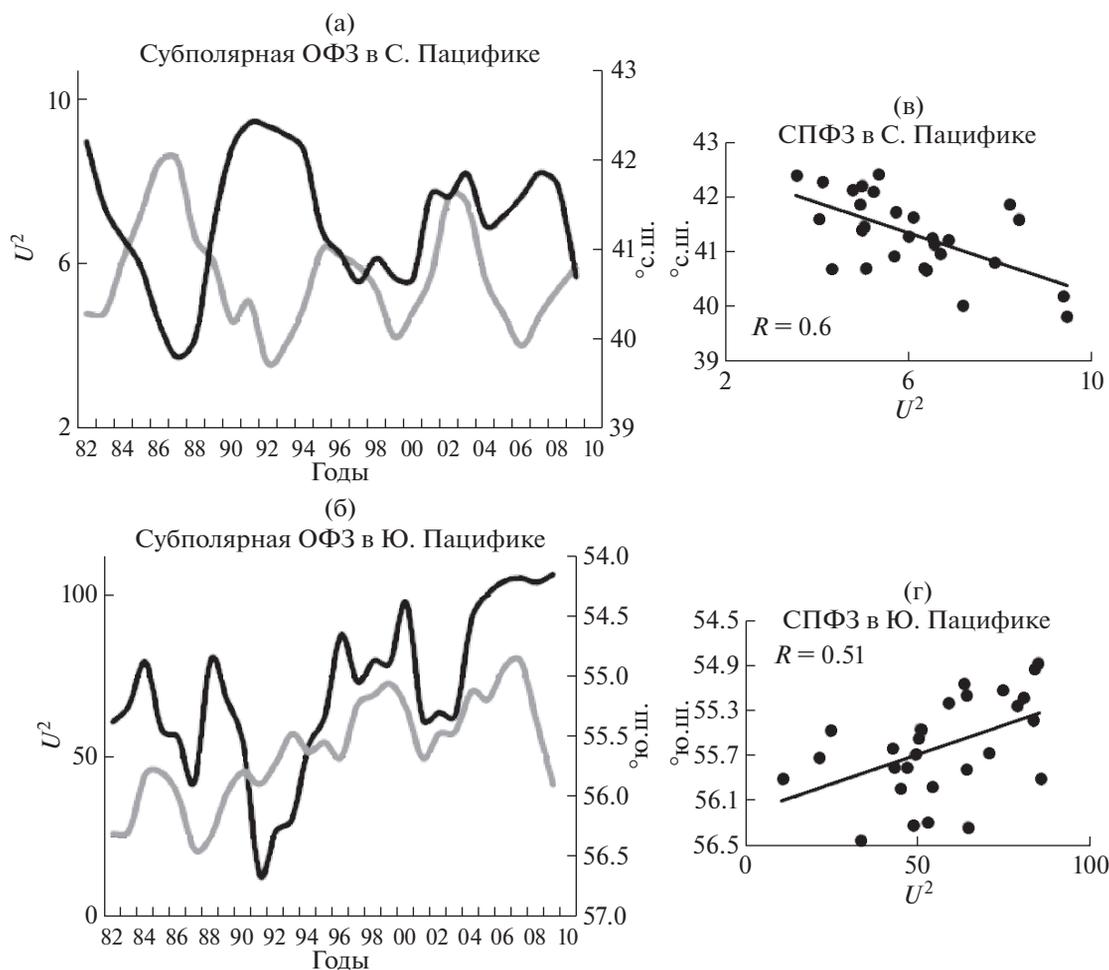
Район	Субполярные ОФЗ	Субтропические ОФЗ
Северная часть Тихого океана	0.59 ( $p < 0.01$ )	0.57 ( $p < 0.01$ )
Южная часть Тихого океана	0.59 ( $p < 0.01$ )	0.67 ( $p < 0.01$ )
Северная часть Атлантического океана	0.63 ( $p < 0.01$ )	0.5 ( $p < 0.01$ )
Южная часть Атлантического океана	0.46 ( $p < 0.05$ )	0.54 ( $p < 0.01$ )
Индийский океан	0.47 ( $p < 0.05$ )	0.42 ( $p < 0.05$ )

но осреднялись зонально и для соответствующих сезонов, аналогично осреднению ТПО для расчетов  $G_{\max}$ .

В работе использовался корреляционный анализ для выявления связей между  $G_{\max}$  и  $dU/dy$ . Для оценки статистической значимости результатов корреляционного анализа проверялась нулевая гипотеза методом  $t$ -теста Стьюдента. В связи с малой выборкой ( $N = 28$ ) и примененным сглаживанием был проведен дополнительный анализ достоверности корреляций. Были рассчитаны корреляции для сглаженных рядов с сокращенным количеством степеней свободы, для не сглаженных рядов, а также ранговые корреляции Спирмана. Для сглаженных данных с сокращенным количеством степеней свободы корреляции оставались значимыми до  $N - 8 = 20$  с уровнем вероятности  $p$  не более 0.05. Для не сглаженных рядов корреляции оставались значимыми в 7-ми случаях с  $p < 0.05$  и в 3-х случаях – с  $p < 0.1$ . Коэффициенты корреляции Спирмана оказались ниже, чем коэффициенты Пирсона, но, тем не ме-



**Рис. 3.** Долгопериодная изменчивость величины максимального меридионального градиента зонально осредненной ТПО ( $G_{\max}$ ,  $^{\circ}\text{C}/100$  км, черная линия) и аномалии меридионального сдвига зональной компоненты скорости ветра ( $dU/dy$ ,  $\text{c}^{-1} \times 10^5$ , серая линия) в субтропических ОФЗ Атлантического (а, б) и Тихого (в, г) океанов (вверху – Северное полушарие, внизу – Южное).



**Рис. 4.** Долгопериодная изменчивость квадрата зональной компоненты скорости ветра ( $U^2$ ,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ; серая линия) и широтного положения максимума меридионального градиента зонально осредненной ТПО (черная линия) в субполярных ОФЗ северной (а) и южной (б) частей Тихого океана и корреляция между этими величинами (в, г).  $R$  – величина коэффициента корреляции.

нее, статистически значимыми с уровнем вероятности  $p$  не более 0.05. Положительный, в целом, результат дополнительного анализа позволяет с доверием относиться к выводам, основанным на корреляционном анализе. В работе приводятся только статистически значимые коэффициенты корреляции с указанием соответствующих уровней вероятности  $p$  (не более 0.05).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенных расчетов были построены временные ряды величины  $G_{\max}$  и аномалий  $dU/dy$  для субполярных и субтропических ОФЗ Тихого, Атлантического и Индийского океанов (десять фронтальных зон). В качестве примера показаны соответствующие ряды для субполярных (рис. 2) и субтропических (рис. 3) ОФЗ Атлантического и Тихого океанов (аналогичные результаты получены и для Индийского океана).

Представленные иллюстрации подтверждают существование долгопериодной изменчивости меридионального сдвига зональной компоненты скорости ветра, совпадающей по периоду (7–10 лет) и фазе с долгопериодной изменчивостью  $G_{\max}$ . Для количественного подтверждения полученных результатов был проведен корреляционный анализ. Для всех десяти рассмотренных ОФЗ обнаружена достаточно высокая, статистически значимая положительная корреляция между величинами  $G_{\max}$  и аномалиями  $dU/dy$ . Значения коэффициентов корреляции с соответствующими уровнями вероятности для всех ОФЗ представлены в таблице. Таким образом, с достаточной степенью уверенности можно утверждать, что долгопериодная (квазидекадная) изменчивость интенсивности крупномасштабных среднеширотных ОФЗ определяется изменчивостью меридионального сдвига зональной компоненты ветра, определяющей

интенсивность конвергенции экмановского переноса.

Ветровое воздействие, помимо конвергенции экмановского переноса, влияющей на величину  $G_{\max}$  и обусловленной меридиональным сдвигом  $U$ , включает также и меридиональную адвективную составляющую  $V_E(dG/dy)$  [4], пропорциональную величине  $U^2$  (см. представленное выше выражение для  $V_E$ ). Результатом адвекции является смещение фронтальных зон в меридиональном направлении. Долгопериодная изменчивость зональной компоненты ветра и связанные с ней вариации меридиональной экмановской адвекции могут быть причиной изменчивости широтного положения ядер ОФЗ. Подтверждением этого служат рис. 4а и 4б, на которых представлена долгопериодная изменчивость квадрата зональной компоненты скорости ветра и широтного положения  $G_{\max}$  для субполярных ОФЗ Тихого океана. Анализ подтверждает наличие статистически значимой корреляции между этими величинами (рис. 4в и 4г). Поскольку в областях западного ветрового переноса экмановская адвекция в обоих полушариях направлена к экватору, усиление зональной компоненты ветра приводит к смещению ядра субполярной ОФЗ к югу в Северном полушарии и к северу в Южном полушарии.

### ВЫВОДЫ

На основании анализа многолетних глобальных спутниковых измерений ТПО и данных реанализа о зональной компоненте скорости ветра впервые документально подтверждено, что долгопериодная (квазидекадная) изменчивость интенсивности основных крупномасштабных ОФЗ Мирового океана (субполярных и субтропических) связана с изменчивостью меридионального сдвига зональной компоненты скорости ветра, определяющей интенсивность конвергенции экмановского переноса. Причиной долгопериодной изменчивости широтного положения ядер

субполярных ОФЗ является изменчивость зональной компоненты ветра и связанные с ней вариации меридиональной экмановской адвекции. Показано, что усиление зональной компоненты ветра приводит к смещению ядер субполярных ОФЗ к югу в Северном полушарии и к северу в Южном полушарии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00095) и средств ИО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казьмин А.С. Изменчивость крупномасштабных океанических фронтальных зон: анализ глобальной спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 213–218.
2. de Ruijter W.P.M. Effects of velocity shear in advective mixed-layer models // J. Phys. Oceanogr. 1983. V. 13. № 9. P. 1589–1599.
3. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
4. Kazmin A.S., Rienecker M.M. Variability and frontogenesis in the large-scale oceanic frontal zones // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C1. P. 907–921.
5. Nakamura H., Kazmin A.S. Decadal changes in the North Pacific oceanic frontal zones as revealed in ship and satellite observations // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C3. P. 3078–3094.
6. Roden G.I. Aspects of the mid-Pacific transition zone // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 6. P. 1097–1109.
7. Roden G.I. Temperature and salinity fronts at the boundaries of subarctic-subtropical transition zone in the western Pacific // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. № 36. P. 7175–7178.
8. Roden G.I. On North Pacific temperature, salinity, sound velocity and density fronts and their relation to the wind and energy flux fields // J. Phys. Oceanogr. 1975. V. 5. № 4. P. 557–571.
9. Santos A.M.P., Kazmin A.S., Peliz A. Decadal changes in the Canary upwelling system as revealed by satellite observations: Their impact on productivity // J. Mar. Res. 2005. V. 63. № 2. P. 359–379.

## Long-Term Variability of the Oceanic Frontal Zones Associated with the Large-Scale Atmospheric Forcing

A. S. Kazmin

Global satellite sea surface temperature (SST) measurements and NCEP/NCAR reanalysis wind data for the period of 1982–2009 have been used to study the connection between long-term variability of the oceanic frontal zones (OFZ) and large-scale atmospheric forcing. Statistically significant positive correlations between maximum value of meridional gradient of zonally averaged SST and meridional shear of zonal wind (which is an estimate of Ekman convergence intensity) for all subpolar and subtropical OFZ of the World Ocean were found. Variability of the OFZ's cores meridional position may be associated with Ekman advection variability due to the zonal wind variations. Strengthening of zonal wind results in the shift of subpolar OFZ's cores south/north in Northern/Southern hemispheres.