

Анализ пространственно-временной изменчивости ширины Южной Полярной фронтальной зоны за период 1992–2012 гг.

П. С. Петкилёв

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: petkilev.pavel@yandex.ru

На основе известного массива временных рядов, основанного на комбинации данных контактных наблюдений и спутниковой альтиметрии, циркумполярно исследована пространственно-временная изменчивость ширины Южной Полярной фронтальной зоны и формирующих её Субантарктического и Южного Полярного фронтов. Основным методом в работе стал секвентивный анализ значений базовых статистик временных рядов ширины изучаемой фронтальной зоны и положения её фронтов. Аналогичным образом анализировалась последовательность значений коэффициента корреляции Спирмена между соседними по пространству временными рядами ширины и положения изучаемых объектов. Показано, что, несмотря на тесную согласованность изменчивости контуров Субантарктического и Южного Полярного фронтов при движении с запада на восток, изменчивость ширины Южной Полярной фронтальной зоны неоднородна по пространству. В масштабах Южной Полярной фронтальной зоны выделено три участка с различными паттернами изменчивости: атлантический, индоокеанский и тихоокеанский. Наибольшая изменчивость ширины Южной Полярной фронтальной зоны относительно среднего наблюдается на узких её участках.

Ключевые слова: фронты в океане, Южный Полярный фронт, Субантарктический фронт, Южная Полярная фронтальная зона

Одобрена к печати: 10.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-192-202

Введение

Изучение фронтов и фронтальных зон — одна из ключевых задач современной океанологии, важная составляющая климатических, промысловых и других исследований. Значительное внимание в разрезе этой задачи традиционно уделялось непосредственно методам выделения фронтов как на основе данных контактных измерений, так и материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), являющихся важнейшим источником информации о положении океанических фронтов на сегодняшний день.

Накопилось множество работ, посвящённых обнаружению фронтов размером от субмезомасштабных до планетарных на основе использования различных типов спутниковой информации, начиная с данных по температуре поверхности океана и заканчивая альтиметрическими данными о высоте морской поверхности (Артамонов, Скрипалева, 2005; Гордеева, Малинин, 2006; Казьмин, 2012; Коник и др., 2018; Никитин, 2006; Фукс, 2009; Belkin, O'Reilly, 2009; Pascual et al., 2017; Sallée et al., 2008; Vinuchandran, Ramakrishnan, 2013).

Однако временная изменчивость положения и характеристик фронтов и фронтальных зон, в том числе наиболее крупных и интенсивных, изучены недостаточно. Ярким примером являются расположенные в Южном океане циркумполярные Субантарктический (САФ) и Южный Полярный (ПФ) фронты, образующие Южную Полярную фронтальную зону (ЮПФЗ) (Graham et al., 2012).

В качестве причин сложившейся ситуации можно назвать: а) бурный рост качества и количества данных ДЗЗ, непрерывное расширение доступного ассортимента типов данных и их источников, что привело к сосредоточенности значительной части научного сообщества на «корректном» и «однозначном» выделении фронтов; б) особенности фронтов как явлений — линейность (с крупномасштабной точки зрения) в сочетании со сложной пространственной конфигурацией и интенсивной изменчивостью. Перечисленные факторы затрудняют иссле-

дование временной изменчивости положения и характеристик океанических фронтов и требуют совершенствования существующего методического аппарата.

В связи с изложенным выше в настоящей работе описан и выполнен секвентивный (*lat. sequence* — последовательность) анализ положения САФ и ПФ, а также ширины (протяжённости по меридиану в градусах) ЮПФЗ как один из удобных подходов к анализу изменчивости климатических фронтов Мирового океана. Важно уточнить, что САФ и ПФ рассматриваются именно как климатические фронты, формирующиеся под воздействием общей циркуляции океана и атмосферы, а также ряда других постоянно действующих факторов. Такие особенности фронтов, как наличие локальных разрывов, не учитываются.

Исходные данные

В качестве исходных данных в настоящей работе был использован массив данных о циркумполярном положении САФ и ПФ за период с 14.10.1992 по 19.04.2013, основанный на комбинации климатологической информации о среднем уровне поверхности океана (на основе T/S-данных массива WOCE SODB и буев ARGO) с данными аномалий уровня океана по спутниковой альтиметрии проекта AVISO. Массив создан сотрудниками центра СТОН-LEGOS и описан в работе (Sallée et al., 2008). Его дискретность составляет 21 день, $0,75^\circ$ (что образует в сумме 190 400 наблюдений на 476 точках долготы). Единственный не покрытый наблюдениями участок расположен между $3,75^\circ$ з.д. и нулевым меридианом. Этот массив находится в доступе по запросу в формате NetCDF (<http://ctoh.legos.obs-mip.fr/applications/mesoscale/southern-ocean-fronts>). Содержащиеся в нём данные о положении северной ветви САФ в настоящей работе не использовались.

Процедура выделения фронтов подробно описана в работе (Sallée et al., 2008). С использованием данных профилей WOCE SODB и ARGO (в соотношении 55:45 соответственно) по температуре и солёности на глубинах от 10 до 1500 м была получена информация о динамической топографии океана относительно 1500 м. Выбор этого отсчётного уровня был обусловлен серьёзным уменьшением количества профилей с данными ниже глубины 1500 м. Для изучения временной изменчивости динамической топографии океана, а также регистрации положения фронтов были использованы альтиметрические данные аномалий уровня океана недельной дискретности на сетке $1/3 \times 1/3^\circ$ проекта AVISO.

Выделение фронтов выполнялось на основе описанного выше массива данных анализом градиентов динамической топографии и выделением контуров каждого фронта как линий, приуроченных к максимальным градиентам. В работе (Sallée et al., 2008) отмечается, что положение фронтов совпадает с определёнными контурами динамической топографии не в любой момент времени. Однако выбор изолиний динамической топографии, которые в дальнейшем ассоциировались с фронтом, производился таким образом, чтобы они описывали положение фронта, получаемое на основе гидрологических критериев, с максимально возможной точностью. Контроль полученных контуров фронтов путём их сопоставления с результатами других авторов продемонстрировал убедительные результаты, однако в отдельных районах обнаружилось заметные расхождения (Sallée et al., 2008). Наиболее серьёзные из них приурочены к области пролива Дрейка и моря Скотия, где вследствие орографических причин наблюдается значительная изменчивость положения фронтов по долготе, ведущая к заметным ошибкам (статистической природы) при осреднении. Таким образом, средние значения положения фронтов в данном районе имеют невысокую надёжность (но не сами временные ряды!). В связи с этим в настоящей работе было принято решение максимально осторожно отнестись к результатам, полученным по диапазону долготы $70-50^\circ$ з.д., но не исключать их из анализа.

В районе плато Кергелен («проблемном» вследствие наличия выраженных противоречий в имеющейся литературе) положение ПФ по результатам анализа оказалось южнее о. Кергелен, что совпадает с результатами работ (Kostianoy et al., 2004; Moore et al., 1999; Park et al., 1998).

Среди источников потенциальных ошибок названы долгосрочные тренды в изменении уровня, точность альтиметрии и др. (Sallée et al., 2008), приводится подробный разбор каждого из названных факторов. Максимальная ошибка широты положения фронтов оценена авторами в $\pm 1,2^\circ$. Осреднённое положение фронтов, выделенных в исследовании (Sallée et al., 2008), в сравнении с результатами классической работы (Orsi et al., 1995) представлено на *рис. 1*. Различия в пространственной конфигурации фронтов у авторов этих исследований обусловлены, прежде всего, особенностями исходных данных: в работе (Orsi et al., 1995) анализировались натурные данные гидрографических разрезов, полученные в разные годы научно-исследовательскими судами разных стран. Помимо этого, играет роль и осреднение данных из работы (Sallée et al., 2008), следствием которого является сглаженность положения фронтов.

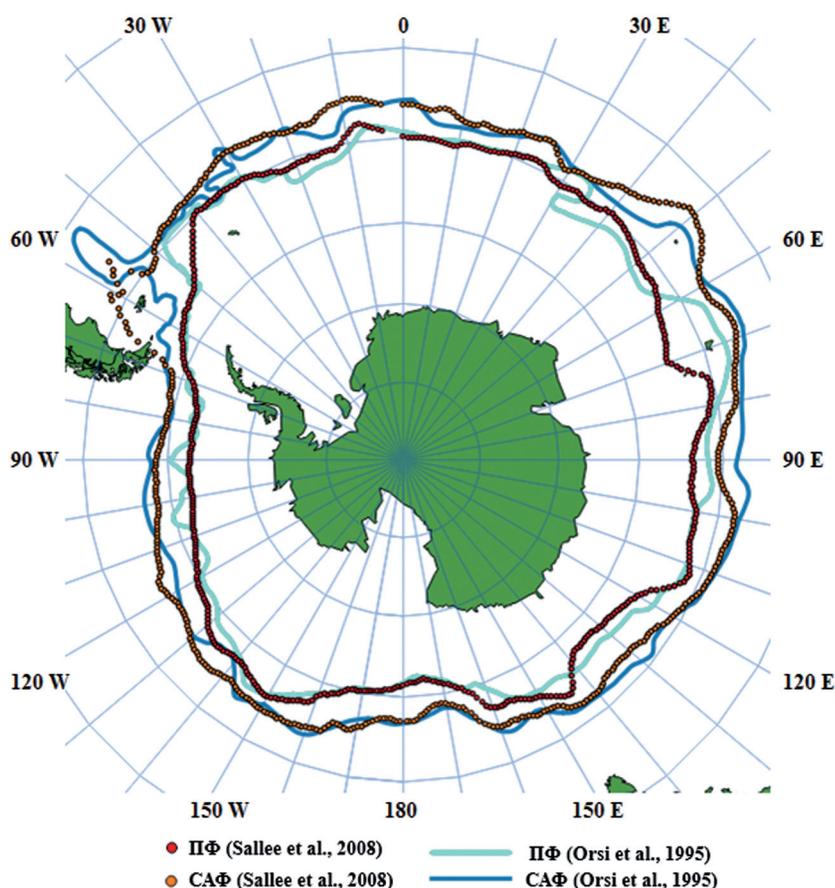


Рис. 1. Среднее положение САФ и ПФ за период 1992–2013 гг. на основе массива Southern Ocean Fronts time series (Sallée et al., 2008), а также положение этих фронтов согласно (Orsi et al., 1995)

Таким образом, исходными данными для настоящей работы стали 476 временных рядов, описывающих циркумполярные положения САФ, ПФ и ширину ЮПФЗ.

Секвентивный анализ базовых статистик и коэффициентов корреляции

Для каждого из вышеупомянутых временных рядов рассчитывались базовые статистики: коэффициент вариации (представляет собой отношение среднеквадратичного отклонения к среднему и является показателем изменчивости ряда относительно его среднего значения в процентах), среднее, медианное, наиболее южное и северное положения (для САФ и ПФ), минимальное и максимальное (для ширины ЮПФЗ) значения. Данный набор метрик позво-

ляет на каждом участке характеризовать пространственный масштаб ЮПФЗ и его изменчивость относительно среднего значения. Формулы расчёта этих статистик приведены в работе (Press et al., 1992). Также для каждого параметра вычислялись коэффициенты корреляции Спирмена между соседними по пространству его временными рядами.

Суть секвентивного подхода заключается в анализе числовой последовательности базовых статистик и коэффициентов корреляции Спирмена, где по оси X отложена долгота соответствующего временного ряда, а по оси Y — численное значение статистики или коэффициента корреляции.

Проиллюстрируем суть подхода на примере секвентивного анализа среднего положения САФ (SAF), массив данных по которому может быть представлен в виде множества из 476 временных рядов (saf):

$$SAF = \{saf_1; saf_2; \dots; saf_{476}\}, \quad (1)$$

где нижний индекс означает порядковый номер временного ряда. Минимальное значение индекса (1) соответствует самому западному временному ряду, а максимальное (476) — самому восточному.

По итогам расчёта среднего значения положения САФ для каждого временного ряда получаем числовую последовательность (вектор-строку):

$$\overline{SAF} = \{\overline{saf_1}; \overline{saf_2}; \dots; \overline{saf_{476}}\}. \quad (2)$$

Полученный вектор-строка может быть проанализирован статистически, графически и пространственно. Анализ аналогичным образом полученных числовых последовательностей для других базовых статистик даёт возможность оценить пространственную изменчивость САФ, ПФ и ширины ЮПФЗ.

Секвентивный анализ коэффициентов корреляции Спирмена между соседними рядами можно представить в виде:

$$r(SAF) = \{r(saf_{1-2}); r(saf_{2-3}); \dots; r(saf_{475-476})\}, \quad (3)$$

где $r(saf_{1-2})$ — коэффициент корреляции между соседними (первым и вторым) временными рядами. Графическая реализация полученной числовой последовательности позволяет проанализировать особенности взаимосвязи между соседними временными рядами и оценить преемственность процессов, определяющих динамику фронтов.

Участки фронтов с последовательностью высоких значений коэффициентов корреляции характеризуются согласованной изменчивостью во времени. Низкие значения коэффициента корреляции, как правило наблюдающиеся на графиках в виде отдельных выбросов, говорят о невысокой степени согласованности изменчивости между соседними по пространству точками. Для определения подобных выбросов в настоящей работе был применён критерий двух среднеквадратичных отклонений от среднего значения (т. е. выбросы — это точки «пробития» графиком уровня двух среднеквадратичных отклонений).

В итоге основное назначение секвентивного анализа базовых статистик — пространственная оценка изменчивости изучаемого фронта, в то время как секвентивный анализ коэффициентов корреляции позволяет определить характер взаимосвязи между временными рядами и найти места его смены. Анализ значений коэффициентов при движении с запада на восток позволяет оценить степень «синхронизации» изменчивости положения фронтов, а также преемственность процессов, определяющих эту изменчивость. В целом секвентивный подход удобен для анализа изменчивости любых линейных объектов.

Применение секвентивного подхода к анализу временных рядов положения фронтов привело к существенному понижению размерности исходного массива данных и дало возможность его графического представления и анализа. При этом предложенная (впервые, по сведениям автора) в настоящей работе идея секвентивного подхода проста в реализации и удобна в интерпретации, что делает этот подход крайне удобным при анализе временной динамики линейных географических объектов.

Результаты

На *рис. 2* представлена визуализация минимальной, максимальной и средней ширины ЮПФЗ (верхняя панель), а также коэффициента вариации ширины ЮПФЗ (средняя панель) в зависимости от долготы (отложена на обоих графиках по оси X). Эти статистики были получены на основе временных рядов ширины ЮПФЗ в каждой из 476 точек по долготе.

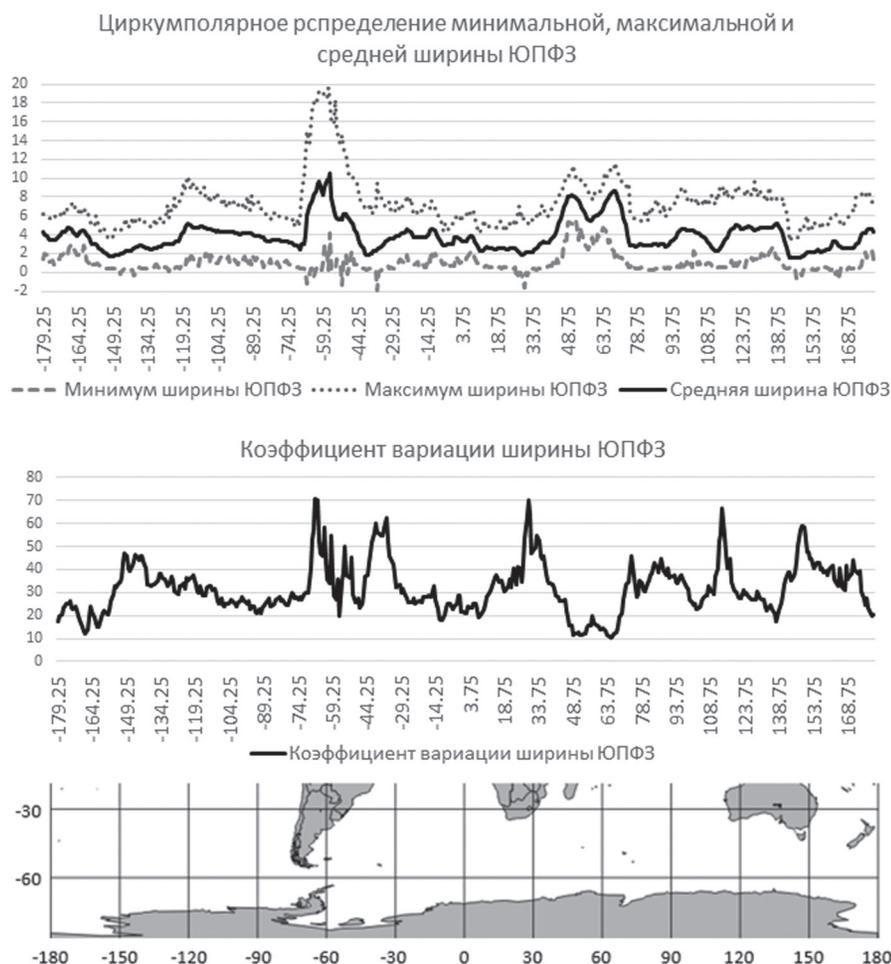


Рис. 2. Графическое представление результатов секвентивного анализа ширины ЮПФЗ (градус широты). По оси X — долгота. Для удобства географического представления под рисунками приведена вставка карты Южного океана (в масштабе, аналогичном масштабу по оси X на графиках)

В численном выражении циркумполярно осреднённая ширина ЮПФЗ составляет $3,89^\circ$ по широте (что практически совпадает с циркумполярной медианой — $3,87^\circ$ по широте), средний минимум её ширины равен $1,02^\circ$ широты, а средний максимум — $7,35^\circ$ широты. Наибольшие средние значения параметра приурочены к району восточнее пролива Дрейка, ограниченном $47\text{--}65^\circ$ з.д., и району плато Крозе — хребт Кергелен (в границах $63\text{--}80^\circ$ в.д., образуют два «пика» средней ширины ЮПФЗ; см. *рис. 2*, верхняя панель).

Причинами приуроченности наибольших средних значений ширины ЮПФЗ к указанным районам являются особенности динамики вод, обусловленные эффектами топографии дна и орографией суши. В случае района к востоку от пролива Дрейка, помимо орографически обусловленного мощного отклонения САФ к северу, играют роль также ошибки статистической природы, причины которых были описаны в разделе «Исходные данные» настоящей работы. Эти же факторы определяют и высокие значения коэффициента вариации ширины ЮПФЗ в данном районе.

Прохождение потоком Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) последовательности мощных топографических препятствий в виде плато Крозе и хребта Кергелен ведёт к расширению ЮПФЗ и снижению изменчивости её ширины (этому району соответствуют наименьшие значения коэффициента вариации ширины ЮПФЗ), что хорошо согласуется с данными работы (Sokolov, Rintoul, 2009). Рост значений коэффициента вариации ширины ЮПФЗ к востоку от данного района обусловлен дестабилизацией потока по прохождении им крупных поднятий подводного рельефа.

Пространственное распределение коэффициента вариации ширины ЮПФЗ (см. рис. 2, средняя панель) отличается следующими особенностями. Минимальные значения данного параметра наблюдаются в районах, где влияние подводного рельефа на поток АЦТ наиболее существенно: помимо описанного выше района плато Крозе — хребт Кергелен низкие значения коэффициента характерны для плато Кэмпбелл (160–180° в.д.). Максимальные коэффициенты вариации приурочены к наиболее узким участкам ЮПФЗ и зоне к западу от района плато Крозе — хребт Кергелен (что говорит о значительных флуктуациях ширины ЮПФЗ относительно среднего значения). Среднее значение параметра составляет 31,78 при размахе от 10 до 70. При росте ширины ЮПФЗ значения коэффициента вариации, как правило, уменьшаются.

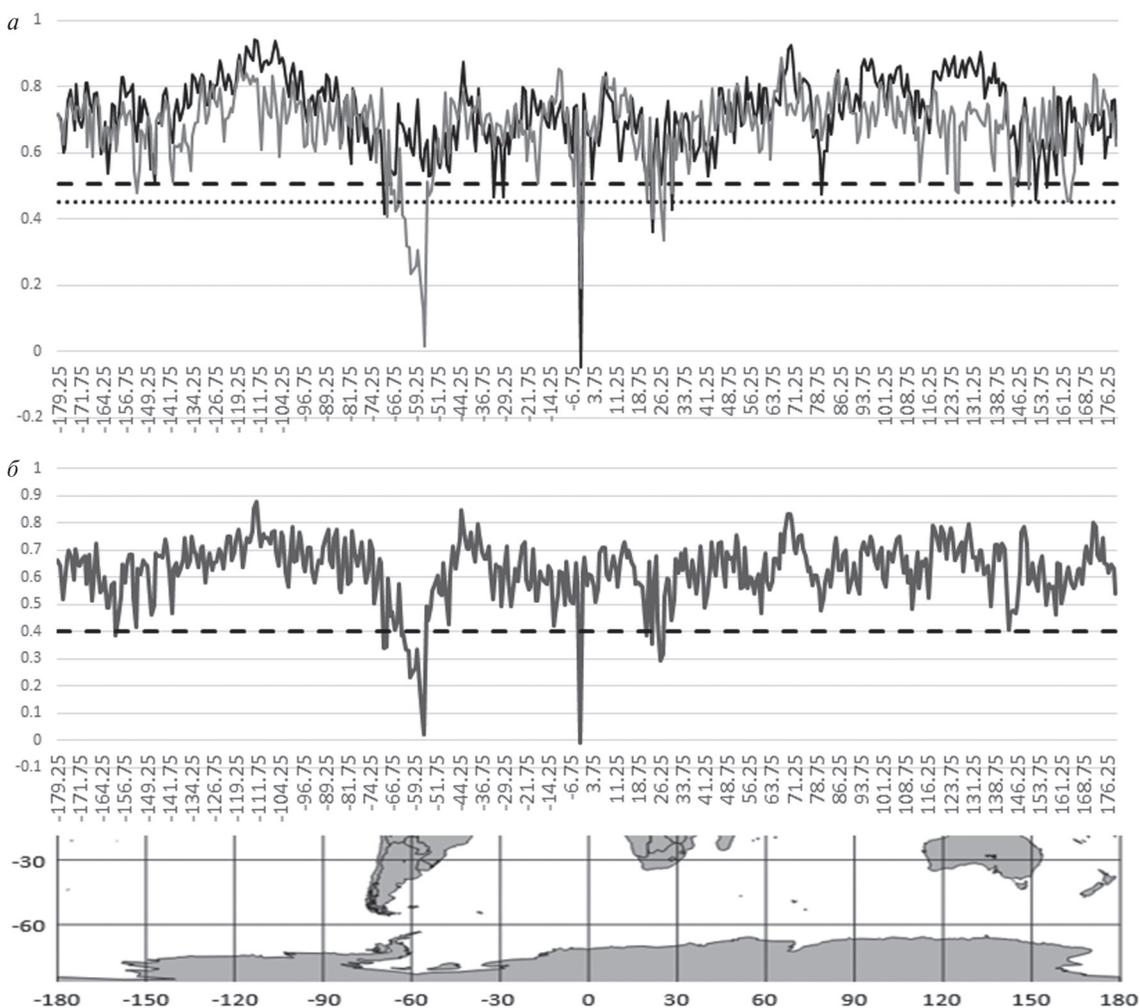


Рис. 3. Циркумполярное распределение коэффициентов корреляции Спирмена между соседними по пространству временными рядами: *a* — положения САФ (серая линия) и ПФ (чёрная линия); *б* — ширины ЮПФЗ. По оси *X* — долгота. Критерий учёта выбросов — минус два среднеквадратичных отклонения — графически представлен в виде пунктирных линий. Для удобства географического представления под рисунками приведена вставка карты Южного океана (в масштабе, аналогичном масштабу по оси *X* на графиках)

Таким образом, ширина ЮПФЗ довольно изменчива как по пространству (циркумполярно), так и во времени (меридионально, в пределах одного и того же локального района). Сильная изменчивость по пространству проявляется в наличии резких скачков ширины ЮПФЗ и коэффициента её вариации при движении с запада на восток, а по времени — в существенной разнице между максимальными и минимальными значениями (в среднем — $6,33^\circ$ широты).

Результаты секвентивного анализа коэффициентов корреляции Спирмена для временных рядов положения САФ и ПФ представлены на *рис. 3* (см. с. 197) и характеризуют линейную взаимосвязь между изменчивостью соседних по долготе участков в пределах каждого из фронтов в отдельности.

На большей части акватории Южного океана для каждого из фронтов и ширины ЮПФЗ наблюдаются относительно высокие значения коэффициентов корреляции Спирмена. Средние значения коэффициентов корреляции между соседними участками в пределах САФ и ПФ составили 0,68 и 0,72 соответственно. Для ширины ЮПФЗ среднее значение для соседних участков равно 0,62. При этом все три анализируемых переменных характеризуются продолжительными участками высоких значений.

Важной особенностью пространственного распределения коэффициентов корреляции Спирмена является наличие локальных участков фронтов, где значения коэффициента падают вплоть до нуля. Такие мощные «отрицательные выбросы» разделяют циркумполярные САФ, ПФ и ЮПФЗ на отдельные продолжительные участки господства высоких значений коэффициента корреляции Спирмена. Заметно, что практически на всём циркумполярном протяжении изменчивость значений коэффициента корреляции Спирмена между соседними участками в пределах одного фронта составляет 0,1–0,2.

Обсуждение результатов

В настоящей работе получены оценки пространственно-временной изменчивости ширины ЮПФЗ. Значительные вариации ширины ЮПФЗ и масштаба её изменчивости относительно среднего при движении с запада на восток наблюдаются на фоне тесной согласованности пространственного положения контуров образующих её САФ и ПФ: рассчитанный коэффициент корреляции Спирмена между средними положениями непосредственно САФ и ПФ составил 0,94 (для максимальных позиций фронтов коэффициент равен 0,83, для минимальных — 0,92).

Логичным представляется то, что наблюдаемая картина должна быть обусловлена несогласованностью изменчивости на противоположных участках САФ и ПФ, с одной стороны, и на участках в пределах каждого из фронтов по отдельности — с другой. Среди конкретных проявлений данной несогласованности возможны несовпадения направления смещения фронтов, периодов и фаз изменчивости.

Выявленная приуроченность наибольших флуктуаций ширины ЮПФЗ к её узким участкам, с одной стороны, имеет чисто статистическую природу — в силу того, что коэффициент вариации демонстрирует изменчивость относительно среднего (следовательно, при равных абсолютных отклонениях участки с меньшими средними значениями будут характеризоваться большими значениями коэффициента вариации). С другой стороны, вероятно, именно на этих узких участках ЮПФЗ осуществляется наиболее активный меридиональный водообмен, что хорошо согласуется с выводами работы (Thompson, Sallée, 2012), и интенсивная генерация антарктической промежуточной водной массы (Santoso, England, 2004). Следствием взаимной близости двух планетарных фронтов друг к другу является обострение всех океанологических процессов, интенсивное вихреобразование, генерация бароклинных неустойчивостей и подвижки крупных объёмов вод (Масленников, 2003). Исходя из полученных результатов представляется перспективной оценка возможности использования временных рядов ширины ЮПФЗ в качестве индикатора широкого ряда процессов в Южном океане, в частности объёма зонального переноса в поле АЦТ и кросс-фронтального переноса через ЮПФЗ.

Также в ходе работы на основе анализа секвентивных корреляций выявлена степень линейной взаимосвязи изменчивости положения соседних участков в пределах каждого из образующих ЮПФЗ фронтов — САФ и ПФ. Показано, что обширные районы каждого из фронтов разделены локальными участками, где коэффициент корреляции Спирмена между сопоставляемыми временными рядами снижается вплоть до нуля. Расчёт коэффициентов корреляции между временными рядами для пар точек, находящихся непосредственно к западу и к востоку от таких «отрицательных выбросов», показало отсутствие линейной связи между этими рядами. Иными словами, к востоку и западу от «отрицательных выбросов» изменчивость положения фронта существенно различается.

Для каждого из фронтов справедливо, что в пределах района, где наблюдаются колебания коэффициента корреляции вблизи высоких значений, имеет место определённый **паттерн временной изменчивости** положения фронта. Каждый отрицательный выброс и следующее за ним резкое возрастание коэффициента корреляции до высоких значений можно интерпретировать как границу паттерна изменчивости.

Под паттерном изменчивости будем понимать наблюдаемый в пределах определённого района специфический характер временной динамики значений метрики. В рамках настоящей работы такой метрикой является географическая широта положения фронта, районы образованы последовательностью точек наблюдения, а мерой сходства служит коэффициент корреляции Спирмена. Иными словами, это некий шаблон изменчивости изучаемой метрики, характерный для определённого района вследствие его географических особенностей. Представляется возможным и использование других мер сходства, таких как амплитуда, фаза, размах колебаний и др.

Важно отметить, что сходный характер изменчивости будет иметь место только на участке непосредственно между двумя мощными отрицательными выбросами. То есть при движении с запада на восток паттерн изменчивости меняется после каждого сильного выброса и остаётся неизменным до следующего сильного выброса. Подтверждением этого являются выявленные низкие значения коэффициентов корреляции между удалёнными друг от друга точками, относящимся к участкам с разными паттернами изменчивости.

Установлено, что на паттерн изменчивости способны заметно влиять даже относительно небольшие выбросы, малозаметные при визуальном анализе. Например, использование критерия двух среднеквадратичных отклонений для САФ (0,45) показало, что для малых колебаний, не пробивающих это значение, связь между двумя точками западнее и восточнее выброса остаётся приемлемой (~0,50). Для выбросов, пробивающих уровень 0,45, коэффициент корреляции между временными рядами для двух точек западнее и восточнее выброса стремится к нулю. Таким образом, те районы, где наблюдается пробитие этого значения коэффициента корреляции (0,45), можно интерпретировать как непосредственные границы акваторий с разными особенностями изменчивости фронтов.

Анализ выбросов демонстрирует в целом сходное их распределение как для САФ, так и для ПФ. При этом для ПФ характерны более мощные выбросы, чем для САФ. Среди заметных отличий — наличие чёткого выброса у ПФ в районе плато Кергелен, который отсутствует у САФ.

Для ширины ЮПФЗ можно выделить три участка с соответствующими паттернами изменчивости: атлантический (западная граница — район моря Скотия, восточная — от нулевого меридиана до 2° в. д.; мощный выброс в районе нулевого меридиана объясняется отсутствием временных рядов на участке между этим меридианом и 3,75° з. д.), индоокеанский (восточная граница — в районе о. Тасмания) и тихоокеанский (между Тасманией и морем Скотия). Аналогичные участки выделяются также для САФ и ПФ в отдельности, однако эти фронты имеют значительное количество близко расположенных выбросов, образующих группы, и, скорее всего, являются проявлениями особого рода переходных зон между паттернами изменчивости. Полученные участки довольно точно повторяют принятое в научном сообществе деление Южного океана на атлантический, индоокеанский и тихоокеанский сектора, что подтверждает адекватность результатов и говорит о возможности использования предложенных методик исследования в изучении других климатических фронтов.

Заключение

По итогам анализа массива, основанного на комбинации спутниковых и натуральных данных, получены оценки изменчивости ширины ЮПФЗ, проанализирована степень линейной взаимосвязи между изменчивостью соседних участков отдельно для САФ и ПФ. Показано, что, несмотря на тесную согласованность изменчивости контуров САФ и ПФ при движении с запада на восток, изменчивость ширины ЮПФЗ неоднородна по пространству. Выполнено районирование ЮПФЗ на три участка с определёнными паттернами изменчивости: атлантический, индоокеанский и тихоокеанский.

Результаты работы уточняют имеющиеся представления о синоптической изменчивости крупнейшей фронтальной зоны Мирового океана и вкладе образующих её фронтов в эту изменчивость.

Выявленные признаки несогласованности в изменчивости САФ и ПФ нуждаются в уточнении. В связи с этим основным направлением дальнейшей работы видится сопоставление изменчивости противоположащих участков САФ и ПФ. Многообещающим представляется также сопоставление полученных в настоящей работе оценок значений ширины ЮПФЗ и результатов секвентивного анализа коэффициентов корреляции с данными о глубине океана, значениями ряда климатических индексов, интенсивности ветровой циркуляции и расхода АЦТ.

Видится оправданным и успешным применение в настоящей работе метода секвентивных корреляций. Его использование позволило в сжатом виде охарактеризовать степень согласованности изменчивости между соседними по пространству временными рядами для каждого из фронтов и ЮПФЗ в целом.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-20112).

Литература

1. 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.
2. Гордеева С. М., Малинин В. Н. Крупномасштабная изменчивость Южного Субтропического фронта в Юго-Восточной части Тихого океана // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2006. № 2. С. 160–169.
3. 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.
4. Коник А. А., Атаджанова О. А., Зимин А. В. Фронтальные зоны Баренцева и Карского морей // Процессы в геосредах. 2018. № 3(17). С. 239–240.
5. Масленников В. В. Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М.: ВНИРО, 2003. 295 с.
6. Никитин А. А. Основные черты пространственного распределения поверхностных термических фронтов в водах Японского моря и их изменчивость // Исследование Земли из космоса. 2006. № 5. С. 49–62.
7. Фуке В. Р. О возможности оценки положения фронтальных зон в океане по данным спутниковых измерений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2009. Т. 2. № 1. С. 29–34.
8. Belkin I., O'Reilly J. An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery // J. Marine Systems. 2009. V. 78. P. 319–326.
9. Graham R., de Boer A., Heywood K., Chapman M., Stevens D. Southern Ocean fronts: Controlled by wind or topography? // J. Geophysical Research. 2012. V. 117. C08018. 14 p. DOI: 10.1029/2012JC007887.
10. Kostianoy A., Ginzburg A. I., Frankignoulle M., Delille B. Fronts in the Southern Indian Ocean as inferred from satellite sea surface temperature data // J. Marine Systems. 2004. V. 45(1-2). P. 55–73.
11. Moore J. K., Abbott M. R., Richman J. G. Location and dynamics of the Antarctic Polar Front from satellite sea surface temperature data // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. P. 3059–3073.

12. Orsi A. H., Whitworth III T., Nowlin Jr. W. D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // *Deep-Sea Research I*. 1995. V. 42. P. 641–673.
13. Park Y.-H., Charriaud E., Fieux M. Thermohaline structure of Antarctic surface water/winter water in the Indian sector of the Southern Ocean // *J. Marine Systems*. 1998. V. 17. P. 5–23.
14. Pascual A., Ruiz S., Olita A., Troupin C., Claret M., Casas B., Mourre B., Poulain P.-M., Tovar-Sanchez A., Capet A., Mason E., Allen J. T., Mahadevan A., Tintoré J. A Multiplatform Experiment to Unravel Meso- and Submesoscale Processes in an Intense Front (AlborEx) // *Frontiers in Marine Science*. 2017. V. 4. Iss. 39. DOI: 10.3389/fmars.2017.00039.
15. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. 2nd ed. N. Y.: Cambridge University Press, 1992. 925 p.
16. Sallée J. B., Speer K., Morrow R. Southern Ocean fronts and their variability to climate modes // *J. Climate*. 2008. V. 21. Iss. 12. P. 3020–3039.
17. Santoso A., England M. Antarctic Intermediate Water Circulation and Variability in a Coupled Climate Model // *J. Physical Oceanography*. 2004. V. 34. P. 2160–2179.
18. Sokolov S., Rintoul S. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 2. Variability and relationship to sea surface height // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. C11019. DOI: 10.1029/2008JC005248.
19. Thompson A. F., Sallée J. B. Jets and Topography: Jet Transitions and the Impact on Transport in the Antarctic Circumpolar Current // *J. Physical Oceanography*. 2012. V. 42. P. 956–972.
20. Vinuchandran R., Ramakrishnan D. Detection of Fronts from Ocean Colour Monitor Images Using Entropic Technique: A Case Study of Meso and Micro-Scale Chlorophyll Mapping in Bay of Bengal, India // *Advances in Remote Sensing*. 2013. V. 2. Iss. 2. P. 71–76.

The analysis of spatiotemporal variability of the Southern Polar frontal zone width in 1992–2012

P. S. Petkilev

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: petkilev.pavel@yandex.ru

The well-known time series dataset based on a combination of contact measurements data and satellite altimetry was analyzed to investigate circumpolar spatiotemporal variability of the Southern Polar frontal zone' width and the positions of the Subantarctic and Southern Polar fronts. The sequence analysis was used as the main method of the study. Sequences of (1) basic statistics of the fronts positions and (2) Spearman correlation coefficient values between neighboring timeseries of the frontal zone width and fronts position were analyzed. It was shown that variability of the Southern Polar frontal zone width is inhomogeneous in space, despite the close coordination of variability of the Subantarctic and Southern Polar fronts contours. On the scales of the Southern Polar frontal zone, three areas with different patterns of variability were detected: Atlantic, Indian and Pacific. The greatest variability (in respect to the average) of the Southern Polar frontal zone width was found in its narrow sections.

Keywords: fronts in the ocean, Southern Polar front, Subantarctic front, Southern Polar frontal zone

Accepted: 10.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-192-202

References

1. Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., *Struktura i sezonnaya izmenchivost' krupnomasshtabnykh frontov Atlanticheskogo okeana po sputnikovym dannym (The Structure and Seasonal Variability of the Large-Scale Fronts in the Atlantic Ocean on the Basis of Satellite Data)*, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 4, pp. 62–75.

2. Gordeeva S. M., Malinin V. N., Krupnomasshtabnaya izmenchivost' Yuzhnogo Subtropicheskogo fronta v Yugo-Vostochnoi chasti Tikhogo okeana (Large-scale variability of the Southern Subtropical front in the South-Eastern part of the Pacific Ocean), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2006, No. 2, pp. 160–169.
3. Kazmin A. S., Izmenchivost' krupnomasshtabnykh okeanicheskikh frontal'nykh zon: analiz global'noi sputnikovoi informatsii (Variability of the large-scale oceanic frontal zones: analysis of the global satellite information), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 213–218.
4. Konik A. A., Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Frontal'nye zony Barentseva i Karskogo morei (Frontal zones of the Barents and Kara Seas), *Protsesty v geosredakh*, 2018, No. 3(17), pp. 239–240.
5. Maslennikov V. V., *Klimaticheskie kolebaniya i morskaya ekosistema Antarktiki* (Climate fluctuation and the marine ecosystem of Antarctica), Moscow: Izd. VNIRO, 2003, 295 p.
6. Nikitin A. A., Osnovnye cherty prostranstvennogo raspredeleniya poverkhnostnykh termicheskikh frontov v vodakh Yaponskogo morya i ikh izmenchivost' (Basic Elements of Spatial Distribution of Superficial Thermal Fronts in Waters of the Japan Sea and their Variability), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 5, pp. 49–62.
7. Fuks V. R., O vozmozhnosti otsenki polozheniya frontal'nykh zon v okeane po dannym sputnikovykh izmereniy (On Estimation of an Ocean Front Location Depending on the Satellite Measurements), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2009, Vol. 2, No. 1, pp. 29–34.
8. Belkin I., O'Reilly J., An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery, *J. Marine Systems*, 2009, Vol. 78, pp. 319–326.
9. Graham R., de Boer A., Heywood K., Chapman M., Stevens D., Southern Ocean fronts: Controlled by wind or topography? *J. Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, C08018, 14 p., DOI: 10.1029/2012JC007887.
10. Kostianoy A., Ginzburg A. I., Frankignoulle M., Delille B., Fronts in the Southern Indian Ocean as inferred from satellite sea surface temperature data, *J. Marine Systems*, 2004, Vol. 45(1-2), pp. 55–73.
11. Moore J. K., Abbott M. R., Richman J. G., Location and dynamics of the Antarctic Polar Front from satellite sea surface temperature data, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, pp. 3059–3073.
12. Orsi A. H., Whitworth III T., Nowlin Jr. W. D., On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep-Sea Research I*, 1995, Vol. 42, pp. 641–673.
13. Park Y.-H., Charriaud E., Fieux M., Thermohaline structure of Antarctic surface water/winter water in the Indian sector of the Southern Ocean, *J. Marine Systems*, 1998, Vol. 17, pp. 5–23.
14. Pascual A., Ruiz S., Olita A., Troupin C., Claret M., Casas B., Mourre B., Poulain P.-M., Tovar-Sanchez A., Capet A., Mason E., Allen J. T., Mahadevan A., Tintoré J., A Multiplatform Experiment to Unravel Meso- and Submesoscale Processes in an Intense Front (AlborEx), *Frontiers in Marine Science*, 2017, Vol. 4, Issue 39, DOI: 10.3389/fmars.2017.00039.
15. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P., *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, 2nd ed., New York: Cambridge University Press, 1992, 925 p.
16. Sallée J. B., Speer K., Morrow R., Southern Ocean fronts and their variability to climate modes, *J. Climate*, 2008, Vol. 21, Issue 12, pp. 3020–3039.
17. Santoso A., England M., Antarctic Intermediate Water Circulation and Variability in a Coupled Climate Model, *J. Physical Oceanography*, 2004, Vol. 34, pp. 2160–2179.
18. Sokolov S., Rintoul S., Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 2. Variability and relationship to sea surface height, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, C11019, DOI: 10.1029/2008JC005248.
19. Thompson A. F., Sallée J. B., Jets and Topography: Jet Transitions and the Impact on Transport in the Antarctic Circumpolar Current, *J. Physical Oceanography*, 2012, Vol. 42, pp. 956–972.
20. Vinuchandran R., Ramakrishnan D., Detection of Fronts from Ocean Colour Monitor Images Using Entropic Technique: A Case Study of Mesoand Micro-Scale Chlorophyll Mapping in Bay of Bengal, India, *Advances in Remote Sensing*, 2013, Vol. 2, Issue 2, pp. 71–76.