

# Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.46 (265+267+269)

Ю.В. Артамонов, А.В. Федирко, Е.А. Скрипалёва

## Сезонная изменчивость переносов Антарктического циркумполярного течения на основе контактных, спутниковых данных и океанического реанализа

На основе климатического гидрологического массива *World Ocean Atlas-2009*, океанического реанализа *ECMWF ORA-S3* и массива аномалий уровня океана по данным спутниковой альтиметрии исследована сезонная изменчивость переносов Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) в верхнем 50-метровом слое. Проанализированы пространственно-временные взаимно-корреляционные функции между переносами АЦТ и составляющими скорости ветра из массива реанализа *NCEP/NCAR* и выделены области, в которых отмечается значимое влияние поля ветра на сезонную изменчивость АЦТ. Установлено, что при нулевом пространственно-временном сдвиге положительные корреляционные связи между переносами и зональной составляющей скорости ветра прослеживаются примерно между  $60^\circ$  з. д. и Гринвичем, отрицательные – между  $90$  и  $130^\circ$  з. д., между Гринвичем и  $120^\circ$  в. д. Между меридиональной составляющей скорости ветра и переносами АЦТ на большей части Южного океана преобладает отрицательная корреляция.

**Ключевые слова:** геострофическая скорость, перенос, аномалии уровня океана, сезонная изменчивость, Южный океан, Антарктическое циркумполярное течение, поле ветра.

### Введение

С появлением новых технологий, позволяющих проводить длительные измерения характеристик океана, резко увеличилось количество работ, посвященных исследованию изменчивости циркуляции вод в Южном океане. Уже в конце прошлого века было показано, что на внутрисезонном (синоптическом) масштабе баротропная изменчивость переносов АЦТ тесно связана с изменениями придонного давления или уровня океана [1]. Позднее в работе [2] на основе численного моделирования было установлено, что корреляция между изменчивостью придонного давления и переносами АЦТ проявляется не только на синоптическом и сезонном временных масштабах, но и на декадном. В 80 – 90 гг. прошлого века появились исследования, в которых показана связь изменчивости переносов АЦТ с полем ветра. В [3, 4] на основе сравнения изменений придонного давления и напряжения поля ветра в проливе Дрейка выявлено, что влиянием ветра можно объяснить большую часть изменчивости переноса АЦТ. В работе [5] показано, что внутрисезонная изменчивость переноса АЦТ (с некоторым запаздыванием) вызвана изменчивостью западных ветров, связанной, в свою очередь, с Антарктическим колебанием (ААК). В последующих исследованиях на основе данных наблюдений подтверждено, что переносы АЦТ зависят от индекса ААК на временных масштабах от нескольких дней и недель [6, 7] до нескольких лет [8, 9].

© Ю.В. Артамонов, А.В. Федирко, Е.А. Скрипалёва, 2014

В целом большая часть исследований указывает на связь изменчивости переносов АЦТ с вариациями поля ветра, вместе с тем вопрос, на каком временном масштабе наиболее четко проявляется эта взаимосвязь, пока недостаточно изучен. Например, в работе [8] показано, что изменения уровня океана в Антарктике и, следовательно, переносы АЦТ хорошо коррелируют с индексом ААК на внутрисезонном масштабе. В работе [10] авторы, используя данные регулярно выполняемых гидрологических разрезов в проливе Дрейка и спутниковой альтиметрии за 13 лет, пришли к заключению, что на этом временном масштабе не наблюдается явной связи между индексом ААК и поверхностными течениями в проливе. Аналогичный вывод получен для южной части Индийского океана в работе [11], в которой показано, что реакция поверхностной циркуляции на сезонные изменения зонального ветра невелика. В то же время авторы этой работы отмечают, что в некоторых районах (например в районе архипелага Кергелен) такая реакция значима. Анализ распределений коэффициентов линейной корреляции между внутригодовыми аномалиями составляющих скорости ветра и геострофических переносов АЦТ в целом показал, что значимое влияние поля ветра на изменчивость переносов АЦТ наиболее четко проявляется в Тихоокеанском и Атлантическом секторах [12].

Изменчивости переносов в зоне Антарктического циркумполярного течения посвящено огромное количество исследований, но реакция на атмосферное воздействие на разных временных масштабах трактуется в них не всегда однозначно. В значительной степени это связано с тем, что в полярных широтах наблюдается высокий уровень межгодовой изменчивости динамики вод, который сопоставим с сезонной и синоптической изменчивостью [13, 14]. При недостаточном количестве экспериментальных данных и относительно низком разрешении модельных расчетов в суперпозиции этих сигналов не всегда удается правильно выделить океанический отклик на изменчивость поля ветра одного определенного масштаба.

В настоящее время накоплен почти 20-летний ряд аномалий уровня океана (АУО). Их осреднение для каждого месяца за все годы позволяет существенно сгладить высокочастотные и межгодовые вариации и получить среднемесячные климатические нормы значений АУО. Использование этих значений совместно с архивными гидрологическими данными дает возможность существенно продвинуться в понимании закономерностей сезонной изменчивости течений. Кроме того, широкие перспективы раскрывает привлечение к анализу массивов, включающих не только архивные гидрологические и альтиметрические данные, но и современные инструментальные измерения течений. К таким массивам относится последняя версия океанического реанализа *ECMWF ORA-S3* [15].

Цель настоящей работы – на основе современных гидрологических, спутниковых данных и модельных расчетов из океанического реанализа исследовать сезонную изменчивость переносов в верхнем слое АЦТ и оценить ее связь с изменчивостью поля ветра над Южным океаном.

## Материалы и методика

В работе использовались следующие массивы:

– климатический массив среднемесячных значений температуры и солености в узлах одноградусной сетки на стандартных горизонтах от поверхности до 1500 м *World Ocean Atlas-2009 (WOA-09)* [16];

– массивы среднемесячных значений последовательно для каждого года: температуры, солености и составляющих скорости течений, рассчитанных на основе общей модели циркуляции океана *HOPE* [17] в узлах одноградусной сетки из реанализа *ECMWF ORA-S3* [18] за период 1959 – 2012 гг.; АУО по альтиметрическим измерениям в узлах регулярной сетки с шагом  $1/3^\circ$  [19] за период 1993 – 2009 гг. с учетом всех поправок, определяемых методами спутниковой альтиметрии [20]; зональной  $U_w$  и меридиональной  $V_w$  составляющих скорости ветра в узлах одноградусной сетки из реанализа *NCEP/NCAR* [21] за период 1948 – 2008 гг. По среднемесячным значениям параметров для каждого года были рассчитаны их климатические среднемесячные значения за период 1993 – 2009 гг.

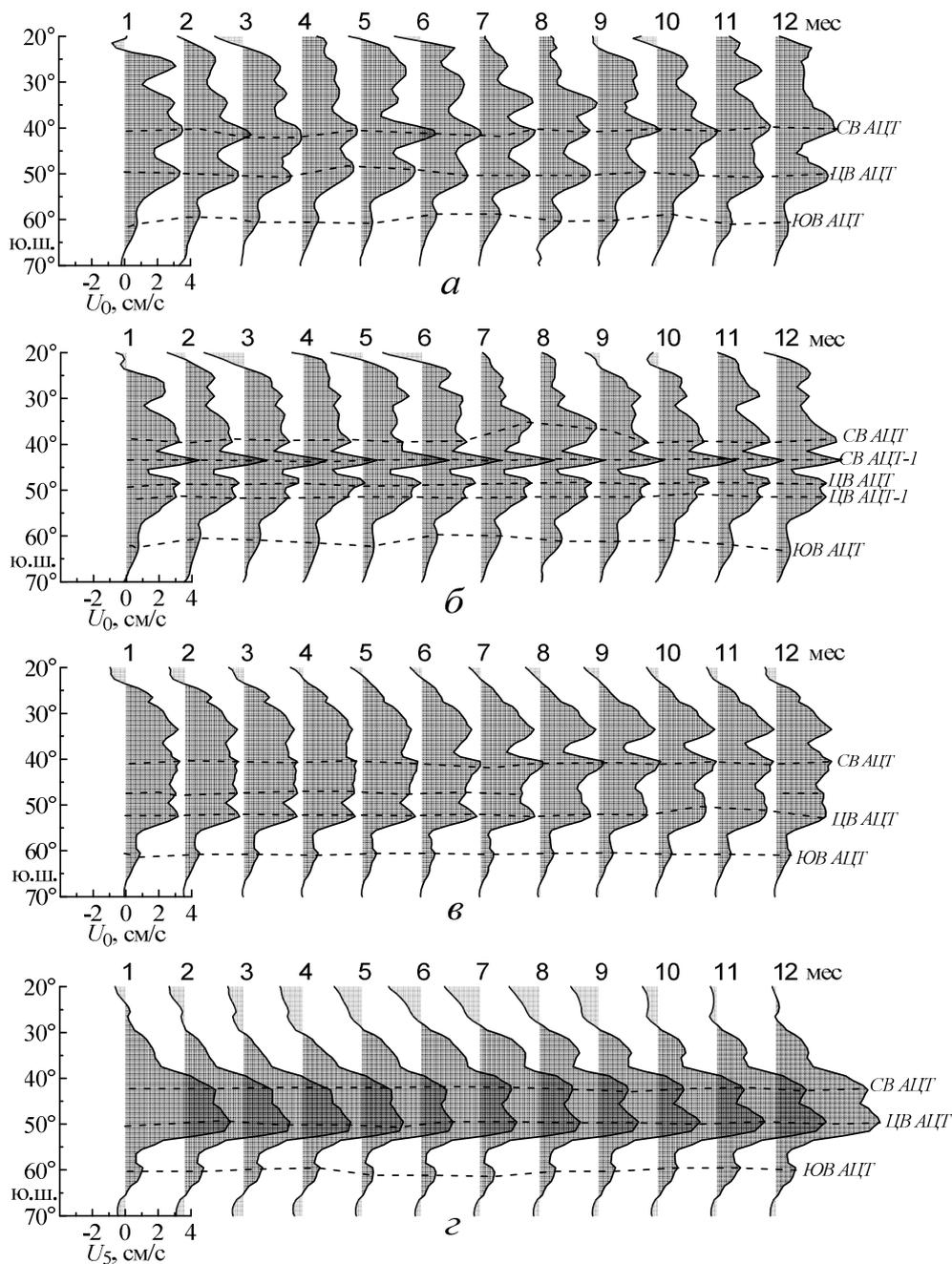
При расчете геострофических скоростей течений на поверхности океана динамические высоты вычислялись различными способами: по гидрологическим данным массива *WOA-09* (метод 1); как сумма среднемесячных значений АУО, проинтерполированных в узлы одноградусной сетки, и среднегодовой динамической топографии, рассчитанной по данным *WOA-09* (метод 2); по гидрологическим данным реанализа *ORA-S3* (метод 3). Далее по тексту используются обозначения М1, М2 и М3. Анализ климатических среднемесячных модельных скоростей условно назван методом 4 (М4).

Поскольку АЦТ имеет зональный характер, в данной работе основное внимание уделялось анализу зональной составляющей скорости течений  $U$ . Сравнение геострофических течений, рассчитанных разными методами, показало, что крупномасштабные черты их структуры в общем совпадают. В то же время в некоторых случаях наблюдаются различия (рис. 1, 2). Не всегда совпадают количество экстремумов – разное количество ветвей АЦТ, положения их осей и величины скорости. Особенно большие различия наблюдаются между геострофическими течениями (М1 – М3) и течениями, полученными на основе общей модели циркуляции океана *HOPE* (М4), при расчете которых учитывается и дрейфовая составляющая скорости.

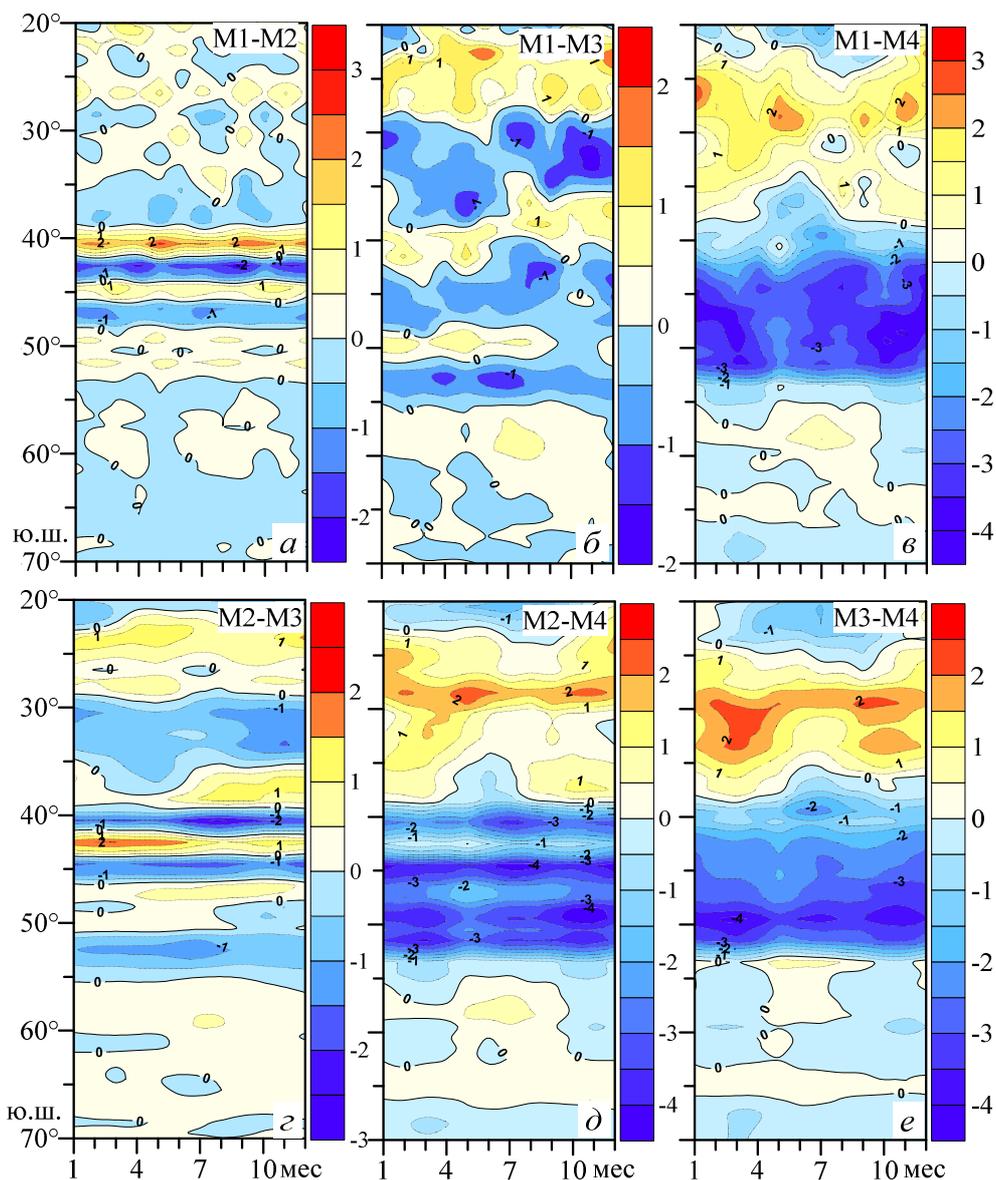
Тестовые расчеты геострофических течений от разных отсчетных поверхностей (500, 1000, 1500 м) показали, что при уменьшении глубины отсчетной поверхности сходимость результатов по разным методам улучшается. Вероятно, это связано с тем, что на больших глубинах, где мало данных, использование разных процедур их пространственно-временной интерполяции вносит свои различия в значения скоростей течений.

Для оценки количественных различий между абсолютными значениями скоростей течений, полученными разными методами, были рассчитаны их разности. На рис. 2 в качестве примера представлено широтно-временное распределение этих величин вдоль  $30^\circ$  з. д. На севере региона между  $20^\circ$  и  $25^\circ$  ю. ш., где проходит Южная ветвь Южного Пассатного течения, наблюдаются отрицательные значения разности (до  $-1,5$  см/с) между геострофическими скоростями, полученными по методам М1 – М3, и скоростями по ме-

туду М4. Это свидетельствует о том, что значения скоростей с учетом дрейфовой составляющей по модельным расчетам из реанализа *ORA-S3* в этом районе выше, чем полученные по другим методам.



**Р и с. 1.** Среднемесячные профили зональной геострофической скорости  $U_0$  (см/с) на поверхности океана, рассчитанной по методам М1 (а), М2 (б), М3 (в) относительно отсчетной поверхности 500 м, и зональной скорости  $U_5$  на горизонте 5 м, рассчитанной по методу М4 (г), вдоль 30° з. д. Штриховые линии – положение стречней ветвей АЦГ: Северной (СВ), Центральной (ЦВ), Южной (ЮВ)



**Р и с. 2.** Распределение по широте и месяцам величин разности (см/с) между абсолютными значениями зональных скоростей, полученными различными методами, вдоль 30° з. д.: M1 – M2 (а), M1 – M3 (б), M1 – M4 (в), M2 – M3 (г), M2 – M4 (д), M3 – M4 (е)

В центральной части Южного субтропического антициклонического круговорота (25 – 35° ю. ш.), где вклад дрейфовой составляющей в модельных скоростях ослабевает, между значениями скоростей по методам M1 – M3 и по методу M4 наблюдаются большие различия (до 2,5 см/с). Здесь значения скоростей по модельным расчетам из реанализа *ORA-S3* ниже полученных по другим методам.

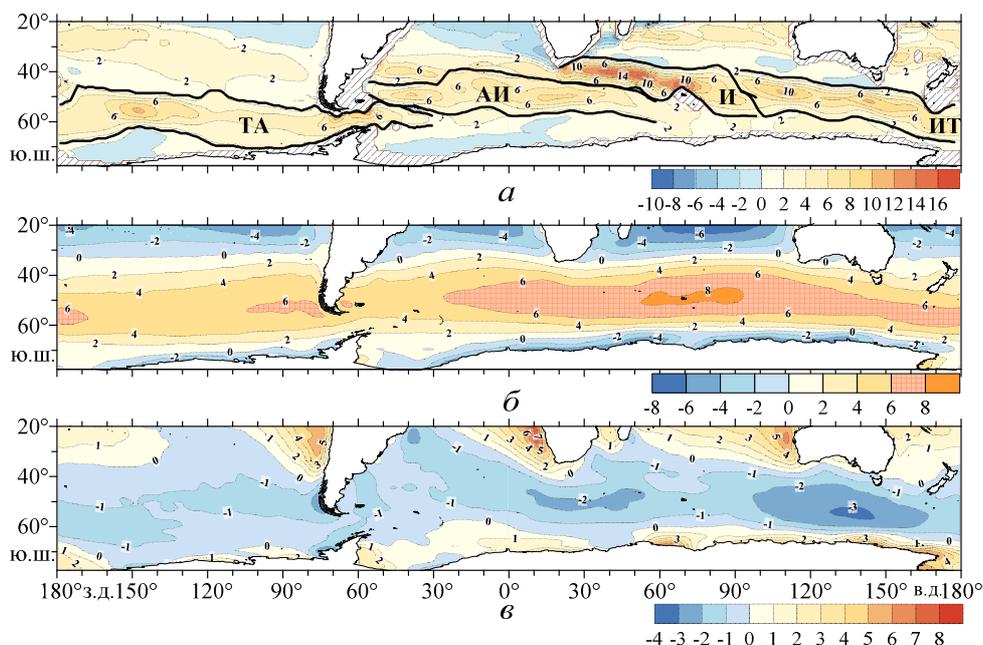
В зоне АЦТ в распределении разностей скоростей по методам М1 – М3 хорошо выражено чередование областей разного знака в меридиональном направлении, что свидетельствует о широтных различиях в положении ветвей АЦТ, полученных этими методами. Значения разностей скоростей при использовании методов М1 – М3 и М4, как правило, отрицательные. Они достигают 4 – 5 см/с, т. е. в зоне АЦТ модельные значения скорости из массива реанализа *ORA-S3* за счет увеличения вклада дрейфовой составляющей снова заметно выше, чем по результатам геострофических расчетов. К югу от АЦТ, где интенсивность течения ослабевает, различия в скоростях, полученных разными методами, уменьшаются и не превышают 1 см/с.

В общем случае выявленные различия обусловлены несколькими причинами: неравномерной пространственно-временной обеспеченностью гидрологических данными, различными методиками расчета геострофических скоростей (М1 – М3), учетом дрейфовой составляющей скорости и инструментальных данных в реанализе *ORA-S3*. Кроме методических различий, общую картину усложняет физическая изменчивость течений, которая проявляется в том, что в некоторые месяцы и годы отдельные ветви АЦТ могут сливаться в единый поток или вообще исчезать.

Чтобы минимизировать методические различия и физические неопределенности при выделении отдельных ветвей АЦТ, для оценки сезонной изменчивости АЦТ разными методами был использован интегральный подход. На каждом меридиане с дискретностью  $1^\circ$  по долготе были рассчитаны единичные одноградусные переносы  $Q$ , которые затем были просуммированы в широтных диапазонах, охватывающих зону АЦТ. Для выделения этих широтных диапазонов на меридиональных разрезах анализировались распределения среднегодовых зональных геострофических скоростей, рассчитанных относительно 1500 м по М1. В некоторых районах Южного океана можно выделить два основных климатических максимума скорости, соответствующих отдельным ветвям АЦТ, поэтому в этих районах расчетные области перекрывают друг друга. В связи с этим вся акватория Южного океана была условно разделена на четыре сектора, в каждом из которых наблюдался только один максимум скорости АЦТ: Тихоокеанско-Атлантический (ТА) ( $180 - 30^\circ$  з. д.), Атлантико-Индooкеанский (АИ) ( $60^\circ$  з. д. –  $60^\circ$  в. д.), Индоокеанский (И) ( $20 - 100^\circ$  в. д.) и Индоокеанско-Тихоокеанский (ИТ) ( $90 - 180^\circ$  в. д.) (рис. 3, а).

Геострофические переносы АЦТ вычислялись по скоростям, рассчитанным относительно отсчетных поверхностей 500 м (в пределах изотак  $U > 1$  см/с), 1000 и 1500 м (в пределах изотак  $U > 2$  см/с). При расчете переносов по модельным скоростям, полученным по М4, использовалось условие  $U > 1$  см/с. Так же, как и при расчете скоростей, сходимость результатов расчета переносов разными методами была лучше при уменьшении глубины отсчетной поверхности.

При анализе сезонной изменчивости АЦТ рассматривалась только верхняя 50-метровая часть общего переноса. Этот слой, наиболее подверженный влиянию атмосферы, характеризуется относительно однородной вертикальной структурой.



**Р и с. 3.** Распределения среднегодовых значений геострофической скорости  $U_0$  (см/с) по данным WOA-09 относительно отсчетной поверхности 1500 м (жирными линиями выделены секторы, где прослеживаются отдельные ветви АЦТ; области с глубиной меньше 1500 м заштрихованы) – *а*, а также зональной  $U_w$  – *б* и меридиональной  $V_w$  – *в* составляющих скорости ветра (м/с)

В работе выполнены оценки интенсивности сезонной изменчивости переносов и составляющих скорости ветра. Изменчивость составляющих скорости ветра анализировалась по распределению их максимумов на каждом меридиане в пределах широтного диапазона 30 – 65° ю. ш. Далее вычислялись аномалии переносов и скоростей ветра как разность между величиной параметра для данного климатического месяца и его среднегодовым значением на данном меридиане, а также их внутригодовые среднеквадратические отклонения (СКО).

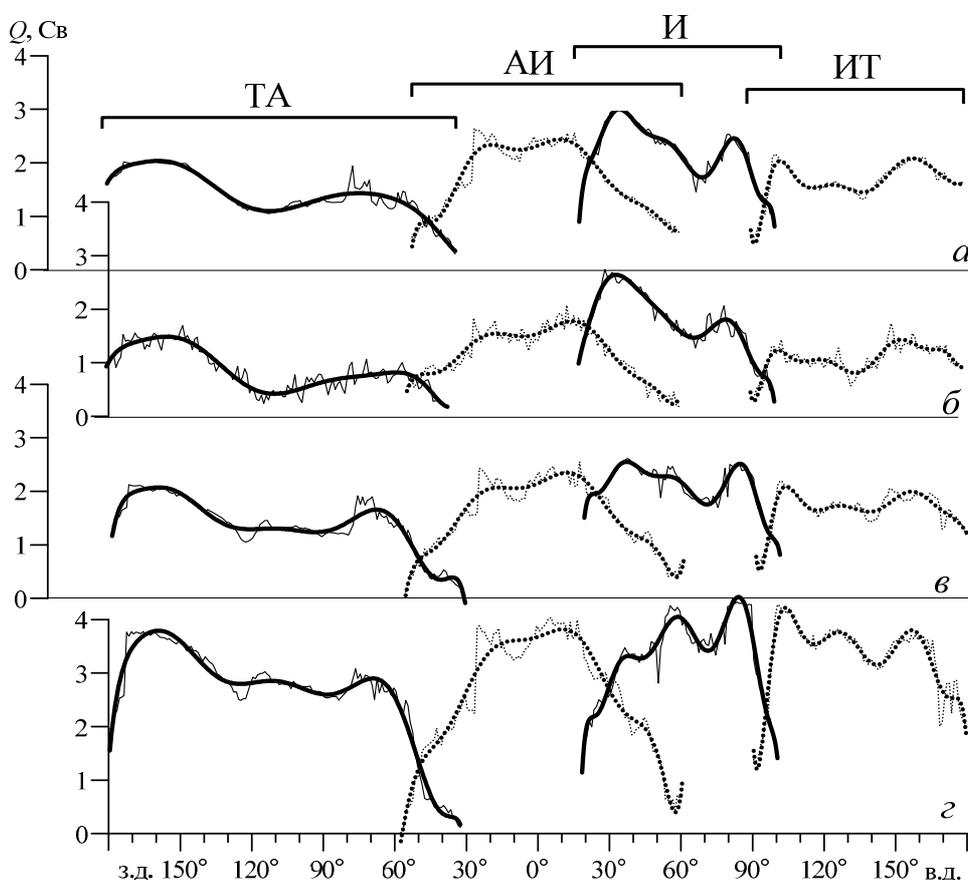
Для количественной оценки связи изменчивости переносов и составляющих скорости ветра были рассчитаны временные и пространственные взаимно-корреляционные функции между внутригодовыми рядами среднемесячных величин этих параметров. Для каждого месяца рассчитывались корреляционные связи между переносом на данном меридиане и значениями составляющих скорости ветра последовательно во всем циркумполярном круге с шагом 1° по долготе. Затем ряды составляющих скорости ветра сдвигались относительно ряда переносов с таким же шагом в направлении с запада на восток. Это позволило связать сезонную изменчивость переносов не только с локальным ветром, но и с ветровым режимом более отдаленных районов Южного океана.

Положительная (отрицательная) корреляция между  $U_w$  и  $Q$  означает, что усиление зональных западных ветров сопровождается увеличением (уменьшением) переносов АЦТ. Положительная (отрицательная) корреляция между

$V_w$  и  $Q$  свидетельствует о том, что усиление меридиональных северных ветров сопровождается уменьшением (увеличением) расходов АЦТ.

### Основные результаты

Среднегодовые распределения составляющих скорости ветра, геострофической скорости на поверхности океана и переносов. В распределениях среднегодовых значений  $U_w$  и  $V_w$  южнее  $40^\circ$  ю. ш., где преобладает ветер с положительной зональной (западной) и отрицательной меридиональной (северной) составляющими, можно выделить несколько областей экстремальных значений. Рост  $U_w$  наблюдается в восточной части Атлантического сектора Южного океана, в Индоокеанском секторе и у западных берегов Южной Америки (рис. 3, б). Наибольшие значения ( $> 8$  м/с) отмечаются в Индийском океане между  $50$  и  $90^\circ$  в. д. Значения  $V_w$  увеличиваются в трех районах, где ширина Южного океана уменьшается за счет материков: к югу от Африки, Австралии и Южной Америки (рис. 3, в). Максимальные по абсолютной величине среднегодовые значения  $V_w$  невелики ( $\sim 3$  м/с), они наблюдаются южнее Австралии между  $130$  и  $140^\circ$  в. д.



**Р и с. 4.** Распределения среднегодовых значений переносов (Св), рассчитанных по М1 (а), М2 (б), М3 (в), М4 (г) для каждого сектора Южного океана (сплошные кривые – секторы ТА и И, пунктир – секторы АИ и ИТ, жирные кривые – сглаживание полиномами 5-й степени)

Распределение среднегодовых переносов, рассчитанных по четырем методам, показывает их хорошее качественное соответствие (рис. 4). При этом положение основных максимумов переносов совпадает с положением среднегодовых максимумов зональной геострофической скорости (рис. 3, а; 4), т. е. пространственная структура среднегодовой интенсивности АЦТ по разным методам отражается одинаково. Вместе с тем положение среднегодовых экстремумов интенсивности АЦТ слабо согласуется с положением среднегодовых экстремумов скорости ветра, и по среднегодовым распределениям  $U_w$ ,  $V_w$ ,  $U$  и  $Q$  связь между полем ветра и циркуляцией вод явно не проявляется.

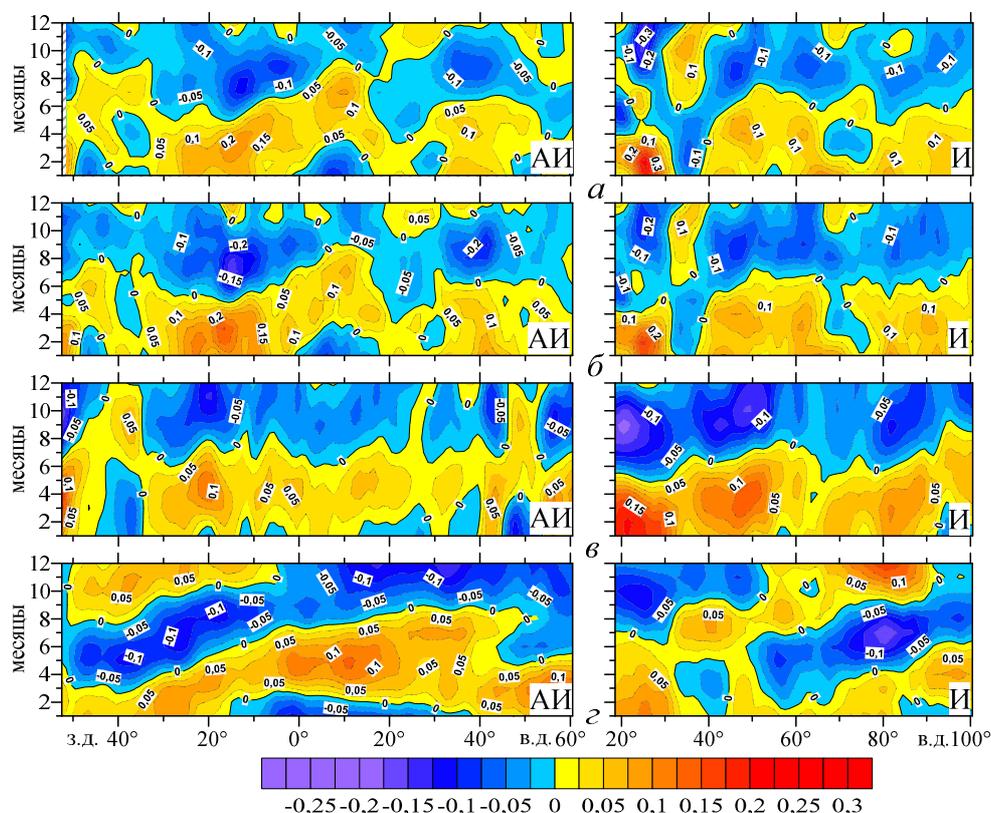
Сезонная изменчивость переносов в зоне АЦТ и составляющих скорости ветра. Анализ внутригодовых распределений аномалий переносов для четырех секторов Южного океана по результатам независимых расчетов в целом выявил общие закономерности. Сезонный сигнал переносов АЦТ характеризуется их положительными аномалиями в первую половину года (лето – осень Южного полушария) и отрицательными – во вторую (зима – весна Южного полушария). Наибольшее сходство в пространственном распределении внутригодовых аномалий прослеживается при расчетах методами М1 – М3. Устойчивый сезонный сигнал наблюдается в секторах ТА и АИ. Исключение составляют участки между  $130$  и  $150^\circ$  з. д.,  $55$  и  $70^\circ$  з. д. в секторе ТА, между  $30$  и  $50^\circ$  в. д. в секторе АИ, где в сезонном цикле явно прослеживается фазовый сдвиг. По мере продвижения на восток (секторы И и ИТ) сезонные вариации переносов в зоне АЦТ несколько ослабевают и сигнал более зашумлен.

Отметим, что по гидрологическим данным (М1) можно выделить области, где проявляется полугодовая периодичность, тогда как при расчетах с использованием данных альтиметрии (М2) полугодовой сигнал в этих областях не наблюдается. Такие различия, вероятно, связаны с разной обеспеченностью гидрологическими и альтиметрическими данными, и при расчете по М1 полугодовая периодичность может быть проявлением шума.

Более существенные отличия от сезонной изменчивости переносов по методам М1 – М3 показывают результаты с использованием модельных скоростей (М4). Это относится как ко времени появления экстремальных значений переносов, так и к положению областей максимальных аномалий. Например, в западной части сектора АИ наблюдается сдвиг годового сигнала на 2 – 3 месяца. Кроме того, область максимальных положительных аномалий в секторе АИ по методам М1 – М3 располагается между  $10$  и  $30^\circ$  з. д. (рис. 5, а – в), тогда как по методу М4 она смещена на восток и прослеживается между  $0^\circ$  и  $20^\circ$  в. д. (рис. 5, г). В восточной части Индийского океана по результатам расчетов методом М4 наблюдается тенденция к проявлению полугодового сигнала (рис. 5, г).

Общие особенности и различия в зависимости от метода расчета прослеживаются также в циркумполярных распределениях внутригодовых СКО среднемесячных аномалий переносов (рис. 6, а – г), характеризующих уровень их сезонной изменчивости. Максимальные значения СКО по методам М1 – М3 отмечаются в западных, пограничных с континентами, областях секторов АИ и И. По результатам расчетов по М4 эти максимумы не проявляются. В секторе ТА наблюдается интенсивный максимум СКО по данным

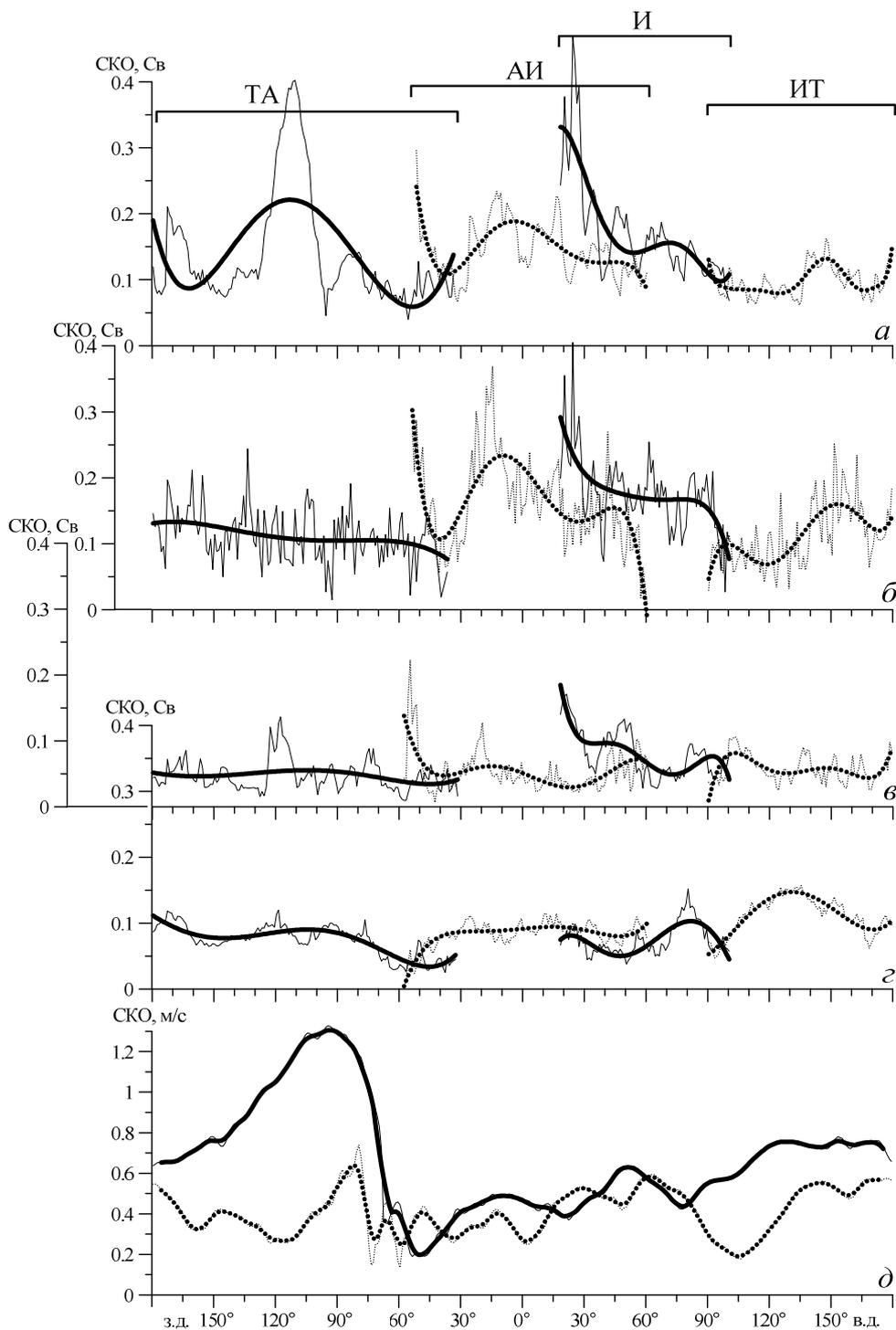
WOA-09 (M1) и более слабый – по модельным расчетам (M4). Далее на восток практически по всем методам наблюдается увеличение значений СКО в центральных частях секторов АИ, И, ИТ. Отметим, что общий уровень внутригодовой дисперсии аномалий переносов, рассчитанных по данным *ORA-S3* (M3 и M4), почти вдвое ниже уровня дисперсии переносов по M1 и M2.



**Р и с. 5.** Распределения внутригодовых аномалий переносов, рассчитанных по M1 (а), M2 (б), M3 (в), M4 (г), для сектора АИ (слева), сектора И (справа)

Несмотря на достаточно сложный характер внутригодовой изменчивости переносов, ее анализ совместно с распределением СКО составляющих скорости ветра (рис. 6, д) выявил некоторые общие закономерности, которые могут косвенно указывать на возможную связь между этими параметрами. Высокий уровень внутригодовой изменчивости зональной и меридиональной составляющих скорости ветра наблюдается в Тихоокеанском секторе между 70 и 120° з. д. (рис. 6, д). В этом районе по методам M1, M3, M4 отмечается увеличение значений СКО аномалий переносов (рис. 6, а, в, г).

Основной минимум СКО  $U_w$  прослеживается в Атлантике между 45 и 55° з. д. (рис. 6, д). В целом по всем методам расчетов в области этого минимума наблюдается уменьшение величин СКО аномалий переносов.



**Р и с. 6.** Распределения внутригодовых СКО аномалий переносов (Св), рассчитанных по М1 – а, М2 – б, М3 – в, М4 – г (сплошные кривые – секторы ТА и И, пунктир – секторы АИ и ИТ, жирные кривые – сглаживание полиномами 5-й степени), а также зональной (сплошная кривая) и меридиональной (пунктир) составляющих скорости ветра (м/с; жирные кривые – сглаживание скользящим средним по 9 точкам) – д

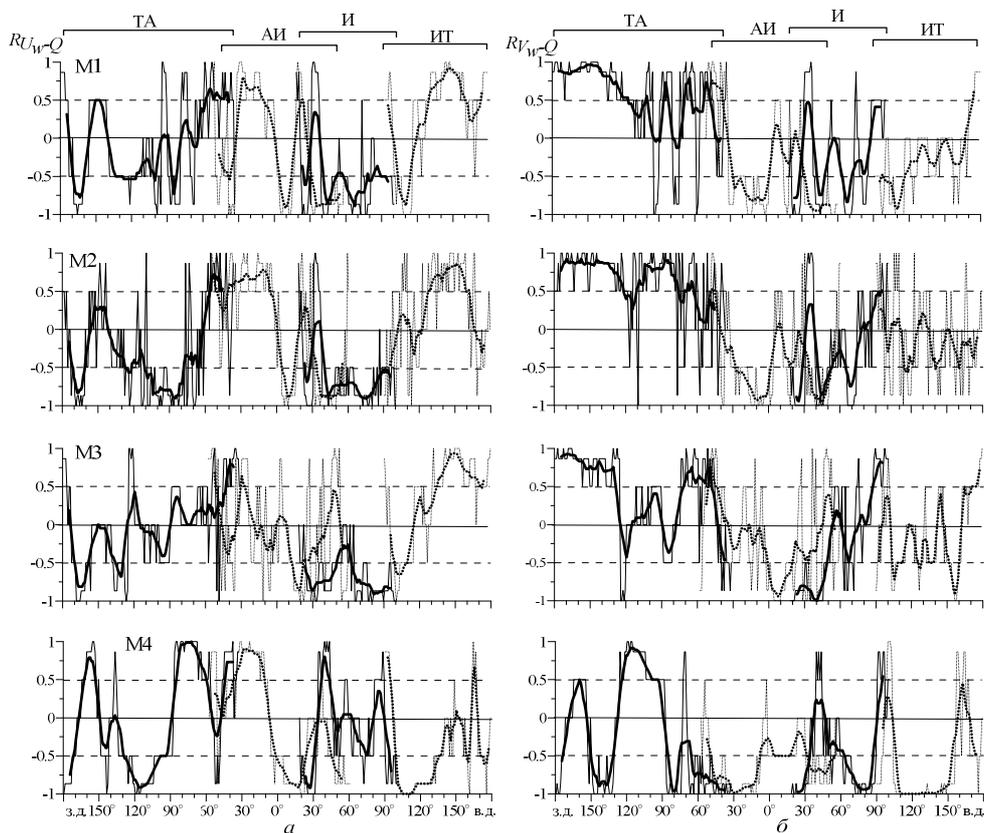
Далее по мере продвижения на восток значения СКО  $U_w$  постепенно увеличиваются, на этом фоне отмечаются максимумы между 20 и 10° з. д., 40 и 60° в. д., 120 и 180° в. д. В районах этих максимумов в секторах АИ и ИТ наблюдается увеличение значений СКО аномалий переносов. Хорошо выраженный минимум в распределении СКО меридиональной составляющей скорости ветра прослеживается между 90 и 120° в. д., здесь же отмечается уменьшение СКО аномалий переносов.

В целом можно констатировать, что при совпадении областей с экстремальными значениями СКО составляющих скорости ветра и переносов можно ожидать наличие связи между этими параметрами. Вместе с тем доминирующую роль в характере связей между полем ветра и переносами на сезонном масштабе играют сами формы их внутригодовых сигналов. На следующем этапе данной работы проанализируем корреляционные связи между годовыми гармониками сезонных циклов переносов и составляющих скорости ветра при нулевом временном сдвиге.

Распределения коэффициентов линейной корреляции между годовыми гармониками  $U_w$  и  $Q$  ( $R_{U_w-Q}$ ),  $V_w$  и  $Q$  ( $R_{V_w-Q}$ ) на каждом меридиане показывают заметные отличия. Это связано с тем, что при расчете переносов используются скорости, полученные разными методами. Тем не менее наблюдаются районы, где влияние поля ветра на изменчивость переносов АЦТ проявляется качественно одинаково (рис. 7). Отметим, что уровень значимости корреляции в этих районах при разных методах расчетов может изменяться, но характер связи (прямая корреляция или обратная) сохраняется.

Положительная связь при нулевом временном сдвиге между зональной составляющей скорости ветра и переносами АЦТ преобладает в секторах ТА и АИ примерно между 60° з. д. и Гринвичем по всем методам расчетов и в секторе ИТ восточнее 120° в. д. – по методам М1 – М3 (рис. 7, а). Отрицательные связи преобладают в секторе ТА примерно между 90 и 130° з. д. и в секторах АИ, И, ИТ в широком долготном диапазоне между Гринвичем и 120° в. д. На фоне этих крупномасштабных областей с корреляцией одного знака отмечаются локальные участки с противоположным знаком, но уровень корреляции  $R_{U_w-Q}$  на этих участках в основном незначим.

Связь между меридиональной составляющей скорости ветра и переносами АЦТ при нулевом временном сдвиге носит несколько иной характер (рис. 7, б). При расчетах по методам М1 – М3 во всем секторе ТА наблюдаются преимущественно положительные значения  $R_{V_w-Q}$ , по методу М4 в секторе ТА положительная связь прослеживается только между 90 и 130° з. д., 155 и 170° з. д. На большей части секторов АИ, И, ИТ по всем методам преобладают отрицательные значения  $R_{V_w-Q}$ . Положительные связи отмечены только на небольших участках акватории. Таким образом, в общем случае на большей части Южного океана, кроме Тихоокеанского сектора, при нулевом временном сдвиге преобладает обратная корреляционная связь между меридиональной составляющей скорости ветра и переносами, т. е. усиление (ослабление) скорости северного ветра сопровождается увеличением (уменьшением) переносов АЦТ.

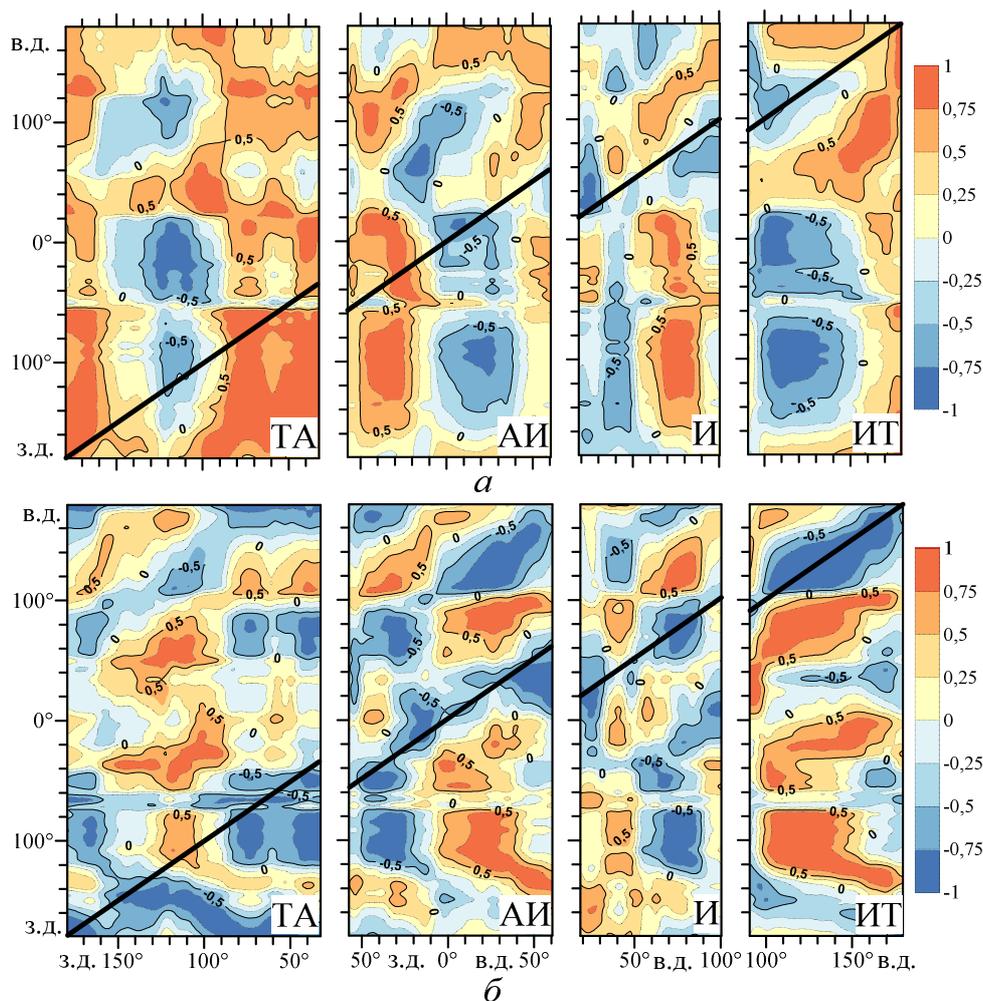


**Р и с. 7.** Распределения коэффициентов линейной корреляции между годовыми гармониками зональной (*а*) и меридиональной (*б*) составляющих скорости ветра и переносов, рассчитанных по М1 – М4 (сплошные кривые – секторы ТА и И, пунктир – секторы АИ и ИТ, жирные кривые – сглаживание скользящим средним по 9 точкам, штриховые линии – границы 95%-ного доверительного интервала)

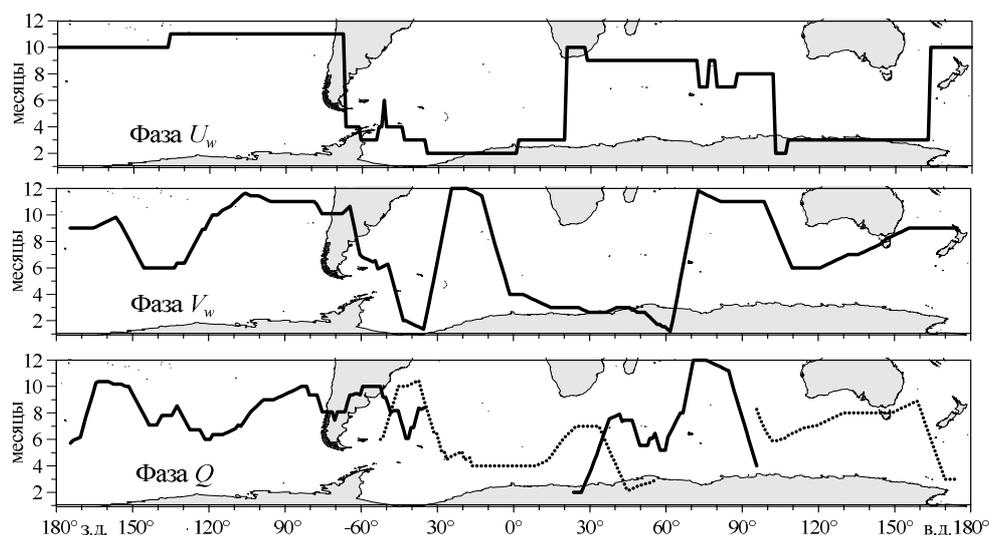
Структура корреляционных связей между внутригодовыми распределениями составляющих скорости ветра и переносов АЦТ при изменениях временного и пространственного сдвига. На рис. 8 для четырех секторов Южного океана представлены примеры распределения коэффициентов корреляции  $R$  при нулевом временном сдвиге  $\tau$  между сезонными циклами переносов по М4 и составляющих скорости ветра с разным пространственным сдвигом. Вдоль осей абсцисс показаны меридианы, на которых рассматривался сезонный цикл переносов, вдоль осей ординат – меридианы, на которых анализировался сезонный цикл составляющих скорости ветра.

Анализ пространственной корреляции при  $\tau = 0$  между зональным ветром и переносами ( $R_{U_w-Q}$ ) показал, что в каждом секторе Южного океана наблюдается чередование областей (рис. 8, *а* – вдоль осей абсцисс) с преобладающими связями одного знака практически для всего долготного диапазона, на котором рассматривалась изменчивость скорости ветра (рис. 8, *а* – вдоль осей ординат). Преобладание зон положительных и отрицательных связей вдоль большей части широтного круга согласуется с выводом работы [5], согласно

которому изменчивость переносов АЦТ связана с Антарктическим колебанием, т. е. с изменчивостью среднего зонального ветра над Южным океаном. Вместе с тем рис. 8, *a* отражает более сложную картину этого взаимодействия. Вдоль оси ординат на участках 50 – 60° з. д., 20 – 60° в. д. и 140° в. д. – 160° з. д. практически во всех секторах однородность зон с корреляцией одного знака нарушается. Здесь отмечается смена знака  $R_{U_w-Q}$ , обусловленная изменением фаз сезонных циклов скорости ветра, которые имеют свои особенности вблизи материков (рис. 9). Резкое изменение фазы сезонного цикла  $U_w$  наблюдается в проливе Дрейка, к югу от Африки и юго-восточнее Австралии. Характерно, что вблизи этих районов происходит заметное изменение фазы  $Q$ .



**Р и с. 8.** Распределения коэффициентов корреляции  $R$  между сезонными циклами переносов по М4 и зональной (*a*) и меридиональной (*б*) составляющих скорости ветра в зависимости от их пространственного сдвига с шагом 1° по долготе при нулевом временном сдвиге  $\tau$  (нижние границы 95%-ной значимости – изокоррелы  $\pm 0,5$ , жирные прямые – корреляция при отсутствии пространственного сдвига)



**Р и с. 9.** Распределения фаз (месяцев наступления максимумов) сезонных циклов составляющих скорости ветра и переносов. На нижнем рисунке сплошные кривые – секторы ТА и И, пунктир – секторы АИ и ИТ

Другой особенностью пространственной корреляции при нулевом временном сдвиге является тенденция к проявлению наиболее высоких положительных связей ( $R_{U_w-Q} \geq 0,75$ ) между переносами в секторах ТА, АИ, И (вдоль осей абсцисс) и скоростью зонального ветра в восточной части Тихого океана (вдоль осей ординат). Кроме того, в секторах АИ, И добавляется влияние ветров из Атлантики. В секторе ИТ наибольшее влияние на переносы оказывает ветер, действующий в центральной части Индийского океана.

Таким образом, пространственная структура связей между зональным ветром и переносами АЦТ при нулевом временном сдвиге показывает, что, несмотря на преобладание положительного знака корреляции вдоль большей части широтного круга, наибольшее влияние на переносы оказывает ветер из трех районов – восточной части Тихого океана, Атлантики и центральной части Индийского океана. Для отрицательных связей эта тенденция проявляется менее четко.

Структура связей между меридиональным ветром и переносами АЦТ ( $R_{V_w-Q}$ ), как и при действии зонального ветра, характеризуется чередованием областей с положительной и отрицательной корреляцией, но их пространственная ориентация заметно отличается (рис. 8, б). По мере продвижения по оси абсцисс с запада на восток зоны ветров, обуславливающих корреляцию того или иного знака, смещаются по оси ординат в восточном направлении. Особенно четко эта тенденция прослеживается восточнее пролива Дрейка, в Атлантике и Индийском океане. Такое смещение зон одинаковой корреляции свидетельствует о сохранении одинакового ветрового влияния на переносы при определенном ветровом сдвиге.

При взаимодействии переносов с меридиональным ветром в Тихом океане между 70 и 120° з. д., как и при действии зонального ветра, вдоль оси абс-

цисс наблюдается чередование областей с преобладающими связями одного знака. При ветрах, действующих примерно между  $120$  и  $170^\circ$  з. д., зоны одинаковой корреляции по мере продвижения по оси абсцисс на восток практически во всех секторах, в отличие от Атлантики и Индийского океана, смещаются по оси ординат на запад. Этот эффект пока не совсем понятен и требует дальнейшего более глубокого исследования.

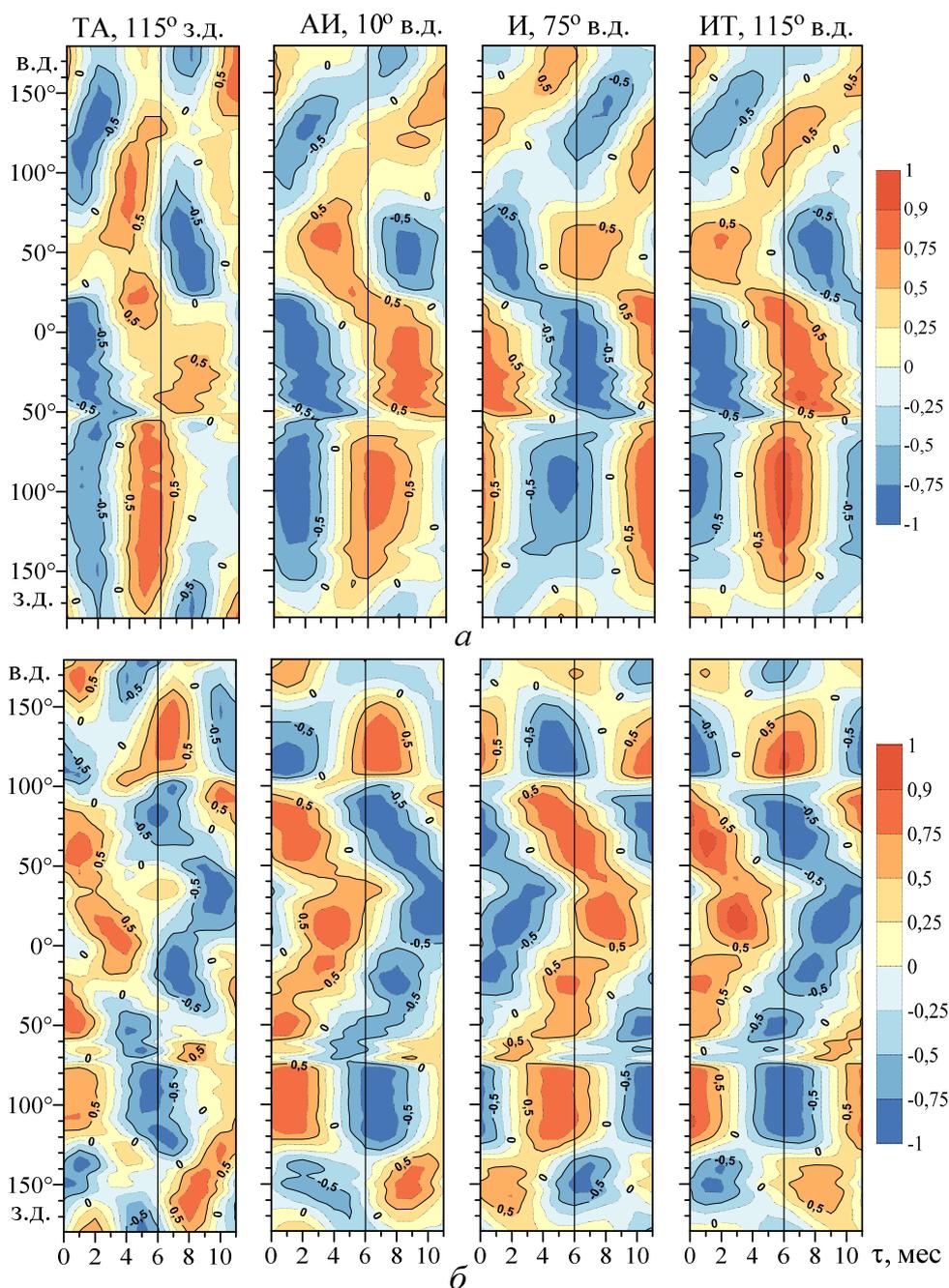
Анализ влияния поля ветра на изменчивость переносов в зависимости от пространственного и временного сдвига также выявил некоторые закономерности в смещении зон одинаковой корреляции. Примеры изменения структуры корреляционных связей в зависимости от сдвига  $\tau$  между составляющими скорости ветра для всего долготного диапазона и переносами АЦТ на отдельных меридианах в каждом секторе Южного океана представлены на рис. 10. Структура корреляционных связей на каждом из выбранных меридианов имеет свои особенности, проявляющиеся в основном в различиях временных сдвигов  $\tau$ , при которых наблюдаются положительные или отрицательные значения коэффициентов  $R$ .

Распределения  $R_{U_w-Q}$  показывают, что на каждом из рассмотренных меридианов ветер практически над всем Тихоокеанским сектором (западнее  $60^\circ$  з. д. по оси ординат) вызывает одинаковую реакцию переносов – один и тот же знак  $R_{U_w-Q}$ , который зависит только от временного сдвига (рис. 10, а).

Ветер в Атлантике и Индийском океане связан с переносами с определенным пространственно-временным сдвигом. В западной части Индийского океана (по оси ординат) приблизительно между  $30$  и  $70^\circ$  в. д. выделяется узловая область, ветер в которой обуславливает положительную корреляцию с переносами АЦТ на рассматриваемых меридианах, за исключением  $75^\circ$  в. д., при минимальных временных сдвигах (до 5 мес). В то же время к западу и востоку от этой области (по оси ординат) корреляция с ветром отрицательная. На  $75^\circ$  в. д. при этих временных сдвигах в узловой области наблюдается отрицательная связь с ветром, а к западу и востоку от нее – положительная. При увеличении временного сдвига отмечается тенденция к квазисинхронному появлению областей корреляции одного знака к западу и востоку от узловой области. В это же время знак корреляции в узловой области изменяется. В общем случае этот эффект показывает особенности связи внутригодовой изменчивости переносов на отдельном меридиане и скорости ветра последовательно на всех меридианах в Атлантике и Индийском океане. То есть при определенных временных сдвигах изменчивость переносов АЦТ на конкретном меридиане может одновременно иметь значимую корреляцию одного знака (прямую или обратную) со скоростью зонального ветра по крайней мере в трех районах Южного океана, расположенных в Тихом, Атлантическом и восточной части Индийского океана.

Распределения  $R_{V_w-Q}$  показывают, что влияние меридионального ветра в Атлантике и Индийском океане на переносы на тех же меридианах имеет несколько иной характер (рис. 10, б). По оси ординат узловая область расположена между  $30$  и  $50^\circ$  в. д., что несколько западнее, чем по распределению  $R_{U_w-Q}$ . Области ветров, обуславливающих одинаковый знак корреляции, по мере увеличения временного сдвига одновременно смещаются (по оси ординат) от пролива Дрейка ( $60 - 70^\circ$  з. д.) на восток и из восточной части Индий-

ского океана ( $100^\circ$  в. д.) – на запад. Примерно через 6 мес они приближаются к узловой области.



**Р и с. 10.** Распределения  $R$  между сезонными циклами переносов по М4 на меридианах  $115^\circ$  з. д.,  $10^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $115^\circ$  в. д. и зональной (а) и меридиональной (б) составляющих скорости ветра в зависимости от их пространственного сдвига с шагом  $1^\circ$  по долготе и временного сдвига  $\tau$  (нижние границы 95%-ной значимости – изокорреллы  $\pm 0,5$ , временной сдвиг в 6 мес отмечен вертикальными прямыми)

В Тихом и восточной части Индийского океана корреляционные связи переносов с меридиональным ветром также имеют свои особенности. В этих районах практически при одних и тех же временных сдвигах прослеживается чередование вдоль оси ординат зон положительных и отрицательных значений  $R_{V_w-Q}$ . Границы этих зон располагаются соответственно в районах  $120 - 130^\circ$  з. д. и  $150 - 160^\circ$  в. д. (рис. 10, б). Отметим, что у этих границ наблюдается резкое изменение фазы сезонных циклов меридионального ветра и переносов (рис. 9).

Таким образом, анализ сезонных изменений корреляционных связей между переносами на конкретных меридианах и составляющими скорости ветра для всего долготного диапазона показал, что временной сдвиг сопровождается смещением по пространству вдоль оси ветров областей одинаковой корреляции, а также изменением их количества. В общем случае это свидетельствует о том, что области ветров, оказывающие доминирующее влияние на переносы на данном меридиане, в сезонном цикле также испытывают существенные смещения вдоль круга широты, а количество таких областей может изменяться. Отметим также, что практически на всем сдвиговом диапазоне поля ветра изменение характера корреляции в зависимости от временного сдвига происходит с хорошо выраженным годовым периодом. Полугодовая периодичность прослеживается в секторе ТА при влиянии ветра, действующего на небольшом участке между  $160^\circ$  з. д. и  $150^\circ$  в. д.

Заметные отличия, наблюдаемые между распределениями  $R_{V_w-Q}$  и  $R_{U_w-Q}$  в зависимости от временного и пространственного сдвигов скорости ветра, вероятно, связаны с особенностями циркумполярного распределения фаз сезонных сигналов  $V_w$  и  $U_w$  (рис. 9). Так, например, над всем Тихоокеанским сектором фаза сезонного сигнала зонального ветра практически не изменяется (октябрь – ноябрь), что сопровождается одинаковой реакцией переносов при фиксированном временном сдвиге на каждом из рассмотренных меридианов. Меридиональный ветер в этом районе характеризуется большей изменчивостью фазы (июнь – ноябрь), что вызывает более сложную реакцию переносов АЦТ.

### Выводы

Исследование сезонной изменчивости переносов в верхнем слое Антарктического циркумполярного течения на основе климатического гидрологического массива *World Ocean Atlas-2009* и массива аномалий уровня океана показало, что они увеличиваются в первую половину года и уменьшаются – во вторую. При использовании модельных скоростей океанического реанализа *ECMWF ORA-S3* выявлены отличия, проявляющиеся во времени наступления экстремальных значений и в положении областей максимальной изменчивости переносов.

Циркумполярные распределения СКО аномалий переносов и составляющих скорости ветра показали, что максимальный уровень их внутригодовой изменчивости наблюдается в Тихоокеанском секторе между  $70$  и  $120^\circ$  з. д. Основной минимум СКО составляющих скорости ветра прослеживается в Западной Атлантике и в проливе Дрейка между  $50$  и  $70^\circ$  з. д. В этой области наблюдается общее уменьшение значений СКО аномалий переносов.

Установлено, что при нулевом пространственно-временном сдвиге положительные связи между переносами и зональной составляющей скорости ветра прослеживаются примерно между 60° з. д. и Гринвичем, отрицательные – между 90 и 130° з. д., Гринвичем и 120° в. д. Между меридиональной составляющей скорости ветра и переносами АЦТ на большей части Южного океана преобладает отрицательная корреляция.

Оценки воздействия ветрового режима отдаленных районов на изменчивость переносов показали, что в общем случае при нулевом временном сдвиге формирование региональных зон положительных и отрицательных связей обуславливается ветрами, действующими одновременно вдоль всего круга широты (зональный ветер) и из нескольких отдельных областей Южного океана (меридиональный ветер).

Анализ сезонных изменений корреляционных связей между переносами на конкретных меридианах и составляющими скорости ветра для всего долгого диапазона показал, что временной сдвиг сопровождается смещением по пространству вдоль оси ветров областей одинаковой корреляции, а также изменением их количества. В общем случае это свидетельствует о том, что области ветров, оказывающие доминирующее влияние на переносы на данном меридиане, в сезонном цикле также испытывают существенные смещения вдоль круга широты, а количество таких областей может изменяться. На всем сдвиговом диапазоне поля ветра изменение корреляции в зависимости от временного сдвига происходит преимущественно с годовым периодом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meredith M.P., Vassie J.M., Heywood K.J. et al. On the temporal variability of the transport through Drake Passage // *J. Geophys. Res.* – 1996. – 101, № C10. – P. 22,485 – 22,494.
2. Olbers D., Lettmann K. Barotropic and baroclinic processes in the transport variability of the Antarctic Circumpolar Current // *Ocean Dyn.* – 2007. – 57, № 6. – P. 559 – 578.
3. Wearn R.B., Baker D.J. Bottom pressure measurements across the Antarctic Circumpolar Current and their relation to the wind // *Deep-Sea Res.* – 1980. – 27, part A. – P. 875 – 888. – doi: 10.1016/0198-0149(80)90001-1.
4. Hughes C.W., Meredith M.P., Heywood K.J. Wind-driven transport fluctuations through Drake Passage: A southern mode // *J. Phys. Oceanogr.* – 1999. – 29, № 8. – P. 1971 – 1992.
5. Thompson D.W.J., Wallace J.M. Annular modes in the extra-tropical circulation. Part I: Month-to-month variability // *J. Clim.* – 2000. – 13, № 5. – P. 1000 – 1016.
6. Aoki S. Coherent sea level response to the Antarctic Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – 29, № 20. – P. 11-1 – 11-4. – doi: 10.1029/2002GL015733.
7. Hughes C.W., Woodworth P.L., Meredith M.P. et al. Coherence of Antarctic sea levels, Southern Hemisphere Annular Mode, and flow through Drake Passage // *Ibid.* – 2003. – 30, № 9. – P. 17-1 – 17-4.
8. Meredith M.P., Woodworth P.L., Hughes C.W. et al. Changes in the ocean transport through Drake Passage during the 1980s and 1990s forced by changes in the Southern Annular Mode // *Ibid.* – 2004. – 31(21). – P. L21305(1 – 5). – doi: 10.1029/2004GL021169.
9. Meredith M.P., Hogg A.M. Circumpolar response of Southern Ocean eddy activity to a change in the Southern Annular Mode // *Ibid.* – 2006. – 33. – P. L16608(1 – 4). – doi: 10.1029/2006GL026499.
10. Cunningham S., Pavic M. Surface geostrophic currents across the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage from 1992 to 2004 // *Progr. Oceanogr.* – 2007. – № 73. – P. 296 – 310.

11. *Pandey A., Rai S.* Sensitivity of the Indian Ocean circulation to surface wind stress // *Ind. J. Mar. Sci.* – 2008. – 37, March. – P. 55 – 61.
12. *Артамонов Ю.В., Федурко А.В., Скрипалёва Е.А. и др.* Сезонная изменчивость поля ветра и геострофических переносов в Южном океане // *Системы контроля окружающей среды.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – Вып. 19. – С. 170 – 174.
13. *Böning C.W., Disper A., Visbeck M. et al.* The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change // *Nat. Geosci.* – 2008. – P. 1,864 – 1,869. – doi: 10.1038/ngeo362.
14. *Артамонов Ю.В.* Сезонная изменчивость геострофических течений Атлантического океана по альтиметрическим данным // *Морской гидрофизический журнал.* – 2006. – № 3. – С. 60 – 71.
15. *Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // *Mon. Wea. Rev.* – 2007. – 136. – P. 3018 – 3034.
16. [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA-09/pr\\_woa09.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA-09/pr_woa09.html).
17. *Wolff J., Maier-Reimer E., Legutke S.* The Hamburg Ocean Primitive Equation model. – Hamburg: Deutsches Klimarechenzentrum Tech. Rep., 1997. – № 13. – 98 p.
18. <ftp://ftp.icdc.zmaw.de/EASYInit/ORA-S3>.
19. <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/sea-surface-height-products/global/msla-mean-climatology>.
20. *Le Traon P.Y., Nadal F., Ducet N.* An improved mapping method of multisatellite altimeter data // *J. Atmos. Ocean. Technol.* – 1998. – 15. – P. 522 – 533.
21. <http://nomad1.ncep.noaa.gov>.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: artam-ant@yandex.ru

Материал поступил  
в редакцию 17.02.14  
После доработки 31.07.14

**АНОТАЦІЯ** На основі кліматичного гідрологічного масиву *World Ocean Atlas-2009*, океанічного реаналізу *ECMWF ORA-S3* і масиву аномалій рівня океану за даними супутникової альтиметрії досліджена сезонна мінливість переносів Антарктичної циркумпольної течії (АЦТ) у верхньому 50-метровому шарі. Проаналізовані просторово-часові взаємно-кореляційні функції між переносами АЦТ і складовими швидкості вітру з масиву реаналізу *NCEP/NCAR* і виділені області, де відзначається значимий вплив поля вітру на сезонну мінливість АЦТ. Установлено, що при нульовому просторово-часовому зсуві позитивні кореляційні зв'язки між переносами та зональною складовою швидкості вітру простежуються приблизно між 60° з. д. і Гринвічем, негативні – між 90 та 130° з. д., між Гринвічем та 120° с. д. Між меридіональною складовою швидкості вітру та переносами АЦТ на більшій частині Південного океану переважає негативна кореляція.

**Ключові слова:** геострофічна швидкість, перенос, аномалії рівня океану, сезонна мінливість, Південний океан, Антарктична циркумпольна течія, поле вітру.

**ABSTRACT** Seasonal variability of Antarctic circumpolar current (ACC) transport in the ocean upper 50m layer is investigated based on climatic hydrological data base *World Ocean Atlas-2009*, ocean reanalysis *ECMWF ORA-S3* and satellite altimeter data on sea level anomalies. Spatial-temporal cross-correlation functions between ACC transports and wind speed components derived from reanalysis *NCEP/NCAR* are analyzed. Revealed are the areas where significant influence of wind field on ACC seasonal variability is observed. It is found that at a zero spatial-temporal shear, positive correlations between the transports and the wind speed zonal component are observed approximately between 60°W and Greenwich, negative ones – between 90 and 130°W, and Greenwich and 120°E. On the major part of the South Ocean negative correlation between the wind speed meridional component and the ACC transports is predominant.

**Keywords:** geostrophic velocity, transport, sea level anomalies, seasonal variability, South Ocean, Antarctic circumpolar current, wind field.