

## Сезонная изменчивость геострофических течений Атлантического океана по альтиметрическим данным

По среднемесячным значениям аномалий уровня океана (спутниковые данные за 1992 – 2002 гг.) и среднегодовым динамическим высотам (гидрологические данные) рассчитан сезонный цикл геострофических течений на поверхности Атлантического океана. Показано, что западные и восточные течения усиливаются с фазовой разницей в несколько месяцев, тогда как их широтные смещения квазисинхронны. Для течений тропической зоны Северного полушария характерно запаздывание сезонного сигнала с востока на запад в среднем на 2-3 месяца. В Южной Атлантике, наоборот, сезонный сигнал распространяется с запада на восток, при этом его фазовое запаздывание составляет почти 6 месяцев.

### Введение

Обобщение многочисленных исследований, посвященных циркуляции вод Атлантического океана, показало, что она представляет собой систему чередующихся в меридиональном направлении циклонических и антициклонических круговоротов с хорошо выраженными зональными границами в виде крупномасштабных течений. Основными из них являются: Северо-Атлантическое (САТ), Северное Пассатное (СПТ) течения, Межпассатное противотечение (МПТ) и его Северная ветвь (СВ МПТ), течение Ломоносова (ТЛ), три ветви Южного Пассатного течения (Северная, Центральная и Южная – СВ, ЦВ и ЮВ ЮПТ), Южное Экваториальное противотечение (ЮЭП), Рециркуляционная ветвь Бразильского течения (РВ БТ), Южно-Атлантическое течение (ЮАТ), три ветви Антарктического Циркумполярного течения (Северная, Центральная и Южная – СВ, ЦВ и ЮВ АЦТ). В сезонной изменчивости течений на большей части акватории Атлантики преобладает годовая гармоника, особенно ярко выраженная в тропической зоне. В настоящее время детально описаны региональные особенности сезонного цикла СПТ, МПТ, ТЛ [1 – 5]. О сезонной изменчивости большинства других течений имеются только отрывочные сведения. В Южной Атлантике данные о сезонном цикле течений практически отсутствуют, так как этот регион значительно меньше охвачен наблюдениями, чем Северная Атлантика.

В последние десятилетия при исследовании циркуляции вод нашли широкое применение спутниковые измерения уровня океана. Они использовались для уточнения сезонного цикла и синоптической изменчивости течений в северо-западной части тропической зоны Атлантического океана [6,7], в Индийском [8] и Южном океанах [9]. Указанные работы базировались в основном на относительно коротких (1 – 3 г.) рядах наблюдений, которые не охватывают типичного периода межгодовых вариаций (3 – 5 лет), поэтому выводы этих исследований нельзя относить к среднему климатическому сезонному циклу. Сейчас уже накоплен почти 10-летний ряд данных спутниковой альтиметрии. Цель настоящей работы – исследование сезонной изменчи-

востии аномалий уровня и геострофических течений на поверхности Атлантического океана на основе современного массива спутниковых данных.

## Материалы и методика

В работе использованы поля аномалий уровня океана (АУО) с одноградусным осреднением по пространству и пятидневным интервалом по времени. Эти данные с ноября 1992 г. по август 2002 г. представлены на сайте NASA (интернет-адрес [daac.jpl.nasa.gov](http://daac.jpl.nasa.gov)). При расчете полей АУО были учтены все поправки, определяемые методами спутниковой альтиметрии [10].

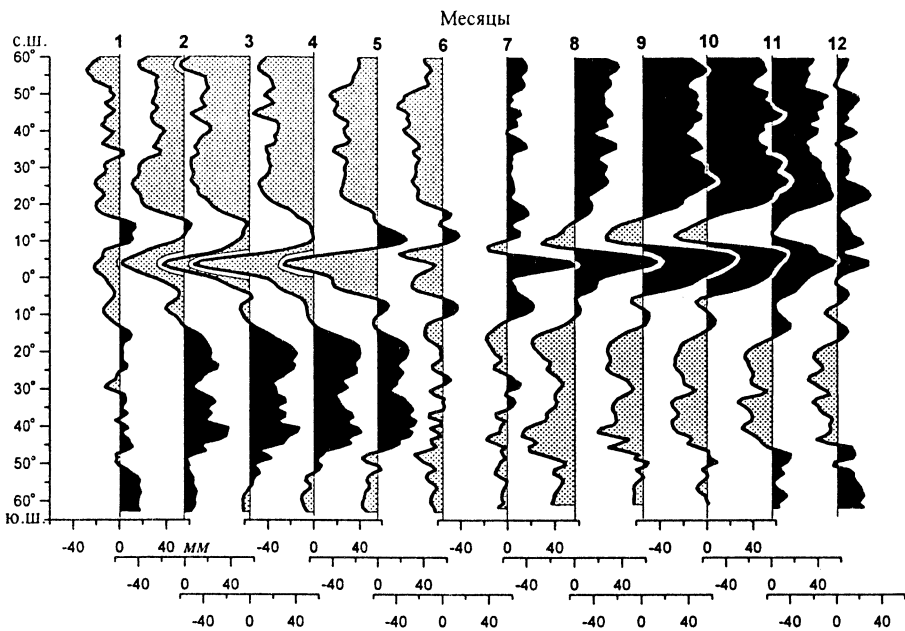
По пятидневным средним значениям АУО рассчитаны их средние для каждого месяца значения за весь период наблюдений. Геострофические скорости на поверхности океана вычислялись по стандартному геострофическому соотношению с использованием разностей динамических высот. Последние вычислялись как сумма аномалий уровня океана по альтиметрическим данным и среднегодовых значений динамических высот, рассчитанных относительно 1000 м [1].

Расчеты отношения среднеквадратического отклонения (СКО) внутригодовой и межгодовой изменчивости АУО показали, что на большей части акватории Атлантического океана в зонах интенсивных течений сезонный сигнал превышает межгодовую изменчивость. Этот факт дает основание для его надежного выделения в осредненных по месяцам за 10 лет АУО.

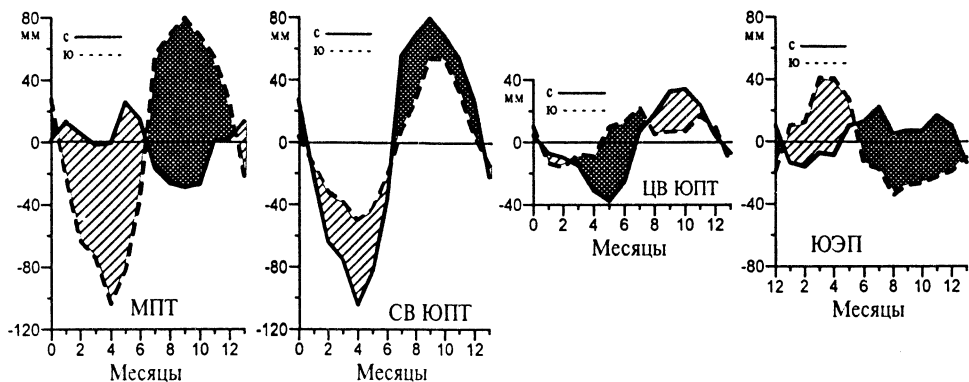
## Анализ результатов

Распределение АУО в Северном полушарии указывает на понижение океанического уровня относительно среднегодовой величины в первую половину года (рис. 1). На большей части акватории Южной Атлантики в это время наблюдаются положительные значения АУО. Анализ сезонной изменчивости АУО на широтно-временных развертках выявил целый ряд экстремумов, положение которых близко к положению крупномасштабных течений. В Северном полушарии в сезонном цикле четко прослеживаются смещения областей аномалий одного знака в северном направлении, что согласуется с сезонными смещениями течений, рассчитанными по гидрологическим данным. В Южном полушарии, наоборот, экстремумы АУО смещаются на юг. Особо четко эта закономерность прослеживается в тропической зоне.

Сезонный ход значений АУО на северной и южной границах течений косвенно характеризует величину наклона поперек течения и тем самым – изменение его интенсивности. По этому признаку максимальная интенсивность МПТ, СВ ЮПТ и ЮЭП наблюдается в октябре, минимальная – в апреле-мае. Для ЦВ ЮПТ максимум интенсивности отмечается в апреле (рис. 2). Такой сезонный цикл течений качественно совпадает с их сезонной изменчивостью, полученной по гидрологическим данным [1, 2]. Хотя изменения АУО на границах крупномасштабных течений качественно отражают их сезонный цикл, они имеют погрешность, связанную с неопределенностью среднего уровня океана по альтиметрическим данным. Более надежным представляется сезонный цикл течений, рассчитанный с добавкой среднегодового уровня, полученного по гидрологическим данным. Аналогичный подход был использован другими исследователями [7, 8].



Р и с. 1. Широтное распределение по месяцам аномалий уровня океана на меридиане 30° з.д.

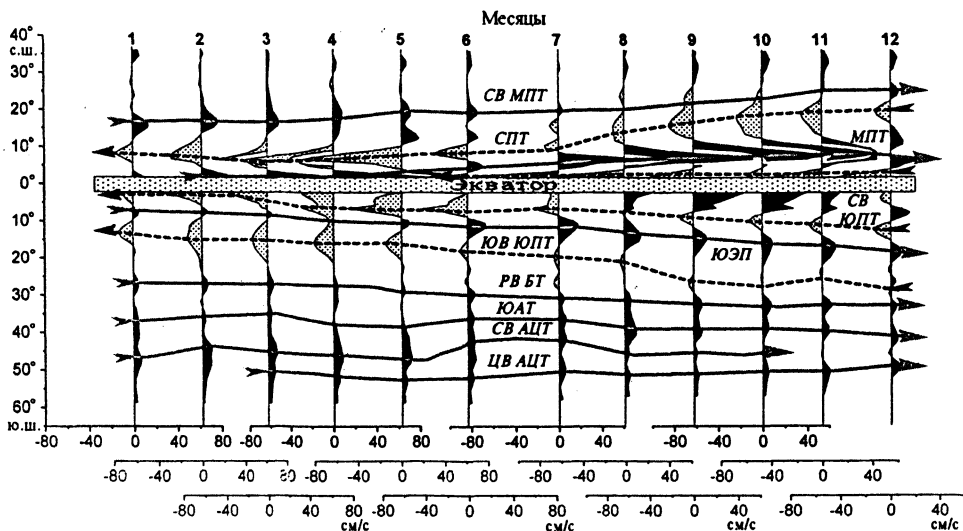


Р и с. 2. Внутригодовое изменение аномалий уровня океана на северной (сплошная) и южной (штриховая) границах разных течений вдоль 30° з.д.

Широтные распределения по месяцам зональной составляющей скорости течений показывают ее резкое увеличение в приэкваториальной зоне, в некоторых случаях скорости течений превышают 100 см/с (рис. 3). В субтропических и полярных широтах скорости течений ниже и не превышают 10 – 20 см/с. В сезонном цикле экстремумы зональной скорости в тропиках смещаются на север в Северном полушарии и на юг – в Южном.

При наличии общих закономерностей сезонного цикла течений выявлены некоторые особенности на региональном уровне. Так, впервые показано, что Северная ветвь Межпассатного противотечения прослеживается по всей ширине океана, между 10° и 25° с.ш. Ранее считалось, что эта ветвь образуется только в западной и восточной частях Тропической Атлантики [11, 12]. На

всем своем протяжении она имеет наибольшую скорость 20 – 25 см/с (рис. 4), при этом ее максимум скорости на 20° з.д. наблюдается в феврале, на 50° з.д. – в мае. Аналогичное запаздывание отмечается во времени наступления максимума скорости СПТ: на востоке региона на 20° з.д. он наблюдается в феврале (20 см/с), на западе на 40° з.д. – в апреле (80 см/с).



Р и с. 3. Широтное распределение по месяцам геострофических скоростей на меридиане 30°з.д.

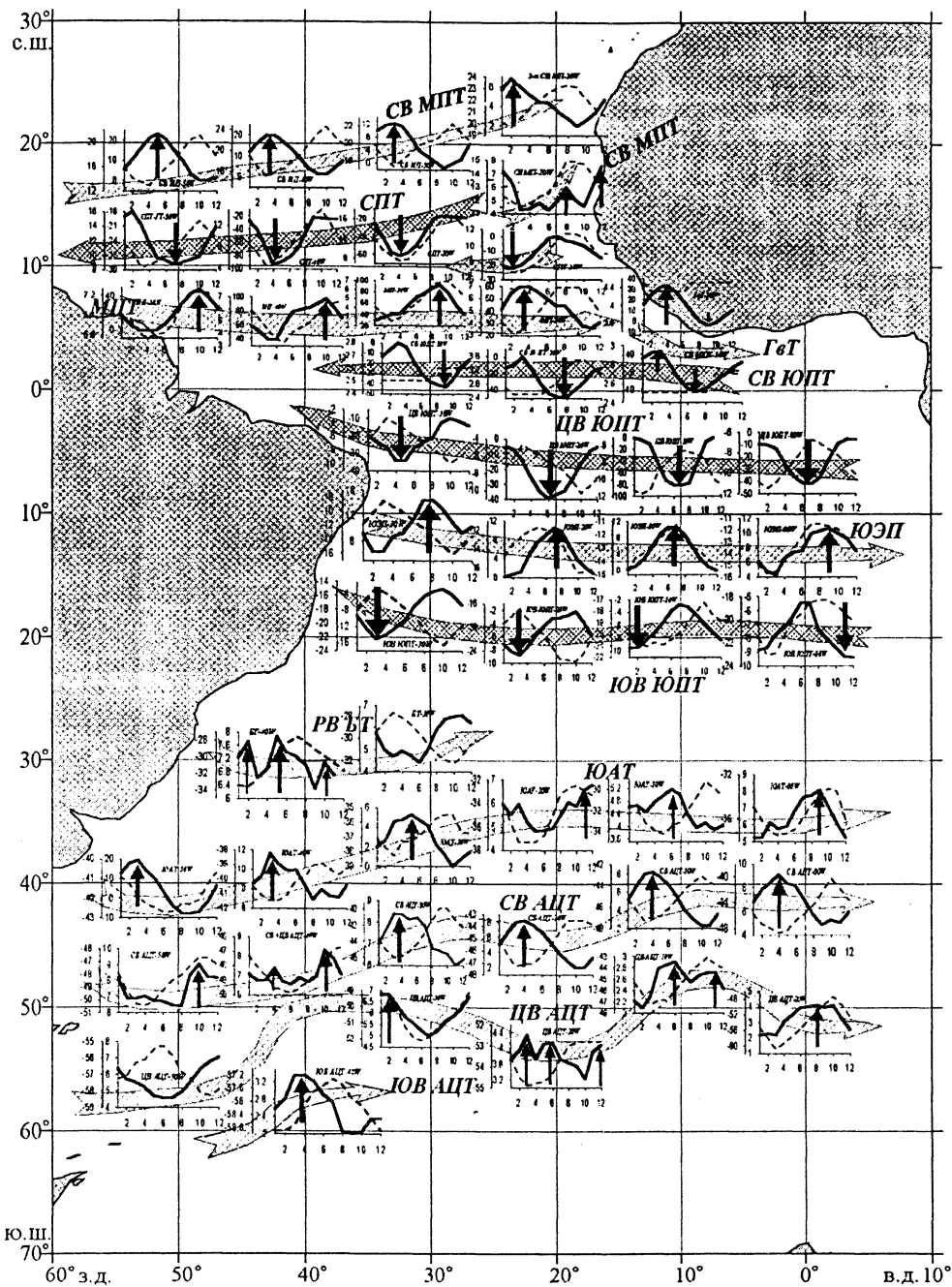
Собственно Межпассатное противотечение проходит между 2° и 8° с.ш. Оно усиливается во вторую половину года в сентябре – октябре, когда его скорость достигает 70 – 90 см/с. На востоке океана на 20° з.д. максимум его скорости (60 см/с) наблюдается в марте. В Гвинейском течении максимум наступает на месяц позже – в апреле.

Северная ветвь ЮПТ прослеживается на 2–3° с.ш. Ее интенсивность изменяется почти в противофазе с интенсивностью МПТ. Сезонный сигнал СВ ЮПТ также запаздывает в направлении с востока на запад. Максимальная величина скорости (30 см/с) наблюдается на 10° з.д. в июле, на 30° з.д. – в сентябре.

Между 2° и 12° ю.ш. проходит Центральная ветвь ЮПТ. В наступлении максимума ее интенсивности, в отличие от СВ ЮПТ, запаздывание наблюдается в обратном направлении, с запада на восток. Так, на 30° з.д. максимум скорости (35 см/с) наступает в апреле, а на Гринвичском меридиане – в июле, где он достигает 40 см/с.

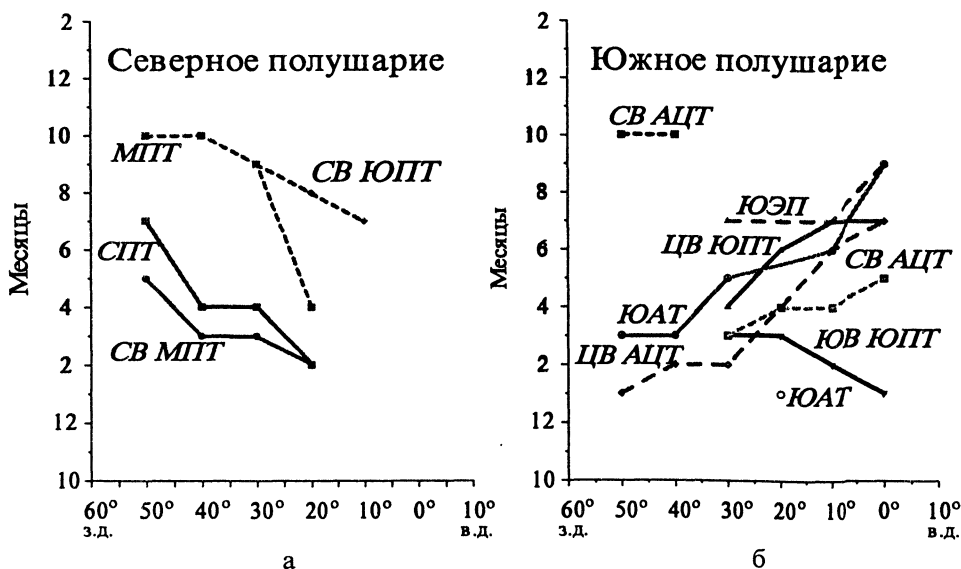
Южное Экваториальное противотечение проходит между 8° и 16° ю.ш. На 20° и 10° з.д. его сезонный цикл изменяется почти в фазе с ЦВ ЮПТ, достигая максимальных значений (12 см/с) в июле. На 30° з.д. и на Гринвичском меридиане его сезонный сигнал запаздывает и максимумы скорости наблюдаются в августе и сентябре (15 и 10 см/с соответственно).

Южнее, между 14° и 24° ю.ш., проходит Южная ветвь ЮПТ, интенсивность которой меняется в противофазе с ЮЭП. Максимумы ее скорости наблюдаются: в марте – на 30° з.д. (14 см/с) и на 20° з.д. (9 см/с), в январе – на 10° з.д. и на Гринвичском меридиане (9 см/с).



Р и с. 4. Внутригодовой ход скорости (сплошная) и положения стрежней (штриховая) зональных геострофических течений по данным альтиметрии

Таким образом, для тропиков Северного полушария характерно запаздывание сезонного сигнала скорости течений в направлении с востока на запад (рис. 5, а). В Южном полушарии, наоборот, сезонный сигнал запаздывает с запада на восток (рис. 5, б), за исключением Южной ветви ЮПТ, которая максимально усиливается на Гринвичском меридиане в феврале, а на 30° з.д. – в марте.



Р и с. 5. Время наступления максимума геострофической скорости для разных течений в Северном (а) и Южном (б) полушариях

Между 28° и 34° ю.ш. располагается Рециркуляционная ветвь Бразильского течения. Ее сезонная изменчивость на 40° з.д. характеризуется тремя максимумами скорости (7 – 8 см/с) в феврале, мае и сентябре. Подобный сигнал в изменчивости РВ БТ получен и по гидрологическим данным [1]. Далее на юг между 32° и 42° ю.ш. проходит Южно-Атлантическое течение. В сезонной изменчивости ЮАТ преобладает годовой сигнал, при этом наблюдается его запаздывание с запада на восток почти на полгода. На 50° з.д. максимум скорости (20 см/с) отмечается в марте, а на Гринвичском меридиане (8 см/с) – в сентябре.

Между 40° и 50° ю.ш. проходит Северная ветвь АЦТ. В западной части океана между 50° и 40° з.д. максимум ее скорости, составляющий 9 см/с, наблюдается в октябре. Далее на восток максимальной скорости (8 см/с) СВ АЦТ достигает в марте на 30° з.д., в апреле – на 20 – 10° з.д. и в мае – на Гринвичском меридиане. Заметное фазовое смещение сезонного сигнала наблюдается также в Центральной ветви АЦТ, которая расположена между 48° и 60° ю.ш. На западе региона на 50° з.д. максимум скорости (7 см/с) наступает в декабре, далее на восток он запаздывает и наблюдается на 30° з.д. в феврале, на 20° з.д. – в марте, на 10° з.д. – в июле, на Гринвичском меридиане – в августе. Таким образом, сезонный сигнал в течениях субантарктической и полярной зон запаздывает в направлении с запада на восток примерно на полгода.

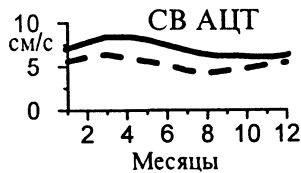
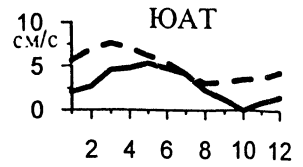
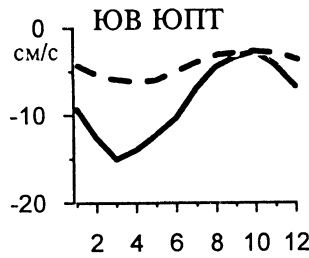
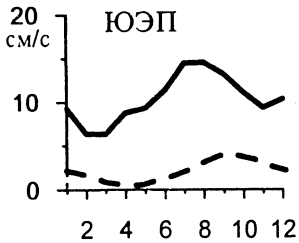
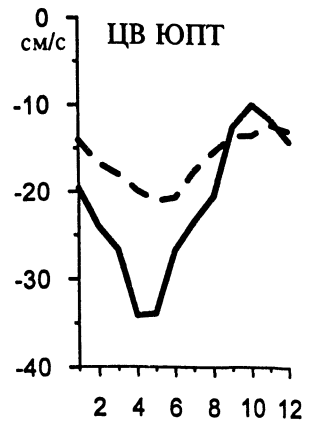
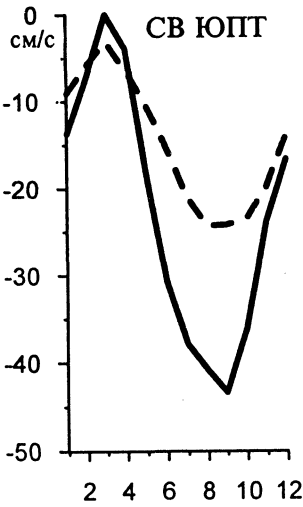
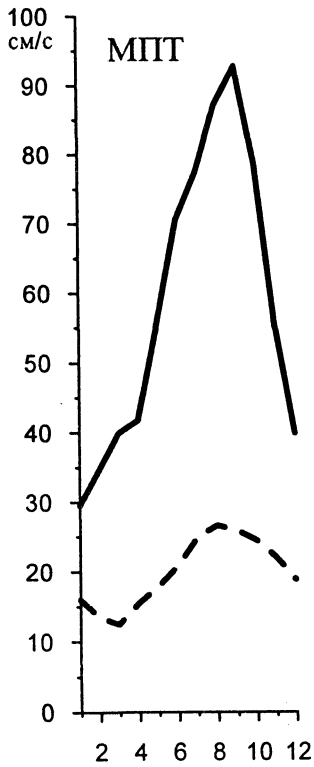
Стрежни течений Северного полушария в сезонном цикле смещаются в северном направлении (рис. 4), достигая крайней северной точки почти одновременно в октябре. В Южном полушарии сезонные вариации в смещении стрежней течений не столь однозначны, чем в Северном. В Центральной ветви ЮПТ, ЮЭП, Южной ветви ЮПТ на 30° з.д. наблюдается одинаковый сигнал с максимальным приближением к экватору в марте и наибольшим отдалением от него в октябре. По мере продвижения на восток сигнал запаздывает, и на Гринвичском меридиане стрежни течений в южном положении находятся в феврале.

Течения южной периферии Южного Субтропического антициклонического круговорота (ЮСАК) и полярной зоны (ЮАТ, СВ и ЦВ АЦТ) занимают южное положение в первую половину года, с марта по май. Рециркуляционная ветвь Бразильского течения в южном положении находится несколько раньше, в октябре – на 30° з.д., в феврале – на 40° з.д.

### Дискуссия

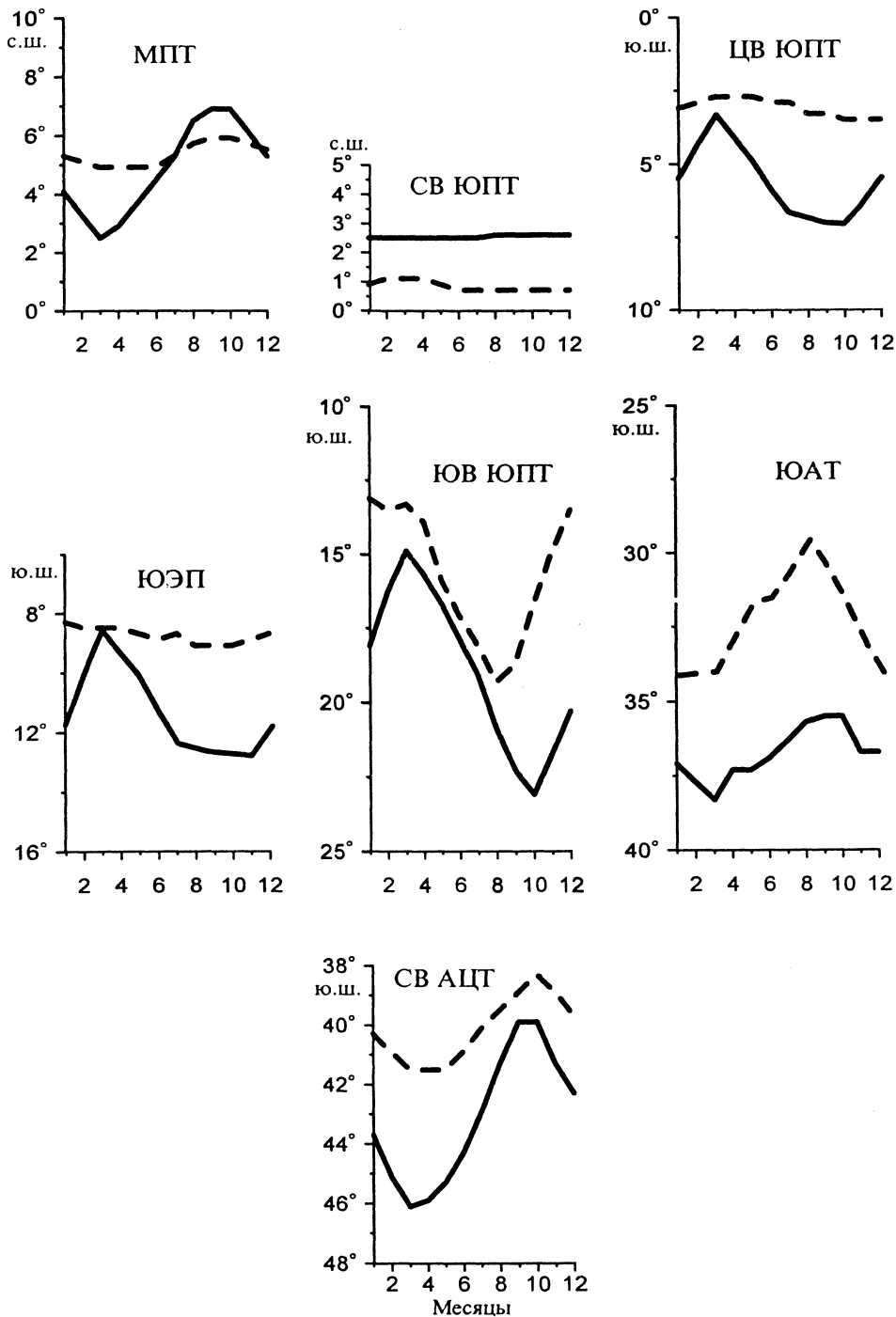
Анализ сезонной изменчивости характеристик течений по спутниковой альтиметрии и гидрологическим данным [1] показал, что фазы сезонного сигнала большинства течений, полученные по двум независимым базам данных, качественно согласуются между собой. Графики внутrigодового хода скоростей и положения течений вдоль меридиана 30° з.д., пересекающего центральную часть ЮСАК, представлены на рис. 6. Интенсивность и положение Южной ветви ЮПТ и ЮАТ, которые образуют северную и южную границы ЮСАК, изменяются в противофазе, что соответствует сезонной изменчивости площади ЮСАК, рассчитанной по спутниковым и гидрологическим данным [13]. Хорошо согласуются также фазы сезонного сигнала МПТ и СВ ЮПТ, полученные разными методами. Вместе с тем для таких течений, как ЮВ ЮПТ, ЮАТ, СВ АЦТ, отмечается сдвиг по фазе сезонного сигнала по скорости и по положению стрежней течений. Для всех течений, за исключением отдельных месяцев, отмечаются значительные различия в абсолютных значениях скоростей и широт, на которых они расположены. Величины скоростей по данным альтиметрии превышают их абсолютные значения, полученные динамическим методом. Особенно велики различия в экваториальной зоне. Например, в период максимального развития МПТ в августе скорости различаются почти в четыре раза. В тропической зоне амплитуды сезонных вариаций скоростей течений по данным альтиметрии в 2-3 раза выше, чем по динамическому методу. Практически во всех случаях стрежни течений в Южной Атлантике, по данным альтиметрии, располагаются южнее по сравнению с гидрологическими данными.

Результаты, полученные по гидрологическим и спутниковым данным, расходятся по нескольким причинам. Ими являются, с одной стороны, погрешности спутниковой альтиметрии, с другой – недостатки динамического метода, а также различная обеспеченность обоих массивов измерениями. Ошибки спутниковой альтиметрии подробно рассматриваются в [7, 9, 10, 14].



a





б

Р и с. 6. Внутригодовой ход скорости (а) и положения стрежней (б) геострофических течений по спутниковым (сплошная) и гидрологическим (штриховая) данным вдоль 30°з.д.

Показано, что каждое измерение уровня океана со спутников содержит погрешности, связанные с дрейфом их орбиты, приливными явлениями, состоянием атмосферы. Применение разных методик пространственно-временной фильтрации и сглаживания первичных измерений по альтиметру позволяет существенно уменьшить эти погрешности. Однако основная ошибка связана с недостаточным знанием формы геоида. Прием, который обычно используют для уменьшения этой ошибки, – переход к аномалиям уровня океана. Установлено, что, согласно альтиметрическим данным, средний уровень океана, вычитаемый из фактических измерений, содержит основную ошибку, связанную с формой геоида [7]. После учета всех поправок, определяемых методами спутниковой альтиметрии, погрешность АУО составляет 3 – 5 см, что существенно меньше перепада уровня океана, достигающего в зоне интенсивных геострофических течений 50 – 70 см [14]. Частично различия между результатами, полученными по гидрологическим и спутниковым данным, связаны с разными процедурами приведения фактической информации в узлы регулярной сетки и значительным сглаживанием данных гидрологического массива [15].

Основной вклад в различия между результатами, полученными по гидрологическим и спутниковым данным, вносят погрешности динамического метода. Известно, что поверхностные течения состоят из дрейфовой, бароклинной и баротропной составляющих. Дрейфовая составляющая не зависит от наклона уровня океана, поэтому спутниковый альтиметр фиксирует бароклинную и баротропную составляющие. Использование сложных диагностических моделей, учитывающих обе составляющие, позволяет минимизировать различия между характеристиками течений, полученными по двум типам данных [6, 14]. Динамический метод учитывает только первую составляющую. В то же время известно, что в полярных течениях значительный вклад вносит баротропная составляющая, которая не воспроизводится динамическим методом [14, 16], что может существенно занижать скорости течений.

В тропической зоне, где бароклинная составляющая течений существенна, важную роль при расчетах динамическим методом играет обеспеченность наблюдениями. Хотя этот регион обеспечен ими лучше, чем другие районы Южной Атлантики, все же этих данных значительно меньше, чем спутниковых измерений уровня океана. Разное количество наблюдений при интерполяции и их сглаживание приводит к различным величинам градиентов уровня моря. При этом в таких интенсивных течениях, как МПТ и ЮПТ, при малой обеспеченности гидрологическими измерениями они, как правило, занижаются. Кроме того, возникает ошибка из-за сложности выбора универсальной отсчетной поверхности. В данной работе динамические высоты рассчитывались от отсчетной поверхности 1000 м, хотя известно, что в тропической зоне бароклинный сдвиг лучше проявляется в верхнем 500-метровом слое [2], а в полярных широтах он заглубляется до 2000 – 3000 м [16]. Выбор разной глубины отсчетной поверхности может изменять поверхностную геострофическую скорость на 30%.

## Заключение

Выполненные расчеты показали, что спутниковые данные являются хорошим инструментом для исследования сезонной изменчивости крупномасштабной циркуляции вод. Несмотря на имеющиеся различия в абсолютных величинах скорости и широтном положении течений, альтиметрия подтверждает особенности их сезонной изменчивости, выявленные с помощью традиционных методов с использованием гидрологических данных. С другой стороны, спутниковые данные позволяют получить ряд новых фактов, которые раньше не были известны. Так, использование альтиметрических данных показало, что Северная ветвь Межпассатного противотечения прослеживается по всей ширине океана. Выявлено, что западные и восточные течения в северных тропиках усиливаются с разницей по фазе в несколько месяцев, тогда как их широтные смещения квазисинхронны. В южных тропиках, ближе к Южной Америке, интенсивность западных и восточных течений меняется почти асинхронно. Вследствие запаздывания сезонного сигнала Центральной ветви ЮПТ с запада на восток ее интенсивность между  $20^{\circ}$  и  $10^{\circ}$  з.д. меняется в фазе с ЮЭП. Для течений тропической зоны Северного полушария характерно запаздывание сезонного сигнала с востока на запад в среднем на 2-3 месяца. В Южной Атлантике, наоборот, сезонный сигнал распространяется с запада на восток, при этом его фазовое запаздывание составляет почти 6 месяцев.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Циркуляция вод деятельного слоя Южной Атлантики.– Севастополь. 2001.– 86 с.– (Препринт /НАН Украины. МГИ).
2. Polonsky A.B., Artamonov Yu.V. North Equatorial Countercurrent in the Tropical Atlantic: Multi-jet structure and seasonal variability // *Germ J. Hydrogr.*– 1997.– 49, № 4.– P. 476–494.
3. Philander S.G.H., Pacanowski R.C. A model of the seasonal cycle in the Tropical Atlantic Ocean // *J. Geophys. Res.*– 1986.– 91, № C12.– P. 14192–14206.
4. Михайлова Э.Н., Семенюк И.М., Шапиро Н.Б. Моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей в Тропической Атлантике // *ФАО.*– 1991.– 27, № 10.– С. 1139–1148.
5. Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К. Численный эксперимент по расчету экваториальной циркуляции на основе консервативной модели // *Морской гидрофизический журнал.*– 1989.– № 4.– С. 13–24.
6. Didden N., Schott F. Eddies in the North Brazil current retroflexion region observed by GEOSAT altimetry // *J. Geophys. Res.*– 1993.– 98.– P. 20121–20131.
7. Carton J. A., Kats E.J. Estimates of the zonal slope and seasonal transport of the Atlantic North Equatorial Countercurrent // *Ibid.*– 1990.– C95, № C3.– P. 3091–3100.
8. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А. и др. Фронты и мезомасштабная изменчивость в южной части Индийского океана по альтиметрическим данным TOPEX/POSEIDON и ERS-2 // *Океанология.*– 2003.– 43, № 5.– С. 671–682.
9. Chelton D.B., Schlax M.G., Witter D.L. et al. Geosat Altimeter Observations of the Surface Circulation of the Southern Ocean // *J. Geophys. Res.*– 1990.– 95, № C10.– P. 17877–17903.
10. Le Traon P.Y., Nadal F., Ducet N. An improved mapping method of multisatellite altimeter data // *J. Atmos. Ocean. Techn.*– 1998.– 15.– P. 522–533.
11. Richardson P.L., Walsh D. Mapping climatological seasonal variations of surface currents in the Tropical Atlantic using ship drifts // *J. Geophys. Res.*– 1986.– 91, № C9.– P. 10537–10550.
12. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Полонский А.Б. Крупномасштабная структура и изменчивость океанографических полей северной части Тропической Атлантики // *Гидрофизика Тропической Атлантики / Под ред. В.Н. Еремеева.*– Киев: Наук. думка, 1993.– С. 7–34.

13. Артамонов Ю.В. Сезонная динамика крупномасштабных круговоротов, гидрологических фронтов и поверхностных водных масс в Южной Атлантике // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004.– С. 211–213.
14. Park Y.H., Gamberoni I. Large-scale circulation and its variability in the South Indian Ocean from TOPEX/POSEIDON altimetry // J. Geophys. Res. – 1995. – 100, № C12.– P 23911–23929.
15. Levitus S., Boyer P.T. World Ocean Atlas.– U.S. CD-ROM Data Sets. National Oceanographic Data Center, Ocean Climate Laboratory.– Washington, D.C, June. –1994.
16. Peterson R.G., Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean // Prog. Oceanogr.– 1991.– 26.– P. 1–73.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 30.12.04  
После доработки 09.03.05

ABSTRACT Seasonal cycle of geostrophic currents on the Atlantic Ocean surface is calculated based on the monthly average sea level anomalies (SLA) derived from the satellite altimetry data, 1992–2002 and the annual average dynamic heights - from hydrological data. It is shown that the western and eastern currents intensify with a few month phase difference, whereas their latitudinal displacements are quasi-synchronous. Average 2–3 month lag of the seasonal signal from east to west is typical for the currents in the Northern Hemisphere tropical region. *Vise versa*, in the South Atlantic the seasonal signal propagates from west to east, its phase lag amounts nearly 6 months.