

Сезонная изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений в Северной Атлантике

© 2015 А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова, П.А. Сухонос

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: apolonsky5@mail.ru, igshokurova@mail.ru, pasukhonis@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2014 г.

Работа посвящена анализу сезонной изменчивости пространственного распределения и величины завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений в Северной Атлантике по данным реанализа *ORA-S3* за 1959 – 2011 гг. Получено, что усиление (ослабление) циклонической завихренности касательного напряжения трения ветра и течений в субполярной зоне происходит в январе (июле), в тропической зоне — в августе – сентябре (январе). Усиление (ослабление) антициклонической завихренности касательного напряжения трения ветра и течений в субтропической зоне происходит в январе и июне – июле (мае и сентябре – октябре). Корреляция между внутригодовыми изменениями значений завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений, осредненных по области Северного субтропического антициклонического круговорота, составляет 0,86, а по области Северного субполярного циклонического круговорота – 0,98. Подтверждены выполненные в 1983 г. С. Хеллерманом и М. Розенштейном оценки касательного напряжения трения ветра и его завихренности, которые в ряде более поздних работ характеризовались как завышенные.

Ключевые слова: завихренность касательного напряжения трения ветра, завихренность поверхностных течений, сезонная изменчивость, Северная Атлантика.

Введение

Атлантический океан играет важную роль в климатических изменениях в Атлантико-Европейском регионе. Перенос тепла Гольфстримом и Северо-Атлантическим течением в высокие широты оказывает значительное влияние на климат Европы. Это обуславливает важность изучения пространственно-временной изменчивости поля течений, а также поля ветра, формирующего циркуляцию вод в океане. Основные звенья крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике, выделяемые по среднегодовым наблюдениям, – это Северный субтропический антициклонический круговорот (ССАК) и Северный субполярный циклонический круговорот (ССЦК). ССАК представляет собой систему течений, образованную с запада Гольфстримом, с севера его продолжением – Северо-Атлантическим течением, с востока Канарским течением, а с юга Северным Пассатным течением. В ССЦК выделяются Лабрадорское, Северо-Атлантическое, Ирмингера и Гренландское течения [1].

Хорошо известно, что расположение океанических круговоротов определяется пространственной структурой крупномасштабной циркуляции атмосферы. ССАК находится в области антициклонической завихренности ветра, а ССЦК – циклонической. В свою очередь, распределение завихренности касательного напряжения трения ветра обусловлено положением постоянно

действующих ветров – пассатов в тропической зоне и западных ветров в районе умеренных широт [2].

Пространственное распределение величины завихренности в поле ветра и ее сезонная изменчивость в настоящее время хорошо изучены для всего Мирового океана [3 – 6] и его отдельных регионов, включая Северную Атлантику [7 – 10]. Вычисление и анализ осредненной за сезоны величины завихренности касательного напряжения трения ветра для всего Мирового океана проводились в работе [3] по данным натурных наблюдений за ветром с 1870 по 1976 г. с пространственным разрешением $2 \times 2^\circ$. В статье [4] использовались данные архива морских наблюдений за 1850 – 1979 гг. с пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$, а в работах [5, 6] – данные *ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)* за 1980 – 1986 гг. с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$. Пространственные распределения завихренности касательного напряжения трения ветра, полученные в этих работах, незначительно различаются между собой.

В работе [7] по среднемесячным данным массива *COADS* за 1947 – 1988 гг. на двухградусной сетке рассчитаны поля завихренности касательного напряжения трения ветра по акватории Северной Атлантики для января и июля. Показано, что циклоническая завихренность ветра в умеренных широтах и субполярной зоне интенсифицируется в зимний сезон, а в области внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) испытывает меридиональные смещения и интенсифицируется в летний сезон. В статье [8] для района Норвежского и Гренландского морей по данным за 1955 – 1987 гг. изучен годовой ход завихренности касательного напряжения трения ветра. Ветровая циркуляция в этом районе имеет циклонический характер в течение всего года. При этом величина завихренности возрастает зимой и уменьшается летом. В работе [9] по данным натурных измерений ветра проанализирован сезонный ход завихренности касательного напряжения трения ветра для восточных пограничных течений в субтропической зоне. Здесь наблюдаются циклоническая завихренность ветра возле континентальных границ и антициклоническая в открытом море. Летом происходит интенсификация циклонической завихренности ветра и растяжение области циклонической завихренности в меридиональном направлении к полюсу. В статье [10] по данным с апреля 1982 г. по сентябрь 1984 г. на сетке $1,875 \times 1,875^\circ$ исследуется сезонный ход завихренности касательного напряжения трения ветра для Тропической Атлантики. Показано, что максимальный меридиональный градиент завихренности касательного напряжения трения ветра в ВЗК наблюдается с июля по сентябрь. Таким образом, пространственно-временная структура поля касательного напряжения трения ветра хорошо изучена. Вместе с тем величины касательного напряжения трения ветра и его завихренности существенно различаются по данным литературных источников. Это обусловлено использованием различных типов данных, их разным пространственно-временным осреднением и методическими различиями при определении величины коэффициентов сопротивления.

Из классической теории известно, что пространственная неоднородность ветра является одним из основных источников завихренности поля течений в океане [11]. Данные современных реанализов по скоростям течений дают возможность выполнить расчеты завихренности течений за длительный про-

межутков времени на регулярной сетке. Сведения о завихренности поверхностных течений позволяют исследовать пространственно-временную изменчивость структуры крупномасштабных океанических круговоротов, а также провести совместный анализ пространственно-временной изменчивости завихренности полей течений и касательного напряжения трения ветра, что и представляет собой главную цель настоящей работы.

Описание данных и методика их обработки

Для достижения поставленной цели использовались данные о касательном напряжении трения ветра и полях течений из океанического реанализа *ORA-S3* [12] за период с января 1959 г. по декабрь 2011 г. Пространственное разрешение данных составляет $1 \times 1^\circ$, а в экваториальной зоне ($\pm 10^\circ$ широты) – $0,3^\circ$ в меридиональном направлении и 1° в зональном. Для реанализа *ORA-S3* данные о касательном напряжении трения ветра заимствовались из атмосферного реанализа *ERA-40* [13] за период с января 1959 г. по июнь 2002 г. и оперативного анализа *NWP* за период с июля 2002 г. по декабрь 2011 г.

Завихренность касательного напряжения трения ветра для каждого месяца рассчитывалась по формуле

$$\text{rot}_z \vec{\tau} = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \quad (\text{Н/м}^3), \quad (1)$$

где τ_x , τ_y – зональная и меридиональная компоненты вектора касательного напряжения трения ветра.

Завихренность поверхностных течений для каждого месяца вычислялась по формуле

$$\text{rot}_z \vec{V} = \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad (\text{с}^{-1}), \quad (2)$$

где V_x , V_y – зональная и меридиональная компоненты вектора течений на горизонте 15 м.

Отметим, что вертикальная ось z направлена вверх, т. е. при анализе пространственного распределения средних величин завихренности под антициклонической (циклонической) завихренностью понимаются отрицательные (положительные) значения.

Вычисления выполнялись для каждого месяца в каждом узле сетки. В результате для каждой расчетной точки были получены ряды среднемесячных значений завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений в Северной Атлантике для 53-летнего периода. Внутригодовой ход завихренности для отдельных районов вычислялся по осредненным внутри каждой области ежемесячным значениям. Для анализа сезонной изменчивости пространственного распределения завихренности ветров и течений выбирались средние месяцы сезонов – январь, апрель, июль, октябрь.

Анализ результатов

Сезонная изменчивость пространственной структуры полей касательного напряжения трения ветра и его завихренности. Осредненные за исследуемый период поля касательного напряжения трения ветра и его завихренности для января, апреля, июля и октября показаны на рис. 1. Про-

странственная изменчивость абсолютной величины касательного напряжения трения ветра в Северной Атлантике имеет характерные для всех сезонов года широтные особенности, обусловленные крупномасштабной структурой ветров в Северном полушарии. Увеличение значения модуля касательного напряжения трения ветра наблюдается в районе северо-восточного пассата (между 10 и 20° с. ш.), затем отмечается его уменьшение (до нуля в окрестности 30° с. ш.) и постепенное увеличение в северном направлении с максимальными значениями в области западных ветров.

Зимой модуль касательного напряжения трения ветра увеличивается как в районе пассатов, так и в области западных ветров (рис. 1, а). Максимальные его значения наблюдаются в области западных ветров. В это время существенна меридиональная составляющая вектора касательного напряжения трения ветра. Летом касательное напряжение трения ветра в области западных ветров ослабевает и становится меньшим (по модулю), чем напряжение трения в районе пассатов (рис. 1, в). Осенью пассаты ослабевают, а касательное напряжение трения в области западных ветров увеличивается (рис. 1, з), при этом меридиональная составляющая минимальна – ветер и в пассатной зоне и в области западных ветров в основном имеет зональное направление. Такая сезонная изменчивость распределения касательного напряжения трения ветра отмечалась ранее в работах [5, 6].

Пространственная структура распределения завихренности касательного напряжения трения ветра в целом для всех сезонов имеет квазизональный характер. В южной части тропиков находится узкая полоса циклонической завихренности – ВЗК, в северной части тропиков и субтропической зоне – область с антициклонической завихренностью, в умеренных широтах и субполярной зоне – с циклонической завихренностью (рис. 1, б – з). В антициклонической области выделяются два центра с наибольшими значениями модуля завихренности касательного напряжения трения ветра – Азорский и Бермудский максимумы атмосферного давления. Оба максимума интенсифицируются зимой и ослабевают в летние месяцы. Подчеркнем, что максимум завихренности ветра в районе Азорских о-вов имеет постоянный характер и выделяется во все месяцы года. В северной циклонической области экстремальное значение завихренности касательного напряжения трения ветра соответствует Исландскому минимуму атмосферного давления.

Положение и размеры областей антициклонической и циклонической завихренности касательного напряжения трения ветра меняются от сезона к сезону. Во все сезоны, кроме осеннего, ось области антициклонической завихренности наклонена в юго-западном направлении. В зимние месяцы, при усилении западных ветров, увеличивается область циклонической завихренности в северной части Северной Атлантики (рис. 1, д). В летние месяцы южная и северная границы антициклонической области смещаются к северу (рис. 1, ж). Осенью эти границы расположены зонально (рис. 1, з). Площадь антициклонической области увеличивается в зимние месяцы и уменьшается к концу лета – началу осени, что ранее отмечалось в работе [14].

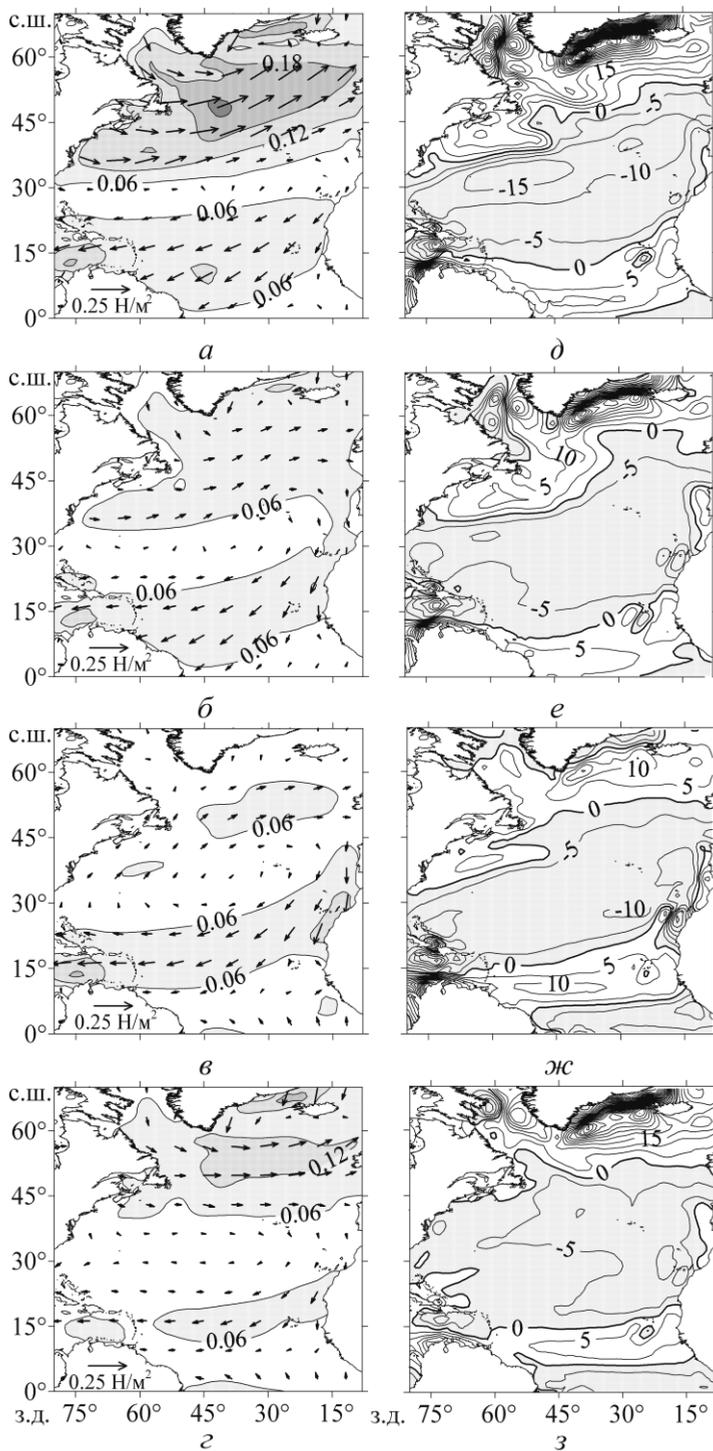


Рис. 1. Поля касательного напряжения трения ветра, $\text{H}/\text{м}^2$ (а, б, в, г; интенсивность затемнения штриховки характеризует рост величины модуля касательного напряжения трения ветра) и его завихренности, $\times 10^{-8} \text{H}/\text{м}^3$ (д, е, ж, з; области с антициклонической завихренностью ветра заштрихованы) в Северной Атлантике, осредненные за период 1959 – 2011 гг. для января (а, д), апреля (б, е), июля (в, ж) и октября (г, з)

У берегов Африки летом и осенью наблюдается увеличение областей циклонической завихренности ветра, это приводит к увеличению зон апвеллинга, на что указывалось в работе [9] на основании данных натурных измерений ветра. В западной части области ВЗК отмечаются максимальные сезонные вариации завихренности поля ветра, это отражается на сезонной изменчивости гидрофизических характеристик в зоне Межпассатного противотечения, что отмечалось в работах [15, 16].

Пространственное распределение завихренности касательного напряжения трения ветра по акватории Северной Атлантики, рассчитанное в нашей статье, качественно согласуется с результатами работ [3 – 7], в которых анализировались данные за другой временной промежуток. Полученные нами величины завихренности ветра соответствуют данным статьи [3]. Вместе с тем и по нашим расчетам и по результатам работы [3] эти величины примерно на 20 – 30% больше, чем в статье [4]. Это, вероятно, связано с большим сглаживанием данных, выполненным в этой работе. Отличия наших результатов от опубликованных в работах [5 – 7] заключаются в пространственном несоответствии отдельных изолиний в антициклонической области. Это вызвано тем, что в работах [5, 6] осреднение проводилось по значительно более короткому промежутку времени (7 лет), в то время как в нашей статье рассматривался 53-летний временной интервал, а, как известно, в поле ветра присутствует существенная междесятилетняя изменчивость. То же относится и к сравнению с результатами статьи [7], где осреднение проводилось по смещенному по времени и более короткому ряду данных.

Сезонная изменчивость пространственной структуры поля поверхностных течений и его завихренности. Во все сезоны в поле поверхностных течений хорошо выделяются Гольфстрим, Северное Пассатное и Гвианское течения. Максимальные скорости во все сезоны отмечаются в Гвианском течении (рис. 2). Вместе с тем в поле течений наблюдается интенсивная сезонная изменчивость. В октябре и январе усиливается Восточно-Гренландское течение. В январе интенсифицируются также Лабрадорское, Северо-Атлантическое и Северное Пассатное течения. В июле происходит ослабление Северного Пассатного течения, особенно его восточной части. В это же время заметно усиление Канарского течения, что согласуется с результатами, полученными по натурным данным в работе [17]. В июле и октябре значительно усиливаются Межпассатное противотечение и Южное Пассатное течение, что было отмечено в статье [18] по данным о сносе судов и в других работах.

Пространственное распределение величины завихренности поверхностных течений имеет значительно более сложную структуру по сравнению с завихренностью касательного напряжения трения ветра, хотя в целом и подтверждается наличие в Северной Атлантике двух крупномасштабных круговоротов – ССАК и ССЦК (рис. 2). Если в качестве границ между круговоротами рассматривать нулевые изолинии завихренности течений, то видно, что обширная область антициклонической завихренности течений между 15 – 42° с. ш., соответствующая ССАК, имеет четкую южную границу.

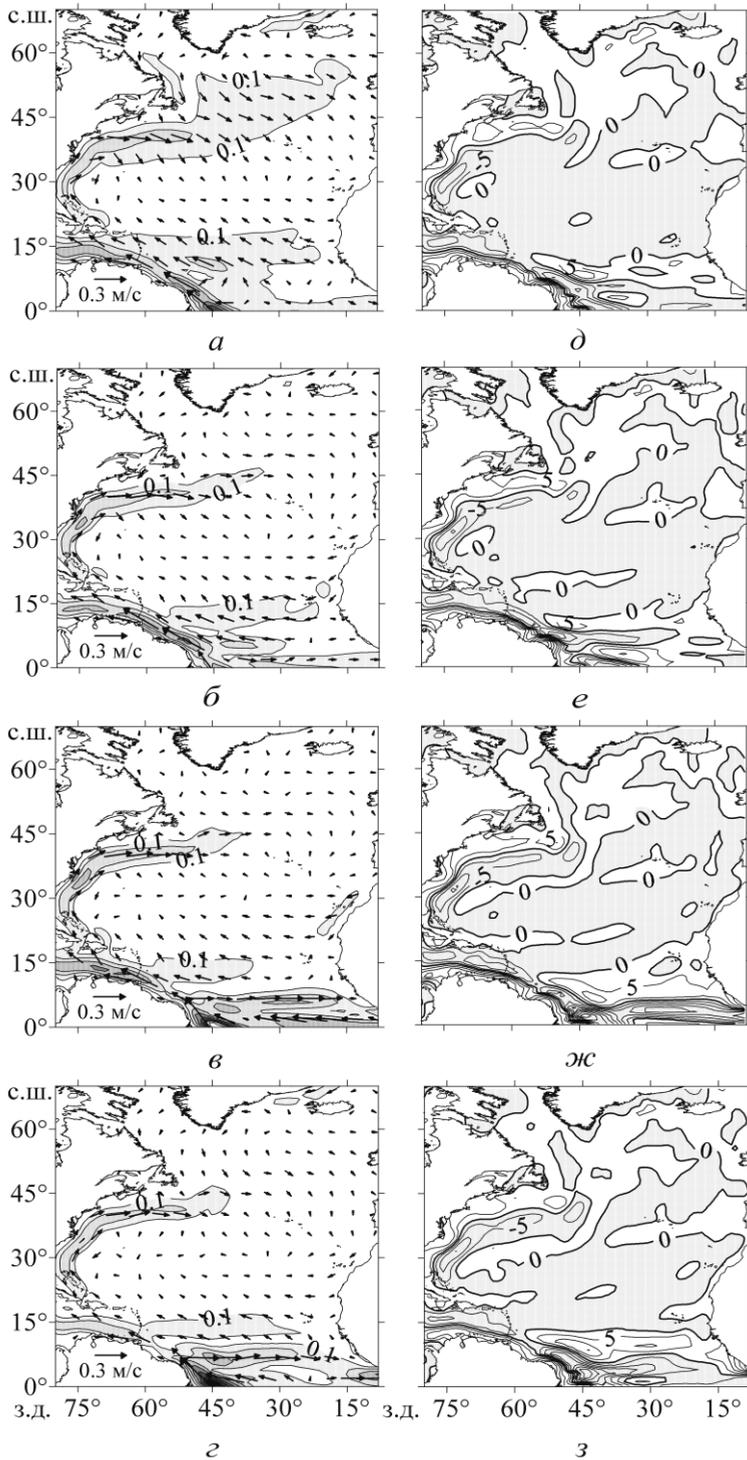


Рис. 2. Поля скорости течений (м/с) на горизонте 15 м (*а, б, в, г*; интенсивность затемнения штриховки характеризует рост величины модуля скорости течений) и завихренности поверхностных течений, $\times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ (*д, е, ж, з*; области с антициклонической завихренностью течений заштрихованы) в Северной Атлантике, осредненные за период 1959 – 2011 гг. для января (*а, д*), апреля (*б, е*), июля (*в, ж*) и октября (*г, з*)

Однако северная граница имеет более сложную структуру. Кроме того, в области ССАК присутствуют участки с циклонической завихренностью, характеризующиеся невысокими по абсолютной величине значениями завихренности противоположного знака. Такое пространственное распределение завихренности поверхностных течений является следствием того, что источник завихренности поля течений в океане за счет пространственной неоднородности ветра не является единственным [19].

Область с циклонической завихренностью, соответствующая ССЦК, присутствует во все сезоны в широтной полосе $45 - 60^\circ$ с. ш. Однако наиболее выражена она в зимний период. Южнее ССАК, между Северным и Южным Пассатными течениями, находится полоса с циклонической завихренностью в поле поверхностных течений. Усиление циклонической завихренности происходит здесь осенью при одновременном усилении Северного Пассатного течения и Межпассатного противотечения.

Наиболее высокие значения антициклонической завихренности течений во все сезоны наблюдаются в районе Гольфстрима и Гвианского течения, что связано с большими значениями сдвига скорости в этих струйных течениях, а также в области Южного Пассатного течения. Высокие значения циклонической завихренности отмечаются в тропической области и прибрежной зоне, расположенной между Гольфстримом и Северной Америкой.

В основном пространственная структура поля завихренности течений сохраняется во все сезоны. Сезонные различия проявляются в смещениях южной границы области антициклонической завихренности, соответствующей ССАК, и в изменении размеров участков с циклонической завихренностью в этой области. Как и для завихренности касательного напряжения трения ветра, южная граница крупномасштабного антициклонического круговорота смещена к северу в летние месяцы. Такое смещение границы и увеличение зонально вытянутого участка с циклонической завихренностью течений в районе Азорских о-вов в летний и осенний сезоны можно интерпретировать как уменьшение меридионального размера ССАК. На уменьшение меридионального размера круговорота летом и осенью указывалось в работе [20] на основе обработки архивных гидрографических данных. Смещение же северной границы области антициклонической завихренности течений в ее северо-западной части сдерживается влиянием береговой линии материка [21].

Зимой участки с циклонической завихренностью в ССАК имеют минимальные размеры, а в летние и осенние месяцы они увеличиваются как следствие сезонной изменчивости интенсивности течений. Так, увеличение в осенний сезон зонально вытянутого участка циклонической завихренности в восточной части океана в окрестности 35° с. ш. происходит одновременно с усилением Азорского течения, положение которого соответствует южной границе этого участка. Модельные [22, 23] и теоретические [24] исследования показывают, что область циклонической завихренности течений в окрестности Гибралтара является результатом стока соленых вод из Средиземного моря.

Во все сезоны года наблюдается участок с циклонической завихренностью течений в районе $30 - 35^\circ$ с. ш., $40 - 50^\circ$ з. д., которая может быть вызвана разветвлением Гольфстрима на две струи – Северо-Атлантическое и

Азорское течения. Наличие в этом районе циклонической петли за счет разветвления течений отмечается в статье [25]. Участок с циклонической завихренностью в окрестности 30° с. ш., 68° з. д., расположенный в зоне рециркуляции Гольфстрима, наблюдается во все месяцы исследуемого периода.

Подчеркнем, что в целом структура поля завихренности течений качественно согласуется с пространственным распределением течений, рассчитанным по дрейфтерным данным за период с октября 1992 г. по октябрь 2002 г. [26].

Внутригодовая изменчивость зонально-осредненных значений завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений. С учетом преимущественно зонального характера пространственной структуры завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений был рассчитан внутригодовой ход их зонально-осредненных значений. На рис. 3 хорошо выражено зональное чередование областей с циклонической и антициклонической завихренностью касательного напряжения трения ветра (рис. 3, а) и поверхностных течений (рис. 3, б), сохраняющееся в течение всего года.

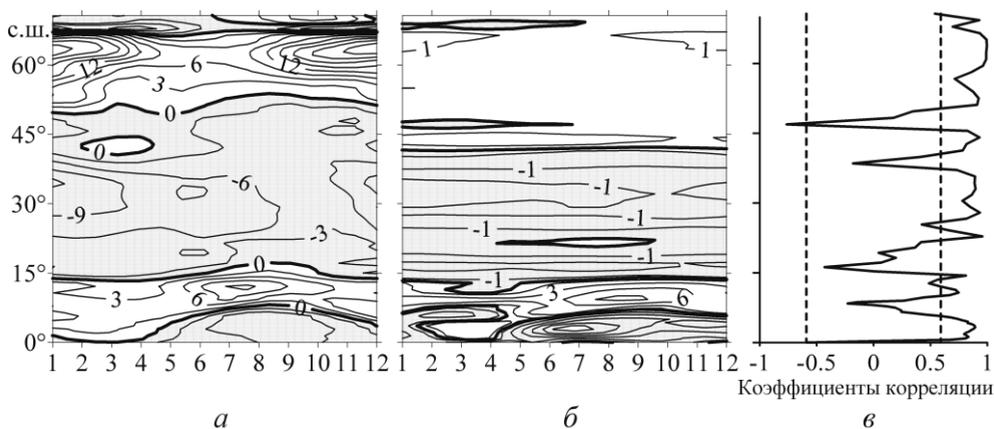


Рис. 3. Внутригодовая изменчивость зонально-осредненных значений завихренности касательного напряжения трения ветра (а) и поверхностных течений (б) в Северной Атлантике (области с антициклонической завихренностью заштрихованы), а также коэффициенты корреляции между ними (в; штриховыми линиями показаны 95%-ные доверительные интервалы)

В ВЗК максимальное значение циклонической завихренности касательного напряжения трения ветра отмечается в июле – августе (рис. 3, а), что согласуется с данными работы [7]. В области с антициклонической завихренностью касательного напряжения трения ветра, расположенной в среднем за год в районе 15 – 50° с. ш., усиление завихренности наблюдается в декабре – январе. В зоне 50 – 70° с. ш. максимальные положительные значения завихренности касательного напряжения трения ветра отмечаются в ноябре – январе, что соответствует усилению циклонической завихренности в области Исландского минимума. Хорошо видно сезонное смещение в августе – сентябре области антициклонической завихренности и ВЗК к северу (рис. 1, 3).

По зонально-осредненным данным завихренность поверхностных течений имеет следующую внутригодовую изменчивость. В тропической зоне в

области циклонической завихренности максимальные значения завихренности течений отмечаются в августе – сентябре, а минимальные – в январе (рис. 3, б). В зоне ССАК антициклоническая завихренность возрастает по абсолютной величине зимой и летом. Зона с циклонической завихренностью, соответствующая ССЦК, располагается севернее 42° с. ш. из-за влияния континентальной границы [21]. Увеличение циклонической завихренности в этой части океана происходит в декабре – январе.

Меридиональное распределение величины коэффициентов корреляции между рядами годового хода зонально-осредненной завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений приведено на рис. 3, в. Высокие положительные значения ($>0,8$) отмечаются в умеренных широтах ($50 - 68^\circ$ с. ш.), в субтропической зоне – в окрестности Азорского максимума ($27 - 36^\circ$ с. ш.) и в тропической зоне. Отрицательные значения коэффициента корреляции соответствуют положению границы областей с разным знаком завихренности.

Таким образом, внутригодовые изменения зонально-осредненных значений завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений по акватории Северной Атлантики качественно согласуются по широтным зонам. Но зонально-осредненная северная граница ССАК расположена южнее соответствующей ей границы области антициклонической завихренности касательного напряжения трения ветра. Как упоминалось выше, это связано с наличием береговой линии в северо-западной части акватории, ограничивающей проникновение субтропического круговорота в северном направлении.

Внутригодовая изменчивость средних значений завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений для районов ССАК и ССЦК. Для анализа временной изменчивости завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений в районах крупномасштабных круговоротов ССАК и ССЦК рассчитывались осредненные по областям круговоротов значения завихренности для каждого месяца. Область, соответствующая ССАК, ограничивалась 15° с. ш. с юга и 40° с. ш. с севера, а область, соответствующая ССЦК, – 50 и 65° с. ш. соответственно. По долготе обе области ограничены берегами.

Графики внутригодового хода завихренности, осредненной по указанным областям за весь исследуемый период, приведены на рис. 4. Сезонный ход завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности течений для района ССАК характеризуется двумя минимумами и двумя максимумами. Ослабление завихренности касательного напряжения трения ветра (с учетом знака завихренности) происходит в мае ($-4,84 \times 10^{-8}$ Н/м³) и сентябре ($-2,51 \times 10^{-8}$ Н/м³) (рис. 4, а), завихренности поверхностных течений – в мае ($-10,1 \times 10^{-8}$ с⁻¹) и октябре ($-9,52 \times 10^{-8}$ с⁻¹) (рис. 4, б). Усиление антициклонической завихренности касательного напряжения трения ветра и течений происходит зимой и летом. Наибольшие по абсолютной величине значения завихренности касательного напряжения трения ветра ($-6,29 \times 10^{-8}$ Н/м³) и поверхностных течений ($-11,0 \times 10^{-8}$ с⁻¹) отмечаются в январе. Второй максимум завихренности ветра наблюдается в июне ($-5,38 \times 10^{-8}$ Н/м³), а завихренности течений – в июле ($-10,9 \times 10^{-8}$ с⁻¹).

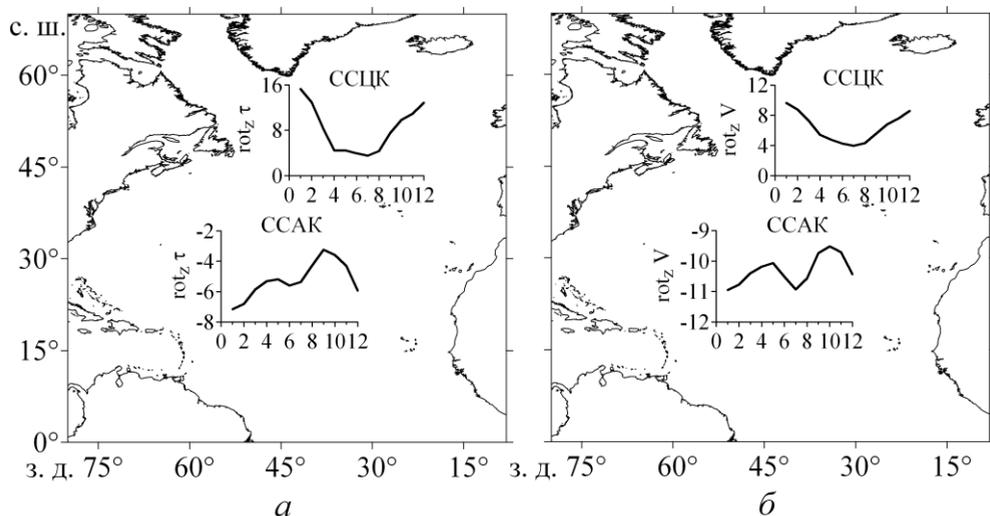


Рис. 4. Внутригодовая изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра, $\times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$ (а) и завихренности поверхностных течений, $\times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ (б) в районах ССАК и ССЦК

В тропической и субтропической областях полугодовая составляющая сезонной изменчивости наблюдается как в атмосфере, так и в океане, на что указывается во многих работах. Изменчивость, характеризующаяся двумя максимумами (летом и зимой) и двумя минимумами (осенью и весной), проявляется не только в сезонных колебаниях завихренности касательного напряжения трения ветра и течений, но и в сезонных колебаниях скорости и напряжения трения ветра, приземного давления [6, 27], интенсивности течений [28, 29], величины меридиональных переносов [7, 30].

Высокие значения циклонической завихренности касательного напряжения трения ветра в ССЦК отмечаются с сентября по март с максимумом в январе, низкие значения – с апреля по август с минимумом в июле, что согласуется с результатами работы [8]. Максимальные значения завихренности касательного напряжения трения ветра составляют $15,3 \times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$, завихренности поверхностных течений – $9,64 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, минимальные – $3,53 \times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$ и $3,98 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ соответственно.

Корреляция между внутригодовыми изменениями значений завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений, осредненных по области ССАК, составляет 0,86, по области ССЦК – 0,98.

Усиление циклонической завихренности касательного напряжения трения ветра и течений в субполярной зоне и антициклонической завихренности в субтропической зоне в январе происходит синхронно, что связано с усилением зональной циркуляции атмосферы (западных ветров и пассатов) в зимний сезон. Второе усиление антициклонической завихренности касательного напряжения трения ветра и течений отмечается летом только в субтропической зоне.

Таким образом, несмотря на сложную структуру пространственного распределения завихренности поверхностных течений, для районов крупномас-

штабных круговоротов наблюдается хорошее соответствие между внутригодовыми изменениями осредненных значений завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений.

Заключение

Исследование пространственно-временной изменчивости завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений в Северной Атлантике показало следующее.

Рассчитанное нами по данным за 1959 – 2011 гг. пространственное распределение завихренности касательного напряжения трения ветра хорошо согласуется с результатами других авторов, полученными за другие интервалы времени. В целом наши данные подтверждают оценки величин касательного напряжения трения ветра и его завихренности, выполненные авторами статьи [3], которые в ряде более поздних работ характеризовались как завышенные.

В пространственной структуре распределения завихренности поверхностных течений выделяются зона циклонической завихренности между Северным Пассатным и Южным Пассатным течениями, крупномасштабная область антициклонической завихренности, соответствующая ССАК, и область циклонической завихренности течений, соответствующая ССЦК. Пространственное распределение завихренности течений имеет более сложную структуру, чем завихренность в поле ветра. Область антициклонической завихренности, соответствующая ССАК, включает в себя участки с циклонической завихренностью, размеры которых изменяются в зависимости от сезона, что свидетельствует о важной роли других факторов (помимо завихренности поля ветра) в формировании крупномасштабной структуры циркуляции верхнего слоя вод Мирового океана.

В целом пространственная структура завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений сохраняется в течение года. Сезонная изменчивость их пространственного распределения проявляется в основном в смещении границ крупномасштабной антициклонической области в северо-восточном направлении в летний сезон.

Характер внутригодовой изменчивости значений завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений, осредненных по субтропической и субполярной областям, различен. Зимой увеличение антициклонической завихренности касательного напряжения трения ветра и течений в субтропической области происходит синхронно с усилением циклонической завихренности в субполярной области. Летом в субтропической области наблюдается второй максимум антициклонической завихренности касательного напряжения трения ветра и течений (по абсолютной величине). Корреляция между внутригодовыми изменениями значений завихренности касательного напряжения трения ветра и завихренности поверхностных течений в областях крупномасштабных круговоротов составляет 0,86 для ССАК и 0,98 для ССЦК, что подтверждает в целом преобладающую роль горизонтально-неоднородного ветра в формировании циркуляции верхнего слоя океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tomczak M., Godfrey J.S.* Regional oceanography: an introduction. – Delhi: Daya Books, 2003. – 390 p.
2. *Stommel H.M.* The Gulf Stream: a physical and dynamical description. – Berkeley and Los Angeles, California: Univ. California Press, 1958. – 230 p.
3. *Hellerman S., Rosenstein M.* Normal monthly wind stress over the World ocean with error estimates // *J. Phys. Oceanogr.* – 1983. – 13, № 7. – P. 1093 – 1104.
4. *Harrison D.E.* On climatological monthly mean wind stress and wind stress curl fields over the World ocean // *J. Clim.* – 1989. – 2, № 1. – P. 57 – 70.
5. *Trenberth K.E., Olson J.G., Large W.G.* A global ocean wind stress climatology based on ECMWF analyses // Climate and Global Dynamics Division, National Center for Atmospheric Research, 1989. – 93 p. – doi: 10.5065/D6ST7MR9.
6. *Trenberth K.E., Large W.G., Olson J.G.* The mean annual cycle in global ocean wind stress // *J. Phys. Oceanogr.* – 1990. – 20, № 11. – P. 1742 – 1760.
7. *Mayer D.A., Weisberg R.H.* A description of COADS surface meteorological fields and the implied Sverdrup transports for the Atlantic Ocean from 30-degrees-S to 60-degrees-N // *Ibid.* – 1993. – 23, № 10. – P. 2201 – 2221.
8. *Jonsson S.* Seasonal and interannual variability of wind stress curl over the Nordic Seas // *J. Geophys. Res.* – 1991. – 96, № C2. – P. 2649 – 2659.
9. *Bakun A., Nelson C.S.* The seasonal cycle of wind-stress curl in subtropical eastern boundary current regions // *J. Phys. Oceanogr.* – 1991. – 21, № 12. – P. 1815 – 1834.
10. *Henin C., Hisard P.* The North Equatorial Countercurrent observed during the Programme Francais Ocean Climat dans l'Atlantique Equatorial Experiment in the Atlantic Ocean, July 1982 to August 1984 // *J. Geophys. Res.: Oceans* (1978 – 2012). – 1987. – 92, № C4. – P. 3751 – 3758.
11. *Sverdrup H.U.* Wind-driven currents in a baroclinic ocean; with application to the equatorial currents of the eastern Pacific // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* – 1947. – 33, № 11. – P. 318 – 326.
12. *Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // *Mon. Wea. Rev.* – 2008. – 136, № 8. – P. 3018 – 3034. – doi: 10.1175/2008MWR2433.1.
13. *Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 reanalysis // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* – 2005. – 131B, № 612. – P. 2961 – 3012. – doi: 10.1256/qj.04.176.
14. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г., Сухонос П.А.* Изменчивость завихренности напряжения трения ветра над Северной Атлантикой // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – Вып. 27. – С. 200 – 205.
15. *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: Наукова думка, 1993. – С. 7 – 34.
16. *Garzoli S.L., Katz E.J.* The forced annual reversal of the Atlantic North Equatorial Countercurrent // *J. Phys. Oceanogr.* – 1983. – 13, № 11. – P. 2082 – 2090.
17. *Stramma L., Isemer H.J.* Seasonal variability of meridional temperature fluxes in the eastern North Atlantic Ocean // *J. Mar. Res.* – 1988. – 46, № 2. – P. 281 – 299.
18. *Richardson P.L., McKee T.K.* Average seasonal variation of the Atlantic equatorial currents from historical ship drifts // *J. Phys. Oceanogr.* – 1984. – 14, № 7. – P. 1226 – 1238.
19. *Саркисян А.С.* Сорок лет открытию роли совместного эффекта бароклинности и рельефа дна в моделировании климатических характеристик океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006. – 42, № 5. – С. 582 – 603.

20. *Stramma L., Siedler G.* Seasonal changes in the North Atlantic subtropical gyre // *J. Geophys. Res.* – 1988. – 93, № C7. – P. 8111 – 8118.
21. *Iselin C.* Preliminary report on long-period variations in the transport of the Gulf Stream System // *Pap. Phys. Oceanogr. Meteorol.* – 1940. – 8, № 1. – 40 p.
22. *Jia Y.* Formation of an Azores Current due to the Mediterranean overflow in a modeling study of the North Atlantic // *J. Phys. Oceanogr.* – 2000. – 30, № 9. – P. 2342 – 2358.
23. *Ozgokmen T.M., Chassignet E.P., Rooth C.G.H.* On the connection between the Mediterranean outflow and the Azores Current // *Ibid.* – 2001. – 31, № 2. – P. 461 – 480.
24. *Spall M.A.* Buoyancy-forced circulations around islands and ridges // *J. Mar. Res.* – 2000. – 58, № 6. – P. 957 – 982.
25. *Klein B., Siedler G.* On the origin of the Azores Current // *J. Geophys. Res.: Oceans* (1978 – 2012). – 1989. – 94, № C5. – P. 6159 – 6168.
26. *Niiler P.P., Maximenko N.A., McWilliams J.C.* Dynamically balanced absolute sea level of the global ocean derived from near-surface velocity observations // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – 30, № 22. – doi: 10.1029/2003GL018628.
27. *Wang C.* Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate // *Clim. Dyn.* – 2007. – 29, № 4. – P. 411 – 422.
28. *Fuglister F.C.* Annual variations in current speeds in the Gulf Stream system // *J. Mar. Res.* – 1951. – 10, № 1. – P. 119 – 127.
29. *Суховей В.Ф.* Изменчивость гидрологических условий Атлантического океана. – Киев: Наукова думка, 1977. – 215 с.
30. *Lee T.N., Johns W.E., Zantopp R.J. et al.* Moored observations of western boundary current variability and thermohaline circulation at 26.5 in the subtropical North Atlantic // *J. Phys. Oceanogr.* – 1996. – 26, № 6. – P. 962 – 983.

Seasonal variability of vorticity of wind friction tangential tension and surface currents in the North Atlantic

A.B. Polonsky, I.G. Shokurova, P.A. Sukhonos

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: apolonsky5@mail.ru, igshokurova@mail.ru, pasukhonis@mail.ru*

Seasonal variability of spatial distribution and the vorticity values of wind friction tangential stress and surface currents in the North Atlantic are analyzed based on the *ORA-S3* reanalysis data for 1959 – 2011. It is revealed that strengthening (weakening) of cyclonic vorticity of wind friction tangential stress and surface currents in the sub-polar zone takes place in January (July), and in the tropics — in August – September (January). Strengthening (weakening) of anticyclonic vorticity of wind friction tangential stress and surface currents in the subtropical zone is observed in January and June – July (May and September – October). Correlation between the intra-annual changes of vorticity values of wind friction tangential stress and surface currents averaged over the area of the North Atlantic subtropical anticyclonic gyre is 0.86, whereas the same value resulted from averaging over the area of the North Atlantic sub-polar cyclonic gyre – 0.98. The values of wind friction tangential stress and its vorticity obtained by S. Hellerman and M. Rosenstein in 1983 are confirmed (though in some later papers they were characterized as overestimated).

Keywords: vorticity of wind friction tangential stress, vorticity of surface currents, seasonal variability, North Atlantic.