

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАСАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕНИЯ ВЕТРА, ПОЛЯ ТЕЧЕНИЙ И ИХ ЗАВИХРЕННОСТИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

© 2017 г. Александр Б. Полонский, Павел А. Сухонос

Институт природно-технических систем РАН, Севастополь, Россия

e-mail: apolonsky5@mail.ru, pasukhonis@mail.ru

Поступила в редакцию 16.02.2015 г.

Аннотация. Роль Атлантического океана в климатических изменениях в Атлантико-Европейском регионе обуславливает важность изучения пространственно-временной изменчивости поля течений, а также поля ветра, возбуждающего циркуляцию вод в океане. Анализ литературы показывает, что данные о внутригодовой изменчивости течений в Северной Атлантике носят противоречивый характер, а достоверную информацию о межгодовой изменчивости циркуляции океана в некоторых регионах Северной Атлантики получить невозможно из-за отсутствия длительных океанографических наблюдений. Цель настоящей работы — уточнение внутригодовых изменений и анализ межгодовых изменений отклика циркуляции верхнего слоя Северной Атлантики на атмосферное вынуждение (касательное напряжение трения ветра и его завихренность) по однородным и длительным массивам данных ре-анализа. Подтверждаются особенности внутригодовой изменчивости касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренностей в субтропической и субполярной областях Северной Атлантики. Севернее 15–20° с.ш. на внутригодовые изменения касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренностей в целом приходится менее трети их суммарной изменчивости, остальная дисперсия обусловлена межгодовыми — десятилетними колебаниями. В Субтропической Атлантике в январе наблюдается тенденция к усилению касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и антициклонической завихренности ветра и течений во второй половине XX в. В сентябре, начиная с середины 1970-х годов, отмечается тенденция к ослаблению этих величин, что приводит к долговременному увеличению амплитуды годового хода. В Субполярной Атлантике с конца 1950-х годов в месяцы с экстремальными величинами в годовом ходе происходит усиление касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и циклонической завихренности ветра и течений. При этом значимое увеличение амплитуды годового хода не выражено.

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

DOI:10.15356/0373-2444-2017-1-62-73

Variability of the Wind Stress, the Field of Currents, Wind Stress Curl and Vorticity of Surface Currents in the North Atlantic

Aleksandr B. Polonsky and Pavel A. Sukhonos

Institute of natural and technical systems, Russian Academy of Science, Sevastopol, Russia

e-mail: apolonsky5@mail.ru, pasukhonis@mail.ru

Abstract. The role of the Atlantic Ocean in climate changes in the Atlantic-European region determines the importance of studying spatial-temporal variability of the field of currents and the wind field generating the circulation of water in the ocean. The analysis of literature shows that data on seasonal variability of currents in the North Atlantic are controversial and reliable information on the interannual variability of ocean circulation in some regions of the North Atlantic it is impossible to obtain due to the lack of long oceanographic observations. The purpose of this study was clarifying seasonal changes and analyzing of interannual changes of the response of circulation of the upper layer of the North Atlantic on atmospheric forcing (wind stress and wind stress curl) by homogeneous and long-term datasets of re-analysis. Features of seasonal variability of wind stress, velocities of currents and their vorticity in subtropical and subpolar areas of the North Atlantic are

confirmed. To the north of 15–20° of north latitude, seasonal variability of wind stress, velocities of currents and their vorticity generally accounts for less than one third of their total variability, the remaining dispersion is due to interannual and decennial fluctuations. In the Subtropical Atlantic in January there was a trend toward increased seasonal variability of wind stress, velocities of currents and anticyclonic wind stress curl and vorticity of surface currents in the second half of the 20th century. In September, since the mid-1970s, there is the tendency towards the weakening of these values, which leads to a long-term increase in the amplitude of the annual cycle. In the Subpolar Atlantic since the late 1950s, during the months with extreme values in the annual cycle there is an increase in seasonal variability of wind stress, velocities of currents and cyclonic wind stress curl and vorticity of surface currents. While, a significant increase in the amplitude of the annual cycle it is not revealed.

Keywords: seasonal and interannual variability, wind stress curl, vorticity of the surface currents, the North Atlantic.

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 необходимость изучения пространственно-временной изменчивости поля течений, а также поля ветра, возбуждающего циркуляцию вод в океане.

Основные звенья крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике, выделяемые по среднегодовым данным наблюдений, – это Северный субтропический антициклонический круговорот (ССАК) и Северный субполярный циклонический круговорот (ССЦК). Известно, что система ветров, включающая западные ветры в районе умеренных широт и северо-восточные пассаты в тропической зоне, является основной движущей силой циркуляции вод ССАК [38], который образуют следующие течения: с запада – теплое течение Гольфстрим, с севера его продолжение – Северо-Атлантическое и Азорское течения, с востока – холодное Канарское течение, а с юга – Северное пассатное течение. ССЦК, возникший вследствие уменьшения интенсивности западного переноса в высоких широтах, состоит из следующих течений: Северо-Атлантического, Ирмингера, Восточно- и Западно-Гренландских и Лабрадорского [39].

К настоящему времени проведено большое число исследований по влиянию изменчивости атмосферной циркуляции на структуру круговоротов и изменчивость интенсивности течений Северной Атлантики. Пространственное распределение величины завихренности поля ветра и основные особенности ее сезонной изменчивости хорошо изучены как для всего Мирового океана [21, 22, 41], так и для его отдельных регионов, включая Северную Атлантику [8, 18, 23, 25, 31, 40]. Вместе с тем величины касательного напряжения трения ветра и его завихренности существенно различаются по данным разных литературных источников. Это обусловлено использованием

различных типов данных, их разным пространственно-временным осреднением и методическими различиями при определении величины коэффициентов сопротивления.

Межгодовые изменения завихренности касательного напряжения трения ветра вызывают отклик крупномасштабной циркуляции океана. Реакция Гольфстрима на межгодовые колебания завихренности крупномасштабного поля ветра над ССАК происходит приблизительно с двухлетним запаздыванием [1, 38]. Межгодовые колебания завихренности крупномасштабного поля ветра над Северной Атлантикой являются главным фактором, вызывающим изменчивость расходов Норвежского течения [36]. Этот расход максимально коррелирован с зонально-проинтегрированной завихренностью касательного напряжения трения ветра на 55° с.ш. при запаздывании в 15 месяцев. Более сильные зимние западные ветры приводят к ослаблению интенсивности Западно-Гренландского течения летом. Кроме того, обнаружено влияние изменчивости завихренности напряжения трения ветра на интенсивность Западно-Гренландского течения на внутригодовых [19] и межгодовых масштабах [37]. Эта изменчивость в целом приводит к изменению циркуляции в море Лабрадор [33].

Относительно временной изменчивости интенсивности различных океанических течений по акватории Северной Атлантики опубликованы прямо противоположные точки зрения. Например, данные за период 1957–1966 гг. показали, что Канарское течение интенсифицируется одновременно с северо-восточным пассатом зимой и ослабевает осенью [15]. Другие авторы утверждают, что Канарское течение усиливается летом и осенью [34].

Анализ архива наблюдений показал, что Азорское течение интенсифицируется летом [27]. Расчет его геострофических скоростей по гидрологическим данным Национального центра океанографических данных за период 1945–1991 гг. выявил, что максимальные расходы течения наблюдаются

весной, а минимальные — зимой [7]. В то же время спутниковые данные указывают на повышенную изменчивость Азорского течения зимой [13], при этом авторы отмечают, что противоречия между результатами обусловлены межгодовой изменчивостью крупномасштабной циркуляции.

Сезонная изменчивость Лабрадорского течения долгое время оставалась невыясненной. Так, авторами [32] не обнаружено никаких доказательств систематического изменения геострофических расходов течения на внутригодовом масштабе. В работе [12] отмечено уменьшение расходов течения с апреля по июль. Скорости Лабрадорского течения проявляют выраженные сезонные вариации с минимумом в марте—апреле и максимумом в октябре [29]. Модельное исследование, проведенное в работе [20], показало, что существует отчетливый сезонный цикл течения с интенсификацией в осенне-зимний период и ослаблением в весенне-летний.

Данные заякоренных буев показали, что расход Восточно-Гренландского течения не проявляет заметной внутригодовой изменчивости [16], при этом расхождения величин расходов течения, полученных разными авторами, объясняются наличием межгодовых изменений [6]. Однако в [14] отмечено, что расходы системы Восточно-Гренландское течение — течение Ирмингера подвержены внутригодовой изменчивости с максимумом (минимумом) в январе (июле), а на межгодовом масштабе за период 1992–2009 гг. не проявляют значимых изменений, находясь в прямой связи с изменчивостью поля завихренности напряжения трения ветра над морем Ирмингера.

Гольфстрим характеризуется ярко выраженной внутригодовой изменчивостью [17]. Вместе с тем информация о межгодовой изменчивости кинематических характеристик Гольфстрима все еще крайне противоречива. Некоторые авторы указывают на то, что интенсивность Гольфстрима в субтропических широтах (на разрезе по 25° с.ш.) в последнее время ослабла на 30% [11]. Однако в работах других авторов приводятся убедительные данные о том, что перенос вод, осуществляемый системой Гольфстрим — Северо-Атлантическое течение, со второй половины 1960-х годов до конца XX столетия имеет четко выраженный положительный тренд [2]. Таким образом, данные о внутригодовой изменчивости течений в Северной Атлантике носят противоречивый характер, а достоверную информацию о межгодовой изменчивости циркуляции океана в некоторых регионах получить невозможно из-за отсутствия длительных океанографических наблюдений.

Данные современных ре-анализов по скоростям течений дают возможность выполнить расчеты завихренности течений за длительный период на регулярной сетке. Для анализа временной изменчивости циркуляции вод мы рассматриваем изменения завихренности поверхностных течений в круговоротах. Выбор такой характеристики объясняется тем, что ее среднее по площади значение позволяет исследовать изменчивость общей циркуляции круговоротов. При этом расчеты завихренности поверхностных течений ранее для данного региона не выполнялись. Количественная связь между завихренностью приповерхностных течений и завихренностью приводного ветра ранее также не анализировалась. Поэтому *цель настоящей работы* — уточнение внутригодовых изменений и анализ межгодовых изменений отклика циркуляции верхнего слоя Северной Атлантики на атмосферное вынуждение (касательное напряжение трения ветра и его завихренность) по однородным и длительным массивам данных ре-анализа.

Данные и методика их обработки. В работе используются данные по касательному напряжению трения ветра и скорости течений на горизонте 15 м океанического ре-анализа *ORA-S3* Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*ECMWF*) [9] за период с января 1959 г. по декабрь 2011 г. Пространственное разрешение данных составляет 1°×1°, а в экваториальной зоне (±10° широты) — 0.3° в меридиональном направлении и 1° в зональном. В ре-анализе *ORA-S3* данные о касательном напряжении трения ветра используются из атмосферного ре-анализа *ERA-40* [42] за период с января 1959 г. по июнь 2002 г. и оперативного анализа по модели *ERA-40* с июля 2002 г. по декабрь 2011 г. Для каждого месяца рассчитана завихренность касательного напряжения трения ветра 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 — компоненты вектора напряжения трения ветра в зональном x и меридиональном y направлениях.

Завихренность поверхностных течений для каждого месяца рассчитывалась 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 — компоненты вектора скорости течений в зональном x и меридиональном y направлениях.

Вычисления выполнялись для каждого месяца в узлах сетки, являющихся центрами квадратов, к вершинам которых отнесены данные. Для

анализа связи между изменчивостью завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений рассчитывались осредненные по районам крупномасштабных круговоротов (ССАК и ССЦК) значения завихренности. Эти значения характеризуют завихренность всего крупномасштабного круговорота в целом и служат для оценки интенсивности циркуляции в круговороте, в приближении, что область является односвязной. Первая область, соответствующая ССАК, ограничена по широте 15° с.ш. (с юга) и 40° с.ш. (с севера), вторая, соответствующая ССЦК, — 50° и 65° с.ш., соответственно. По долготе обе области ограничены берегами. Выбор таких границ обусловлен особенностями меридионального смещения круговоротов на внутригодовом масштабе [4]. Затем путем осреднения ежемесячных величин касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренностей были получены ряды среднееголетних месячных значений и 53-летние ряды значений в месяцы с экстремальными величинами.

Положительное направление вертикальной оси z направлено вверх, т.е. при анализе пространственного распределения средних величин завихренности под антициклонической (циклонической) завихренностью понимаются их отрицательные (положительные) значения.

Для анализа вклада сезонного хода в общую изменчивость касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренностей по акватории Северной Атлантики были рассчитаны оценки дисперсий исходных временных рядов, осредненного сезонного хода и остаточных временных рядов (т.е. временных рядов, полученных после удаления сезонного хода) в каждом узле сетки.

Результаты. 1. Среднееголетние поля касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренности. Осредненное за исследуемый период поле касательного напряжения трения ветра и его модуль показаны на рис. 1а. Пространственная 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 величины модуля касательного напряжения трения ветра наблюдается в районе северо-восточного пассата (между 10 и 20° с.ш.), затем отмечаются его уменьшение до нуля в окрестности 30° с.ш. и постепенное увеличение в северном направлении с максимальными значениями в области западного переноса.

В поле поверхностных течений хорошо выделяются Гольфстрим, Северное пассатное течение, Межпассатное противотечение и Гвианское течение. Максимальные скорости отмечаются в Гвианском течении (рис. 1б).

Пространственное распределение завихренности касательного напряжения трения ветра над Северной Атлантикой по данным, осредненным за 53 года, представлено на рис. 1в. Северная часть акватории в основном занята областью с циклонической завихренностью. В этой области экстремальное значение завихренности касательного напряжения трения ветра соответствует Исландскому минимуму атмосферного давления. В субтропиках и части тропиков (в среднем до 10 – 15° с.ш.) находится область антициклонической, а южнее область циклонической завихренности, соответствующая Внутритропической зоне конвергенции (ВЗК). В антициклонической области, по многолетним данным, выделяются два центра с максимальными (по абсолютной величине) значениями отрицательной завихренности — Азорский и Бермудский максимумы. У берегов Португалии в районе апвеллинга наблюдается область циклонической завихренности, соответствующая зоне апвеллинга, что согласуется с данными работы [8].

Пространственное распределение величины завихренности поверхностных течений имеет значительно более сложную структуру по сравнению с завихренностью касательного напряжения трения ветра, хотя в целом и подтверждает наличие в Северной Атлантике двух крупномасштабных круговоротов — ССАК и ССЦК (рис. 1г). 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. Однако северная граница имеет более сложную структуру. Кроме того, внутри круговоротов присутствуют участки, 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 [5].

Область с циклонической завихренностью, соответствующая ССЦК, присутствует во все сезоны в широтной полосе 45 – 60° с.ш. Однако она наиболее выражена в зимний период. Южнее ССАК, между Северным и Южным пассатными

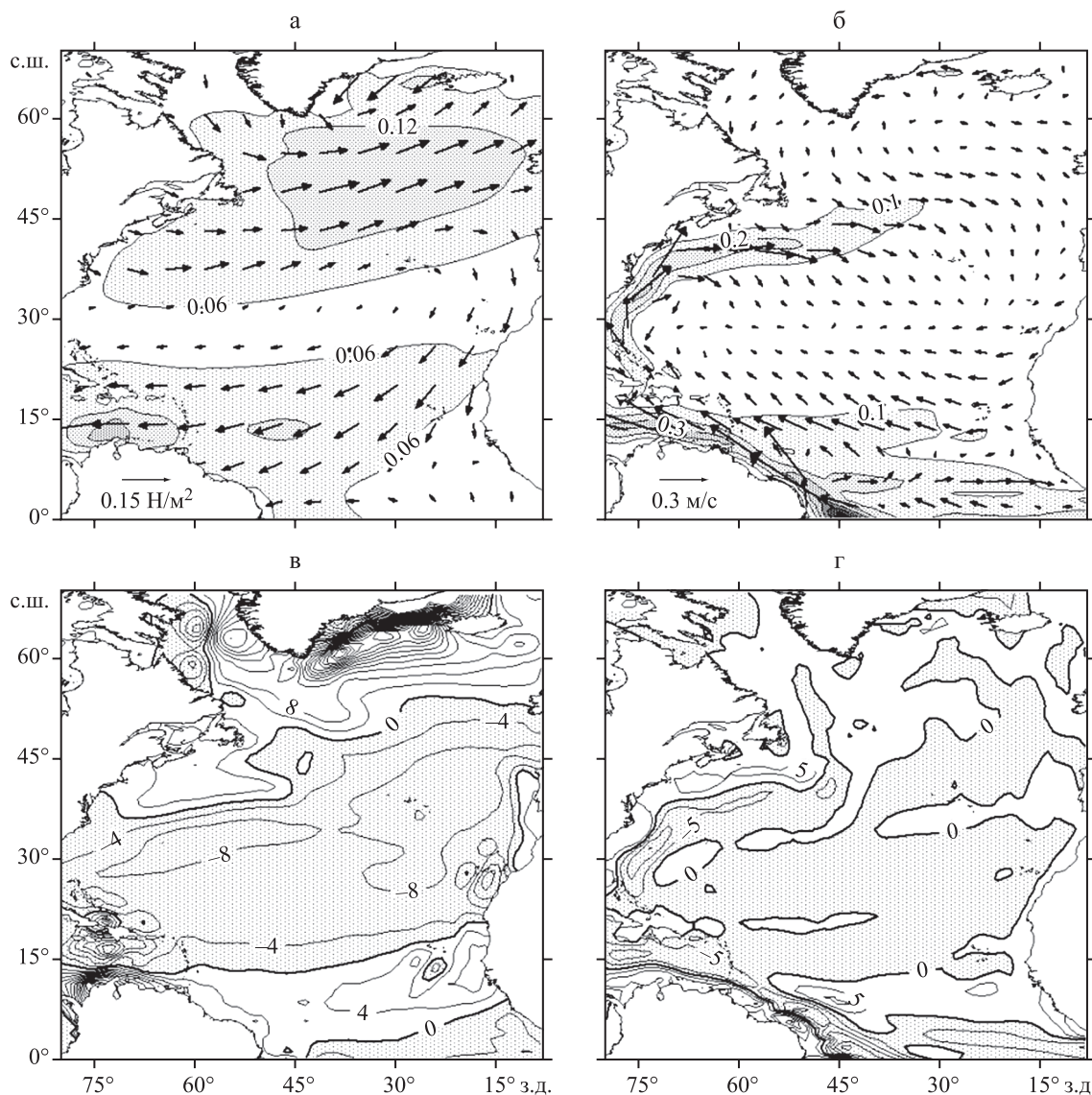


Рис. 1. Поля касательного напряжения трения ветра, Н/м^2 (а), скорости течений, м/с (б), завихренности касательного напряжения трения ветра, $\times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$ (в) и завихренности течений, $\times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ (г) в Северной Атлантике, осредненные за период 1959–2011 гг. Области с антициклонической завихренностью на рис 1 в, г затемнены.

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 западных пограничных струйных течениях, а также в области Южного пассатного течения. Высокие значения циклонической завихренности приурочены к тропической области

и прибрежной зоне между Гольфстримом и Северной Америкой.

2. Внутригодовая изменчивость касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренности в ССАК и ССЦК. Наибольшие значения касательного напряжения трения ветра (0.083 Н/м^2) и скорости течений (0.063 м/с), осредненных по акватории ССАК, наблюдаются в январе, а наименьшие — в сентябре (для напряжения трения ветра, 0.044 Н/м^2) и в октябре (для скоростей течений, 0.052 м/с). В осредненном годовом цикле максимальные значения для завихренности касательного напря-

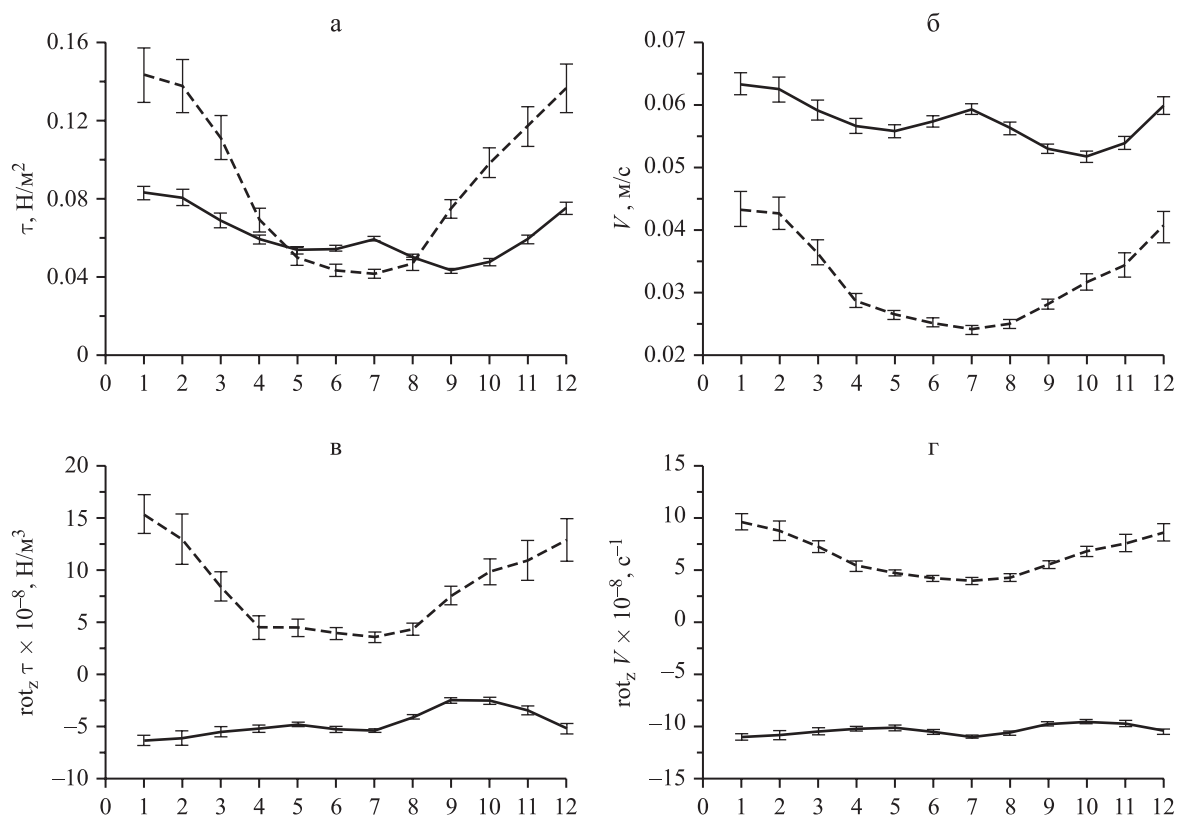


Рис. 2. Внутригодовая изменчивость касательного напряжения трения ветра, H/m^2 (а), скорости течений, м/с (б), завихренности касательного напряжения трения ветра, $\times 10^{-8} \text{ H/m}^3$ (в) и завихренности течений, $\times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ (г) осредненной по акватории ССАК (сплошная линия) и ССЦК (пунктирная линия) за период 1959–2011 гг. Вертикальные тонкие линии – 95% доверительные интервалы.

жения трения ветра ($-2.51 \times 10^{-8} \text{ H/m}^3$) отмечаются в сентябре, для завихренности поверхностных течений ($-9.52 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$) – в октябре. Минимальные (с учетом знака) значения завихренности касательного напряжения трения ветра ($-6.29 \times 10^{-8} \text{ H/m}^3$) и завихренности течений ($-10.95 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$) отмечаются в январе (рис. 2).

Усиление касательного напряжения трения ветра, скоростей течений, антициклонической завихренности ветра и течений наблюдается не только зимой, но и летом. Вторичный максимум для касательного напряжения трения ветра (0.06 H/m^2) и скоростей течений (0.06 м/с), антициклонической завихренности напряжения трения ветра ($-5.38 \times 10^{-8} \text{ H/m}^3$), антициклонической завихренности течений ($-10.93 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$) отмечается в июле, а вторичный минимум – 0.054 H/m^2 , 0.056 м/с , $-5.19 \times 10^{-8} \text{ H/m}^3$, $-10.01 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ в мае, соответственно (рис. 2).

Разность экстремальных значений осредненного внутригодового цикла для касательного напряжения трения ветра составляет 0.04 H/m^2 , скоростей течений – 0.012 м/с , завихренности напряжения

трения ветра – $3.78 \times 10^{-8} \text{ H/m}^3$, завихренности поверхностных течений – $1.44 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$. По акватории ССАК наибольшие межгодовые отклонения от средних значений как для касательного напряжения трения ветра и скоростей течений, так и для их завихренностей наблюдаются в зимний период с максимумом в январе и наименьшие осенью с минимумом в сентябре.

Максимальные значения всех исследуемых характеристик по акватории ССЦК отмечаются в январе. Для касательного напряжения трения ветра они составляют 0.14 H/m^2 , скоростей течений – 0.043 м/с , завихренности касательного напряжения трения ветра – $15.3 \times 10^{-8} \text{ H/m}^3$ и завихренности течений – $9.64 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, а минимальные в июле – 0.041 H/m^2 , 0.024 м/с , $3.53 \times 10^{-8} \text{ H/m}^3$, $3.98 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, соответственно. При этом полугодовая гармоника в ССЦК практически не наблюдается (рис. 2).

Разность экстремальных значений осредненного внутригодового цикла для касательного напряжения трения ветра составляет 0.11 H/m^2 , скоростей течений – 0.019 м/с , завихренности

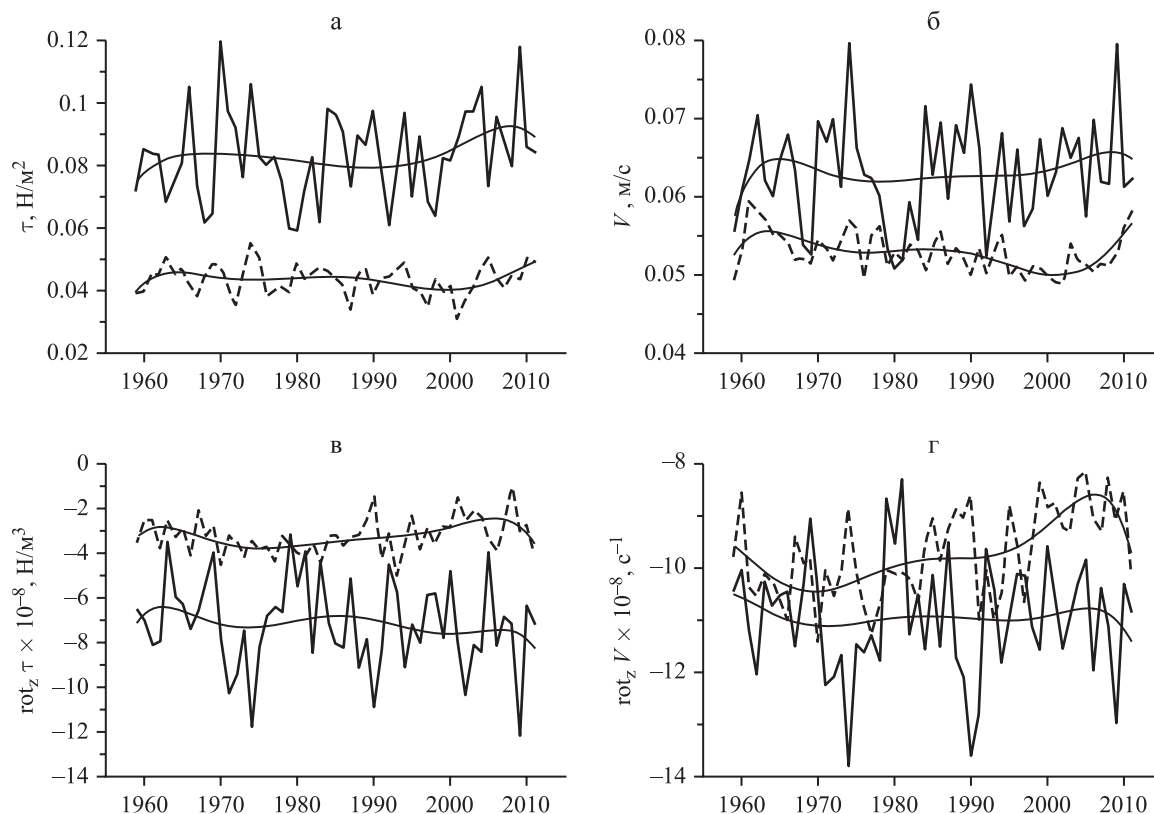


Рис. 3. Межгодовые колебания касательного напряжения трения ветра, Н/м^2 (а), скоростей течений, м/с (б), завихренности напряжения трения ветра, $\times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$ (в) и завихренности течений, $\times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ (г) для января (сплошная линия) и сентября (пунктирная линия) осредненные по акватории ССАК за период 1959–2011 гг. Сглаженные кривые на (а–г) – аппроксимационные полиномы 6-й степени.

напряжения трения ветра — $11.8 \times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$, завихренности поверхностных течений — $5.67 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$. Наибольшие межгодовые отклонения от средних значений как для касательного напряжения трения ветра и скоростей течений, так и для их завихренностей наблюдаются в зимний сезон с максимумом в январе, а наименьшие — летом с минимумом в июле. Пространственное распределение относительных вкладов сезонного хода в общую изменчивость рассматриваемых характеристик демонстрирует некоторые общие черты. Наибольшие вклады (более 85%) внутри годового хода в суммарную изменчивость наблюдаются в Тропической Атлантике из-за суперпозиции выраженного годового хода в интенсивности пассатов и наличия муссонного эффекта. Севернее 15° с.ш. вклад сезонного хода в общую изменчивость анализируемых характеристик падает до 35%. Отметим, вместе с тем, что в районе Гольфстрима и в области Канарского течения вклад сезонного хода скорости течений и завихренности течений может достигать 60%.

3. Межгодовая изменчивость касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их

завихренности в области ССАК и ССЦК. Для анализа межгодовых изменений касательного напряжения трения ветра, скорости течений и их завихренностей рассматривались осредненные по крупномасштабным круговоротам (ССАК и ССЦК) значения. Межгодовые колебания анализировались для месяцев, в которые наблюдаются экстремальные значения в годовом ходе: для ССАК — январь и сентябрь, для ССЦК — январь и июль. В январе они характеризуются повышенной интенсивностью и ростом амплитуды межгодовых флуктуаций (рис. 3).

Отношение величины дисперсии межгодовых колебаний значений в январе к соответствующей величине в сентябре для касательного напряжения трения ветра составляет 8.9, скоростей течений — 6.4, завихренности напряжения трения ветра — 6.2, завихренности поверхностных течений — 1.7. Отмечается значительная межгодовая изменчивость рассматриваемых характеристик, при этом размах между абсолютными максимумами и минимумами различных величин в январе составляет: для касательного напряжения трения ветра — 0.06 Н/м^2 , скорости течений — 0.029 м/с ,

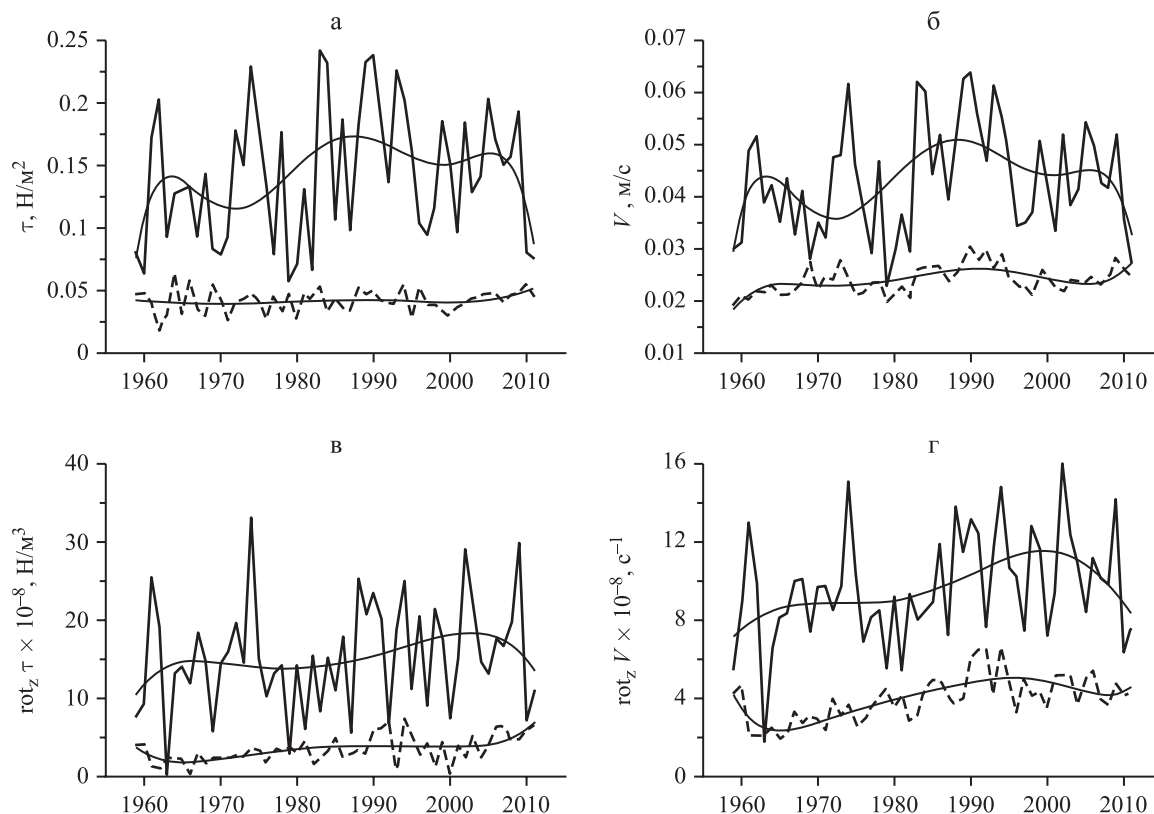


Рис. 4. Межгодовые колебания касательного напряжения трения ветра, Н/м^2 (а), скоростей течений, м/с (б), завихренности напряжения трения ветра, $\times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$ (в) и завихренности течений, $\times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ (г) для января (сплошная линия) и сентября (пунктирная линия) осредненные по акватории ССЦК за период 1959–2011 гг. Сглаженные кривые на (а–г) – аппроксимационные полиномы 6-й степени.

завихренности касательного напряжения трения ветра – $8.96 \times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$, завихренности поверхностных течений – $5.46 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$.

На десятилетних масштабах для января отмечается тенденция к усилению касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и антициклонической завихренности ветра и течений в ССАК, а для сентября, начиная с середины 1970-х годов, характерна тенденция к ослаблению интенсивности ветров и течений.

В области ССЦК межгодовые флуктуации касательного напряжения трения ветра, скорости течений и циклонической завихренности ветра и течений характеризуются повышенной интенсивностью в январе, так же как и в ССАК (рис. 4).

Отношение величины дисперсии межгодовых колебаний в январе к соответствующей величине в июле для касательного напряжения трения ветра составляет 33, скоростей течений – 15.9, завихренности напряжения трения ветра – 15.8, завихренности поверхностных течений – 5.5. Таким образом, преобладающая часть межгодовой изменчивости интенсивности циркуляции

в Субполярной Атлантике наблюдается в зимние месяцы. Отмечается значительная межгодовая изменчивость рассматриваемых характеристик, при этом размах между их абсолютными максимумами и минимумами в январе за исследуемый период для касательного напряжения трения ветра составляет 0.18 Н/м^2 , скорости течений – 0.04 м/с , завихренности напряжения трения ветра – $32.7 \times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$, завихренности поверхностных течений – $14.1 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$.

Обсуждение результатов. Величина завихренности касательного напряжения трения ветра, полученная в настоящей работе, соответствует результатам [22]. Вместе с тем эти величины примерно на 20–30% завышены по сравнению с [21]. Это, вероятно, связано с использованием процедуры дополнительного сглаживания данных, проведенного в [21]. Отличия наших результатов от опубликованных в [23, 31, 40, 41] заключаются в пространственном несоответствии отдельных изолиний завихренности напряжения трения ветра над акваторией Северной Атлантики.

Пространственно-временная изменчивость области антициклонической завихренности касательного напряжения трения ветра в Субтропической Атлантике проанализирована в работе [3]. Область антициклонической завихренности течений в море Лабрадор (50° с.ш., 47° з.д.) наблюдается как по данным наблюдений [28], так и по результатам моделирования [26]. Модельное исследование выявило, что структура рециркуляции в окрестности Лабрадорского течения определяется течением, которое вызвано локальным ветром и подвержено влиянию рельефа дна. Область циклонической завихренности течений в пригубралтарском районе является результатом стока соленых вод из Средиземного моря [24]. Во все сезоны отмечается участок с циклонической завихренностью течений в районе $30\text{--}35^\circ$ с.ш., $40\text{--}50^\circ$ з.д., который можно связать с разветвлением Гольфстрима на две струи – Североатлантическое течение и Азорское течение. Наличие в этом районе циклонической петли за счет разветвления течений отмечается в [27]. Участок с циклонической завихренностью в окрестности 30° с.ш., 68° з.д., расположенный в зоне рециркуляции Гольфстрима, отмечается во все месяцы. Заметим, что в целом структура поля завихренности течений верхнего слоя Северной Атлантики качественно согласуется со структурой поля течений, полученного в статье [35].

Изменение интенсивности ветров и течений в Субтропической Атлантике характеризуется годовой и полугодовой периодичностью [17, 41, 43]. Изменчивость, характеризующаяся двумя максимумами (летом и зимой) и двумя минимумами (осенью и весной), проявляется не только в сезонных колебаниях интенсивности ветров и течений, но и в колебаниях приземного давления [43] и величин меридиональных переносов [31].

Высокие значения касательного напряжения трения ветра и скоростей течений, а также их циклонической завихренности 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 [14, 20, 25].

Максимальные сезонные вариации завихренности касательного напряжения трения ветра отмечаются в западной части ВЗК [18], что также подтверждается нашими результатами. Малость вклада сезонного хода анализируемых характеристик севернее 15° с.ш. в общую изменчивость косвенно согласуется с выводом автора работы [44]. Полученное в настоящей работе распределение вкладов дисперсии внутригодового хода в суммарную дисперсию касательного напряжения

трения ветра и его завихренности за 53-летний период (1959–2011 гг.) уточняет результаты статьи [41, рис. 15], полученные для 7-летнего периода (1980–1986 гг.).

Достаточно большое число работ посвящено резким межгодовым изменениям циркуляционных характеристик в ССЦК. В частности, многие авторы отметили *резкое ослабление интенсивности* циклонической циркуляции в ССЦК в середине 1990-х годов [10, 30]. При этом одни авторы указывают, что подобная эволюция циркуляции в круговороте проявляется как часть десятилетней изменчивости и обусловлена изменениями как тепловых потоков, так и завихренности напряжения трения ветра [10]. Другие утверждают, что ослабление ССЦК не является частью изменчивости десятилетнего масштаба и не может быть объяснено только изменением атмосферного воздействия [30].

По данным, анализируемым в настоящей работе, действительно отмечается *уменьшение* касательного напряжения трения ветра и скоростей течений в ССЦК *в середине 1990-х годов*. Однако, как видно из рис. 4, этот спад не является резким, и его величина находится в пределах среднего квадратического отклонения. К тому же *за весь исследуемый период (53 года)* для ССЦК *характерна тенденция к усилению* поверхностной циркуляции вод в Субполярной Атлантике в период 1959–2011 гг.

Заключение. Исследование пространственно-временной изменчивости касательного напряжения трения ветра, скоростей приповерхностных течений и их завихренностей по акватории Северной Атлантики показало следующее.

Пространственное распределение завихренности касательного напряжения трения ветра по данным за 1959–2011 гг. хорошо согласуется с полученными ранее распределениями в работах других авторов. Отличия заключаются в пространственном несоответствии отдельных изолиний и обусловлены использованием различных массивов данных для вычисления завихренности касательного напряжения трения ветра за различные периоды при наличии междесятилетней изменчивости в поле ветра. Величины касательного напряжения трения и его завихренности соответствуют оценкам, выполненным авторами работы [22], но в ряде более поздних работ характеризовались как завышенные.

Пространственное распределение завихренности течений верхнего слоя океана имеет более сложную структуру по сравнению

с распределением завихренности касательного напряжения трения ветра. В поле поверхностных течений выделяются зона циклонической завихренности течений между Северным пассатным и Южным пассатным течениями, крупномасштабная область антициклонической завихренности, соответствующая ССАК, и область циклонической завихренности течений, соответствующая ССЦК. Вместе с тем в областях крупномасштабных океанических круговоротов присутствуют участки, характеризующиеся невысокими по абсолютной величине значениями завихренности течений верхнего слоя противоположного знака, что свидетельствует о важной роли других факторов (помимо завихренности поля ветра) в формировании крупномасштабной структуры океанической циркуляции верхнего слоя в некоторых районах.

Подтверждаются особенности внутригодовой изменчивости касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренностей в Северной Атлантике. Зимой интенсификация ветров и течений в субтропической области происходит синхронно с усилением ветров и течений в субполярной области. Летом в субтропической области наблюдается второй максимум касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренности (по абсолютной величине), что не прослеживается в субполярной области. Хорошее согласие внутригодовых изменений рассматриваемых характеристик подтверждает преобладающую роль горизонтально-неоднородного ветра в формировании циркуляции приповерхностного слоя океана.

Севернее 15–20° с.ш. на внутригодовые изменения касательного напряжения трения ветра, скоростей течений и их завихренностей в целом приходится менее трети их суммарной изменчивости, остальная дисперсия обусловлена межгодовыми-десятилетними колебаниями. Касательное напряжение трения ветра, скорости течений и завихренность ветра и течений в ССАК и ССЦК в январе характеризуются максимальной интенсивностью, а также повышенными амплитудами межгодовых флуктуаций.

Усиление зимней циркуляции в Субтропической Атлантике и ослабление осенней с середины 1970-х годов приводят к долговременному увеличению амплитуды годового хода касательного напряжения трения ветра и скорости течений верхнего слоя океана. В то же время в Субполярной Атлантике отмечаются тенденции к интенсификации завихренности поля ветра и течений во второй половине XX в.

Подчеркнем, что выявление долгопериодной интенсификации циркуляции вод в ССЦК важно не только для понимания причин климатических вариаций в Североатлантическом регионе, но и для практических приложений. В частности, усиление течений сопровождается обострением климатических фронтов и интенсификацией вертикальных движений в океане, что, в свою очередь, должно приводить к повышению биопродуктивности вод Северной Атлантики.

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за доброжелательную и конструктивную критику первого варианта работы.

Acknowledgements. The authors are grateful to anonymous reviewers for friendly and constructive criticism of the first version of the work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джиганишин Г.Ф., Полонский А.Б., Крашенинникова С.Б. Влияние межгодовой изменчивости поля ветра в субтропическом круговороте на расходы Гольфстрима // Системы контроля окружающей среды. 2006. С. 296–299.
2. Джиганишин Г.Ф., Полонский А.Б. Низкочастотная изменчивость расходов Гольфстрима: описание и механизмы // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 3. С. 30–49.
3. Полонский А.Б., Шокурова И.Г., Сухонос П.А. Изменчивость завихренности напряжения трения ветра над Северной Атлантикой // Экол. безопасность прибреж. и шельфовой зон. 2013. Вып. 27. С. 200–205.
4. Полонский А.Б., Шокурова И.Г., Сухонос П.А. Сезонная изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра и поверхностных течений в Северной Атлантике // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 2. С. 43–56.
5. 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. Т. 42. № 5. С. 582–603.
6. Aagaard K. and Coachman L.K. The East Greenland Current north of Denmark Strait: part I // Arctic. 1968. V. 3. № 21. P. 181–200.
7. Alves M.L.G.R. and Colin de Verdière A. Instability dynamics of a subtropical jet and applications to the Azores Front Current System: eddy-driven mean flow // J. Phys. Oceanogr. 1999. V. 29. № 5. P. 837–864.
8. Bakun A. and Nelson C.S. The seasonal cycle of wind-stress curl in subtropical eastern boundary current regions // J. Phys. Oceanogr. 1991. V. 21. № 12. P. 1815–1834.

9. *Balmaseda M.A., Vidard A., and Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // *Mon. Weath. Review*. 2008. V. 136. № 8. P. 3018–3034.
10. *Böning C.W., Scheinert M., Dengg J., Biastoch A., and Funk A.* Decadal variability of subpolar gyre transport and its reverberation in the North Atlantic overturning // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L21S01. doi:10.1029/2006GL026906.
11. *Bryden H.L., Longworth H.R., and Cunningham S.A.* Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25 N // *Nature*. 2005. V. 438. № 7068. P. 655–657.
12. *Bullard R., Dinsmore R., Franceschetti A., Morril P., and Soule F.* Report of the International Ice Patrol Service in the North Atlantic Ocean, Season of 1960. Int. Ice Patrol Serv. Washington, D.C. Bull. 46. 1961. 114 p.
13. *Cromwell D., Challenor P.G., New A.L., and Pingree R.D.* Persistent westward flow in the Azores Current as seen from altimetry and hydrography // *J. Geophys. Res.: Oceans* (1978–2012). 1996. V. 101. № 105. P. 11923–11933.
14. *Daniault N., Mercier H., and Lherminier P.* The 1992–2009 transport variability of the East Greenland-Irminger Current at 60 N // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. № 7. L07601, doi:10.1029/2011GL046863.
15. *Fedoseev A.* Geostrophic circulation of surface waters on the shelf of north-west Africa // *Rapp. P.-V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* 1970. V. 159. P. 32–37.
16. *Foldvik A., Aagaard K., and Tørresen T.* On the velocity field of the East Greenland Current // *Deep Sea Res. Part A. Oceanographic Research Papers*. 1988. V. 35. № 8. P. 1335–1354.
17. *Fuglister F.C.* Annual variations in current speeds in the Gulf Stream system // *J. Mar. Res.* 1951. V. 10. № 1. P. 119–127.
18. *Garzoli S.L. and Katz E.J.* The forced annual reversal of the Atlantic North Equatorial Countercurrent // *J. Phys. Oceanogr.* 1983. V. 13. № 11. P. 2082–2090.
19. *Greatbatch R.J. and Goulding A.* Seasonal variations in a linear barotropic model of the North Atlantic driven by the Hellerman and Rosenstein wind stress field // *J. Phys. Oceanogr.* 1989. V. 19. № 5. P. 572–595.
20. *Han G., Lu Z., Wang Z., Helbig J., Chen N., and Young B.* Seasonal variability of the Labrador Current and shelf circulation off Newfoundland // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. C10013. doi:10.1029/2007JC004376.
21. *Harrison D.E.* On climatological monthly mean wind stress and wind stress curl fields over the world ocean // *J. Clim.* 1989. V. 2. № 1. P. 57–70.
22. *Hellerman S. and Rosenstein M.* Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // *J. Phys. Oceanogr.* 1983. V. 13. № 7. P. 1093–1104.
23. *Isemer H.-J. and Hasse L.* The Bunker Climate Atlas of the North Atlantic Ocean. Vol. 2. Air-Sea Interactions. N.Y.: Springer, 1985. 252 p.
24. *Jia Y.* Formation of an Azores Current due to the Mediterranean overflow in a modeling study of the North Atlantic // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. V. 30. № 9. P. 2342–2358.
25. *Jonsson S.* Seasonal and interannual variability of wind stress curl over the Nordic seas // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № C2. P. 2649–2659.
26. *Käse R.H., Biastoch A., and Stammer D.B.* On the mid-depth circulation in the Labrador and Irminger Seas // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 18. P. 3433–3436.
27. *Klein B. and Siedler G.* On the origin of the Azores Current // *J. Geophys. Res.: Oceans* (1978–2012). 1989. V. 94. № C5. P. 6159–6168.
28. *Lavender K.L., Davis R.E., and Owens W.B.* Mid-depth recirculation observed in the interior Labrador and Irminger seas by direct velocity measurements // *Nature*. 2000. V. 407. № 6800. P. 66–69.
29. *Lazier J.R.N. and Wright D.G.* Annual velocity variations in the Labrador Current // *J. Phys. Oceanogr.* 1993. V. 23. № 4. P. 659–678.
30. *Lohmann K., Drange H., and Bentsen M.* A possible mechanism for the strong weakening of the North Atlantic subpolar gyre in the mid-1990s // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L15602. doi:10.1029/2009GL039166.
31. *Mayer D.A. and 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 // *J. Phys. Oceanogr.* 1993. V. 23. № 10. P. 2201–2221.
32. *Mountain D.G.* Direct measurements in the Labrador Current // *J. Geophys. Res.: Oceans* (1978–2012). 1980. V. 85. № C7. P. 4097–4100.
33. *Myers R.A., Helbig J., and Holland D.* Seasonal and interannual variability of the Labrador Current and West Greenland Current // *ICES C.M.* 1989. V. 100. P. 16–26.
34. *Navarro-Pérez E. and Barton E.D.* Seasonal and interannual variability of the Canary Current // *Scientia Marina*. 2001. V. 65. № S1. P. 205–213.
35. *Niiler P.P., Maximenko N.A., and McWilliams J.C.* Dynamically balanced absolute sea level of the global ocean derived from near-surface velocity observations // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 22. DOI: 10.1029/2003GL018628.
36. *Orvik K.A. and Skagseth O.* The impact of the wind stress curl in the North Atlantic on the Atlantic inflow to the Norwegian Sea toward the Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 17, 1884. DOI: 10.1029/2003GL017932.
37. *Spall M.A. and Pickart R.S.* Wind-driven recirculations and exchanges in the Labrador and Irminger Seas // *J. Phys. Oceanogr.* 2003. V. 33. № 8. P. 1829–1845.
38. *Stommel H.M.* The Gulf Stream: a physical and dynamical description. Berkeley and Los Angeles, California: Univ. of California Press, 1958. 248 p.
39. *Tomczak M. and Godfrey J.S.* Regional oceanography: an introduction. Delhi: Daya Books, 2003. 400 p.

40. *Townsend T.L., Hurlburt H.E., and Hogan P.J.* Modeled Sverdrup flow in the North Atlantic from 11 different wind stress climatologies // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2000. V. 32. № 3. P. 373–417.
41. *Trenberth K.E., Large W.G., and Olson J.G.* The mean annual cycle in global ocean wind stress // *J. Phys. Oceanogr.* 1990. V. 20. № 11. P. 1742–1760.
42. *Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., Da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., Van De Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Holm E., Hoskins B.J., Isaksen L., Janssen P.A.E.M., Jenne R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., and Woollen J.* The ERA-40 re-analysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2005. V. 131. № 612. P. 2961–3012.
43. *Wang C.* Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate // *Clim. Dyn.* 2007. V. 29. № 4. P. 411–422.
44. *Yang H.* The subtropical/subpolar gyre exchange in the presence of annually migrating wind and a meandering jet: Water mass exchange // *J. Phys. Oceanogr.* 1996. V. 26. № 1. P. 115–130.