

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

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗАВИХРЕННОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕНИЯ ВЕТРА
НАД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКОЙ**

По среднемесячным данным европейского центра *ECMWF* за период 1959 – 2011 гг. исследуется пространственно-временная изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра в Северной Атлантике. Показано, что для среднего сезонного цикла характерно наличие максимума антициклонической активности в январе и минимума в сентябре. Выделены тенденции долговременной изменчивости завихренности касательного напряжения трения ветра и площади области антициклонической завихренности в районе Азорского максимума давления на межгодовых масштабах. Отмечено смещение в северном и южном направлении оси области антициклонической завихренности на декадных масштабах, соответствующие изменениям индекса Северо-Атлантического колебания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *низкочастотная изменчивость поля ветра, завихренность касательного напряжения трения ветра, Северная Атлантика.*

Введение. Изменчивость интенсивности течений в Северной Атлантике, в частности Гольфстрима, оказывает значительное воздействие на климат в северном полушарии. Для изучения основных механизмов изменчивости циркуляции вод необходимо изучение изменчивости всех потоков на поверхности океана, влияющих на ее интенсивность. Потоки импульса за счет действия ветра являются одними из основных факторов, определяющих динамику океанических процессов. Важной характеристикой воздействия ветра на океанические процессы является завихренность касательного напряжения трения ветра. Она, в частности, определяет величину Свердруповского переноса массы в океане.

Изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра в Северной Атлантике изучалась в ряде работ. В [1] были вычислены среднемесячные поля завихренности по данным морских наблюдений за период 1870 – 1976 гг. Свердруповский перенос массы в океане с использованием различных массивов данных о завихренности касательного напряжения трения ветра оценивался в [2]. Влияние изменчивости касательного напряжения трения ветра и его завихренности на направление и пространственную структуру поля течений в Североатлантическом субтропическом антициклоническом круговороте (ССАК) изучалось на основе экспериментальных [3], теоретических [4] и модельных исследований [5 – 7]. Однако все перечисленные исследования проводились или лишь для отдельных районов Северной Атлантики, или по нерегулярным данным, а также без учета данных последних десятилетий. В настоящее время для климатических временных масштабов имеются регулярные по времени и по пространству данные реанализов о ветре и потоках на поверхности моря. Поэтому нами были поставлены следующие задачи:

- рассчитать завихренность касательного напряжения трения ветра в Северной Атлантике по климатическому массиву данных;
- проанализировать ее пространственно-временную изменчивость для области антициклонической завихренности над акваторией Северной Атлантики в районе Азорского максимума.

Данные и методика их обработки. В работе использовались данные о касательном напряжении трения ветра в зональном и меридиональном направлении за период с 1959 по 2011 гг. со среднемесячным осреднением в узлах регулярной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ реанализа ERA-40 [8] Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF).

Завихренность касательного напряжения трения ветра рассчитывалась в узлах сетки по формуле:

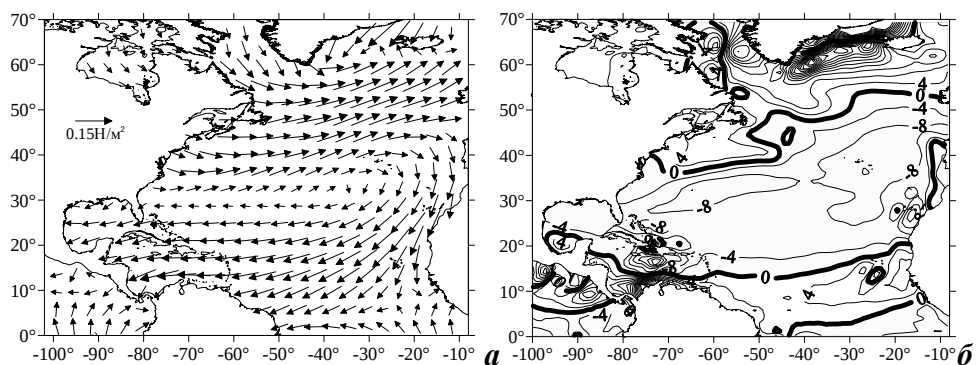
$$\text{rot}_z \vec{\tau} = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \text{ (Н/м}^3\text{)},$$

где τ – напряжение ветра в зональном x и меридиональном y направлении. Для анализа внутригодового хода и межгодовой изменчивости среднее по пространству значение отрицательной завихренности в районе Азорского антициклона вычислялось по области, ограниченной на севере и на юге нулевой изолинией в значениях завихренности, с востока и запада – береговой линией.

Также в работе были использованы значения индексов Северо-Атлантического колебания (САК), взятые из [9].

Результаты. Поле напряжений ветра для Северной Атлантики, осредненное за исследуемый период показано на рис.1, а. Его структура отражает хорошо известную для Северной Атлантики структуру поля ветра, включающую западные ветра в районе умеренных широт и северо-восточные пассаты в тропической зоне. Значения напряжения ветра τ_x находятся в диапазоне от $-0,2$ до $0,1 \text{ Н/м}^2$, τ_y – в диапазоне от $-0,12$ до $0,04 \text{ Н/м}^2$. Максимальные значения напряжения ветра отмечаются в районах западных ветров и пассатов.

Пространственное распределение завихренности касательного напряжения трения ветра над Северной Атлантикой по данным, усредненным за 53 года, представлено на рис.1, б. Область антициклонической завихренности занимает большую часть Северной Атлантики и ограничена западными



Р и с . 1 . Поле касательных напряжений трения ветра (а) и распределение завихренности касательного напряжения трения ветра ($\times 10^{-8} \text{ Н/м}^3$) (б) для Северной Атлантики. Антициклоническая область затемнена.

ветрами на севере и северо-восточными пассатами на юге. Ось этой области проходит вдоль Субтропического пояса высокого давления. По многолетним данным выделяются два центра с максимальными абсолютными значениями антициклонической завихренности – в районе Азорских о-вов (Азорский максимум) и Бермудских островов (Бермудский антициклон). Севернее и южнее данной области расположены зоны с положительной (циклонической) завихренностью. Положение максимального значения положительной циклонической завихренности соответствует положению центра низкого давления – Исландского минимума, расположенного в районе Исландии.

Среднемноголетнее значение завихренности в антициклонической области, вычисленное по всей совокупности данных, составляет – $4,48 \times 10^{-8}$ Н/м³. Осредненный годовой цикл представляет собой гармонику с максимумом – $1,96 \times 10^{-8}$ Н/м³ в сентябре и минимумом – $6,82 \times 10^{-8}$ Н/м³ в январе. Следовательно, абсолютный максимум завихренности и активизация антициклонической активности отмечается в январе, а ослабление антициклонической завихренности в сентябре. Вклад годовой гармоник в дисперсию среднемесячных значений составляет 58 %.

Разность экстремальных значений величин антициклонической завихренности в зимние месяцы достигает почти $1,1 \times 10^{-7}$ Н/м³, что указывает на наличие достаточно интенсивной межгодовой изменчивости.

Межгодовые вариации значений завихренности осредненных по антициклонической области для января и сентября представлены на рис. 2а. Зимние месяцы характеризуются более высокими абсолютными значениями антициклонической завихренности и увеличением амплитуды межгодовых колебаний. Для сентября, начиная с середины 70-х гг., характерна тенденция к ослаблению завихренности. Межгодовая изменчивость ротора ветра характеризуется суперпозицией колебаний с периодами 3 – 5 лет.

Межгодовая изменчивость величины площади области антициклонической завихренности для января и сентября приведена на рис. 2, б. Видно, что площадь антициклонической области испытывает долгопериодные колебания – с 1959 г. до середины 70-х гг. происходило ее расширение, а затем по 2010 г. происходило ее сужение.

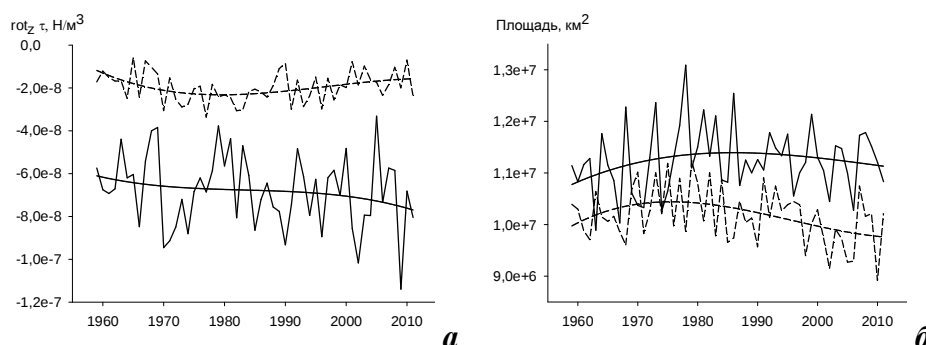


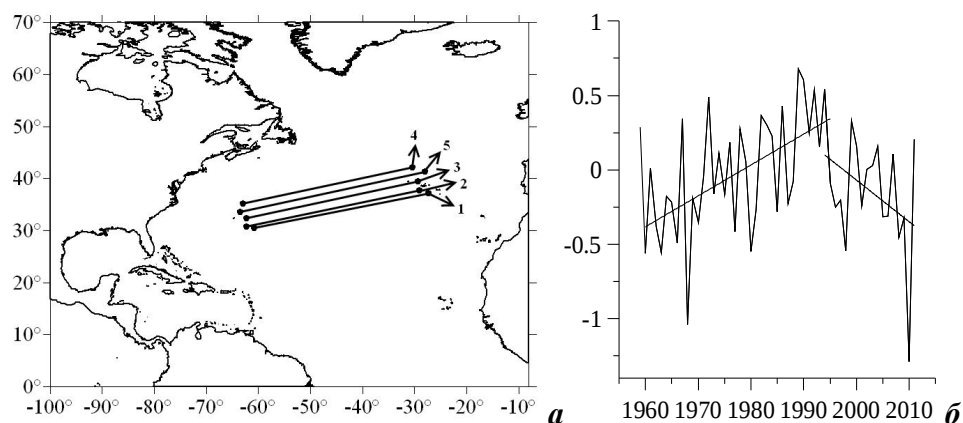
Рис. 2. Межгодовые колебания завихренности касательного напряжения ветра, осредненной по области антициклонической завихренности (а) и вариации её площади (б), для января (сплошная линия) и сентября (пунктирная линия).

На декадных временных масштабах отмечено смещение оси между центрами с максимальными абсолютными значениями антициклонической завихренности – в районе Азорских о-вов (Азорский максимум) и Бермудских о-вов (Бермудский антициклон) в меридиональном направлении. Положение абсолютных максимумов определялось по полям завихренности напряжения трения ветра, осредненным за десятилетия. Схема, приведенная на рис.3, *а*, указывает на положение оси антициклонической области в поле завихренности напряжения трения ветра над Северной Атлантикой. Анализ текущих среднегодовых значений индексов САК показывает, что на протяжении исследуемого периода знак линейного тренда менялся (рис.3, *б*). Примерно с конца 60-х по середину 90-х гг. наблюдался рост индекса САК и, в это же время, происходило смещение оси ветрового круговорота над ССАК на север (положения 1, 2, 3, 4). С середины 90-х гг. по 2010 г. происходило ослабление САК – ось между центрами антициклонической завихренности сместилась на юго-запад (положение 5) (рис.3). Это согласуется с полученными ранее результатами, что интенсификация САК на межгодовом масштабе приводит к смещению Азорского максимума к северо-востоку, а его ослабление – соответственно, к юго-западу [10].

Таким образом, межгодовые колебания положения оси области антициклонической завихренности напряжения трения ветра управляются процессами усиления/ослабления одного из главных климатических сигналов в атмосфере Северного полушария – САК.

Заключение. В результате обработки данных реанализа о напряжениях трения ветра за 53-летний период рассчитаны средние характеристики завихренности напряжения трения ветра над акваторией Северной Атлантики.

Для антициклонической области в Субтропической Атлантике исследована внутригодовая и межгодовая изменчивость средней величины завихренности. Осредненный сезонный цикл характеризуется активизацией антициклонической активности в зимой и ее ослаблением в конце лета – начале осени.



Р и с . 3 . Положение оси антициклонической области завихренности поля ветра за период с 1961 по 2010 гг. (*а*). Цифрами указаны диапазоны: 1961 – 1970 гг. (1), 1971 – 1980 гг. (2), 1981 – 1990 гг. (3), 1991 – 2000 гг. (4), 2001 – 2010 гг. (5). Среднегодовые значения индекса САК (прямые линии – линейные тренды) (*б*).

Межгодовая изменчивость ротора ветра в антициклонической области за рассматриваемый период в основном представлена суперпозицией колебаний с периодами 3 – 5 лет. Зимние месяцы характеризуются более высокими абсолютными значениями антициклонической завихренности и увеличением амплитуды межгодовых колебаний. Смещение оси области антициклонической завихренности в поле напряжений трения ветра над Северной Атлантикой на десятилетних временных масштабах согласуется с изменениями фазы САК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hellerman S., Rosenstein M.* Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // *J. Phys. Oceanogr.*– 1983.– 13.– P.1093-1104.
2. *Townsend T.L., Hurlburt H.E. Hogan P.J.* Modeled Sverdrup flow in the North Atlantic from 11 different wind stress climatologies // *Dynamics of Atmospheres and Oceans.*– 2000.– 32.– P.373-417.
3. *Hakkinen S., Rhines P.B.* Shifting surface currents in the northern North Atlantic Ocean // *J. Geophys. Res.*– 2009.– 114.– C04005.
4. *Rhines P.B., Schopp R.* The wind driven circulation: Quasigeostrophic simulations and theory for nonsymmetric winds // *J. Phys. Oceanogr.*– 1991.– 21.– P.1438-1469.
5. *Sturges W., Hong B.G.* Wind forcing of the Atlantic thermocline along 32°N at low frequencies // *J. Phys. Oceanogr.*– 1995.– 25.– P.1706-1715.
6. *Sturges W., Hong B.G., Clarke A.J.* Decadal wind forcing of the North Atlantic subtropical gyre // *J. Phys. Oceanogr.*– 1998.– 28.– P.659-668.
7. *Hong B.G., Sturges W., Clarke A.J.* Sea level on the US East Coast: Decadal variability caused by open ocean wind-curl forcing // *J. Phys. Oceanogr.*– 2000.– 30.– P.2088-2098.
8. *Uppala S.M., K  llberg P.W., Simmons A.J. et. al* The ERA-40 re-analysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.*– 2005.– v.131, iss. 612.– P.2961-3012.
9. *NAO DATA 1959-2011s* <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>.
10. *Полонский А.Б.* О междесятилетней изменчивости в системе океан-атмосфера // *Метеорология и гидрология.*– 1998.– № 5.– С.55-64.

Матеріал надійшов у редакцію 21.08.2013 г.

АНОТАЦІЯ За середньомісячними даними європейського центру *ECMWF* за період 1959 – 2011 рр. досліджується просторово-часова мінливість завихрення напруження тертя вітру в Північній Атлантиці. Показано, що для середнього сезонного циклу характерна наявність максимуму антициклонічної активності у січні і мінімуму у вересні. Виділено тенденції мінливості завихренності напрути тертя вітру і площі антициклонічної області (в районі Азорського антициклону) на міжрічних масштабах. Відзначено чергування процесів звуження і розширення площі антициклонічної області, а також її зміщення у північному і південному напрямку на декадних масштабах, відповідно змінам Північно-Атлантичного коливання.

ABSTRACT Spatial and temporal variability of the wind stress curl in the North Atlantic is examined. Monthly data set of wind stress from *ECMWF* European Centre for the period 1959 – 2011 is using. It is shown that for the average seasonal cycle is characterized by high anti-cyclonic activity in January and low activity in the September. Tendencies of inter-annual variation of wind stress curl and the anticyclonic area (the Azores High) as well as the shift of the anticyclonic area's axis to the north and south on the decadal temporal scale, corresponding to changes in the North Atlantic Oscillation are noted.