

**СИТУАЦИИ
С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ
ЗНАЧЕНИЯМИ ЗАВИХРЕННОСТИ
КАСАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ
ТРЕНИЯ ВЕТРА
В СУБТРОПИЧЕСКОЙ
АТЛАНТИКЕ ЗИМОЙ**

И.Г. Шокурова, П.А. Сухонос

Морской гидрофизический институт
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: pasukhonis@mail.ru

По среднемесячным данным о ветре и скорости течений для января 1959 – 2011 гг. анализируется структура полей касательного напряжения трения ветра, его завихренности и поля течений в Северной Атлантике для ситуаций с экстремальными значениями завихренности в районе Северного субтропического антициклонического круговорота

Введение. Течения Северной Атлантики играют важную роль в переносе тепла между низкими и высокими широтами. Этот факт обуславливает важность изучения пространственно-временной изменчивости поля течений, а также поля ветра, как основной причины возникновения океанических течений. Важной характеристикой воздействия ветра на циркуляцию вод является завихренность касательного напряжения трения ветра. Для Северной Атлантики характерно наличие достаточно устойчивой системы преобладающих ветров – Западных ветров и Пассатов (рис. 1 а) и области антициклонической завихренности ветра между ними. В целом пространственная структура распределения завихренности касательного напряжения трения ветра в Северной Атлантике имеет квазизональный характер [1]. В южной части тропиков находится узкая полоса циклонической завихренности – Внутритропическая зона конвергенции (ВЗК), в северной части тропиков и субтропической зоне – область с антициклонической завихренностью, в умеренных широтах и субполярной зоне – с циклонической завихренностью (рис. 1 б). Области антициклонической завихренности в атмосфере соответствует крупномасштабный Северный субтропический антицикло-

нический круговорот (ССАК) в океане, области циклонической завихренности в умеренной и субполярной зоне соответствует Северный субполярный циклонический круговорот (ССЦК) в океане. Межгодовые и более низкочастотные изменения завихренности касательного напряжения трения ветра вызывают изменения в крупномасштабной циркуляции океана, такие как: флуктуации глубины залегания термоклина в ССАК [2], меридиональные смещения ССАК [3], изменения положения оси Северо-Атлантического течения [4]. На межгодовом масштабе выявлена прямая связь между завихренностью касательного напряжения трения ветра и изменчивостью расходов течений Северной Атлантики: течений в море Лабрадор [5], Гольфстрима [6], Норвежского течения [7], Западно-Гренландского течения [8]. Все это обуславливает важность изучения межгодовых изменений завихренности касательного напряжения трения ветра и отклика крупномасштабной циркуляции океана.

Целью настоящей работы является анализ особенностей пространственной структуры полей касательного напряжения трения ветра в Северной Атлантике, приводящих к ситуациям с экстремально высокими и низкими значениями антициклонической завихренности в районе ССАК. Анализ проводится методом композитов – объединения и осреднения полей напряжения трения ветра и его завихренности, соответствующих годам с высокой и низкой завихренностью, и оценкой значимости их отличий. Для данных ситуаций также анализируются различия пространственной структуры полей скоростей течений. Расчеты проводятся для января – месяца, в котором отмечается наибольшая в сезонном ходе интенсивность Западных ветров и Пассатов и максимальная по абсолютной величине завихренность касательного напряжения трения ветра по всей Северной Атлантике, кроме тропической зоны.

Данные и методика. В работе используются среднемесячные данные для января по касательному напряжению трения ветра из атмосферного реанализа ERA-40 [9] за 1959 – 2002 гг. и оперативного анализа NWP за 2002 – 2011 гг. и

данные по скоростям течений на горизонте 15 м из океанического реанализа *ORA-S3* [10] с одноградусным пространственным разрешением.

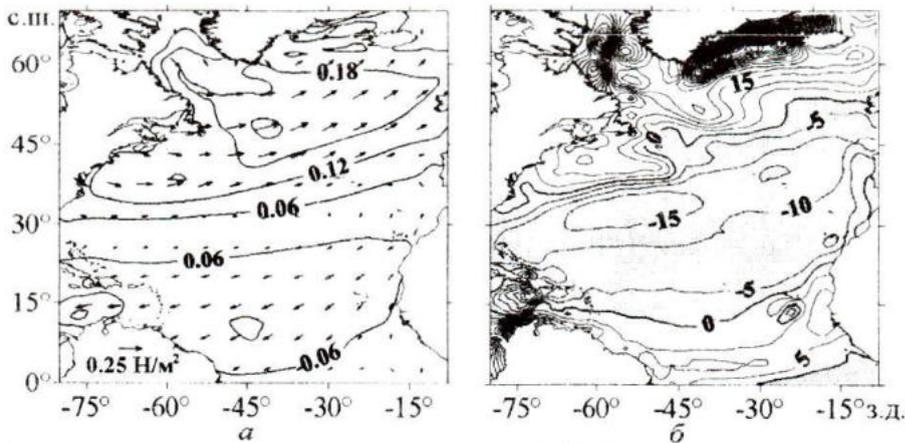
Завихренность касательного напряжения трения ветра рассчитывается по формуле:

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

где τ_x, τ_y – компоненты вектора касательного напряжения трения ветра в зональном x и меридиональном y направлениях.

Область, используемая для оценки межгодовой изменчивости завихренности касательного напряжения трения ветра в районе ССАК, ограничивалась с

севера 40° с.ш. и с юга 15° с.ш., а с востока и запада – береговой линией. Выбор положения северной и южной границ обусловлен особенностями меридионального смещения области антициклонической завихренности ветра на внутригодовых масштабах. В межгодовой изменчивости средней по области завихренности выделялись годы с ее экстремально высокими и низкими значениями, отличающимися от среднемноголетнего значения на величину одного среднеквадратического отклонения (СКО) (рис. 2). Отметим, что высокой антициклонической (циклонической) завихренности соответствуют высокие (по абсолютной величине отрицательные (положительные) значения).



Р и с. 1. Поле касательного напряжения трения ветра (Н/м^2) (*а*) и соответствующее ему пространственное распределение завихренности касательного напряжения трения ветра ($\times 10^{-8} \text{Н/м}^3$) (*б*) для акватории Северной Атлантики осредненные за период 1959 – 2011 гг. для января. Области с антициклонической завихренностью на *б* затемнены

Таким образом, были выделены следующие годы с высокими (1971, 1972, 1974, 1990, 2002, 2004, 2009) и низкими (1963, 1969, 1979, 1981, 1983, 1992, 2000, 2005) значениями антициклонической завихренности касательного напряжения трения ветра (рис. 2), что составляет примерно 15 % от полного объема выборки. Далее производилось объединение и осреднение полей касательного напряжения трения ветра, его завихренности и скорости течений для лет с высокой и низкой антициклонической завихренностью. Полученные для двух выборок средние поля (компози́ты) сравнивались между собой с целью выделения различий в их структуре. Оценка значимости различия компози́тов в

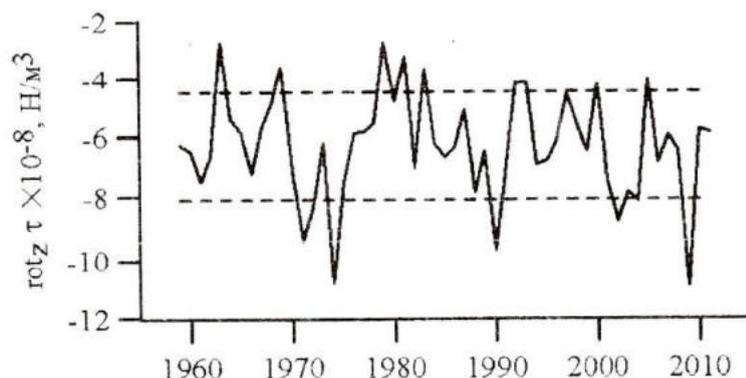
каждом узле сетки сводилась к оценке значимости различия средних двух выборок: применялся *t*-критерий Стьюдента. Определялись значимые на 95 % уровне доверия различия для компози́тов.

Результаты. Структура полей касательного напряжения трения ветра (рис. 3 *а, б*), его завихренности (рис. 3 *в, г*) и поверхностных течений (рис. 3 *д, е*), соответствующих годам с высокими (рис. 3 *а, в, д*) и низкими (рис. 3 *б, г, е*) значениями антициклонической завихренности в районе ССАК, имеет значимые отличия, помеченные на рисунках плюсами.

В первом случае – в годы с высокими по абсолютной величине значениями

антициклонической завихренности в районе ССАК – высокие значения касательного напряжения трения ветра (до $0,36 \text{ Н/м}^2$) в области Западных ветров наблюдаются в зоне от 40° с.ш. до 60° с.ш. (рис. 3 а). Эти значения почти в два раза превышают среднемноголетние значения для января (рис. 1 а). В области Пассатов значения касательного напряжения трения ветра увеличиваются до $0,12 \text{ Н/м}^2$, что также почти в два раза превышает среднемноголетние значения.

Центр завихренности находится в районе Азорских островов и соответствует Азорскому максимуму высокого давления (рис. 3 в). Здесь же расположена область статистически значимых различий между композитами в значении завихренности. Таким образом, усиление антициклонической завихренности является следствием одновременного усиления Западных ветров и Пассатов.



Р и с. 2. Межгодовые колебания завихренности касательного напряжения трения ветра по акватории ССАК. Пунктирными линиями указан уровень ± 1 СКО

Во втором случае – в годы с низкими значениями антициклонической завихренности в районе ССАК – центр завихренности находится в районе Бермудских островов (Бермудский максимум высокого давления) (рис. 3 в). Значения касательного напряжения трения ветра в области Пассатов практически не отличаются от среднемноголетних значений (рис. 1 а, 3 б). В зоне $40 - 50^\circ$ с.ш. отмечается ослабление Западных ветров. Высокие значения касательного напряжения трения ветра (до $0,24 \text{ Н/м}^2$) находятся севернее их среднемноголетнего положения и расположены в северо-восточной части акватории ($50 - 60^\circ$ с.ш.) (рис. 3 б). Это приводит к расширению области антициклонической завихренности в восточной части в северном направлении – до 60° с.ш. (рис. 3 г). Здесь же отмечаются значимые отличия между композитами. Во втором случае область антициклонической завихренности также смещается к югу и имеет значимые различия в величине завихренности в окрестности 15° с.ш. Кроме того, в эти годы антициклоническая область

“отодвигается” от Африканского континента.

Статистически значимые различия для композитов полей касательного напряжения трения ветра расположены преимущественно в районах Пассатов и Западных ветров (рис. 3 а, б).

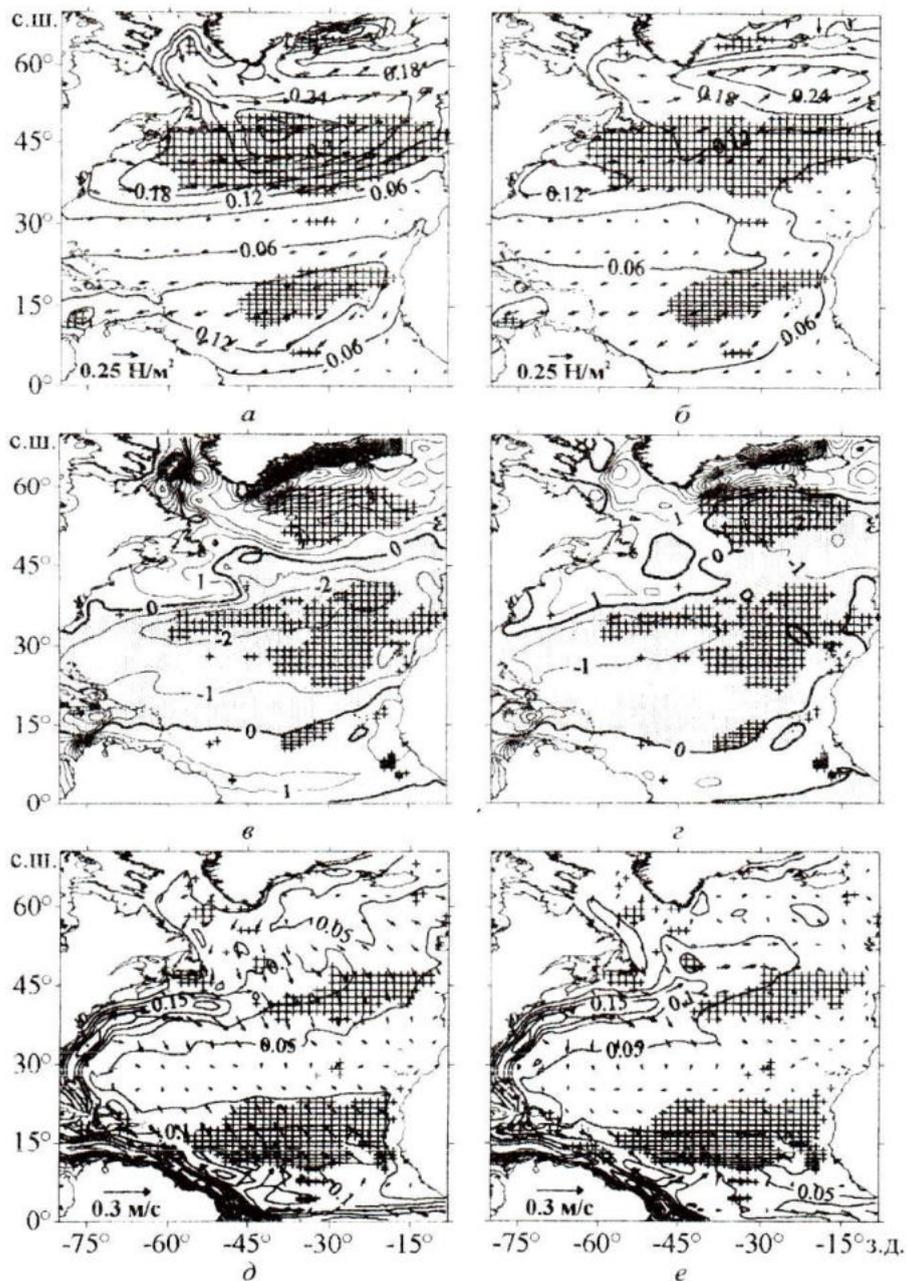
В годы с высокими значениями завихренности в антициклонической области одновременно отмечаются более высокие значения циклонической завихренности в субполярной зоне и в ВЗК. При этом площадь области антициклонической завихренности уменьшена, а площадь циклонической области в окрестности ВЗК увеличена. Квазисинхронная интенсификация Азорского максимума и Исландского минимума также отмечалась в [11] по результатам обработки данных наблюдений.

Значимые различия присутствуют и на композитах полей скорости течений (рис. 3 д, е). В первом случае – в годы, для которых получены высокие по абсолютной величине значения завихренности касательного напряжения трения ветра в районе ССАК, и которым соот-

ветствует усиление Западных ветров и Пассатов, скорости течений значительно увеличиваются в Северном пассатном, Гвианском (от 10° с.ш. до 15° с.ш.), Лабрадорском, Восточно-Гренландском течениях. Значимое увеличение скоростей отмечается и в районе Североатлантического течения.

Таким образом, увеличение касательного напряжения трения ветра в Западных ветрах и Пассатах приводит к

усилению антициклонической завихренности в субтропической области и увеличению скоростей течений, составляющих Субтропический круговорот. Это должно сопровождаться усилением циркуляции в нем. Экстремально низкие значения завихренности в субтропической области связаны с изменениями структуры поля ветра в области Западных ветров.



Р и с. 3. Касательное напряжение трения ветра (H/m^2) (а, б), его завихренность ($\times 10^{-8} \text{H}/\text{m}^3$) (в, з) и скорость течений (м/с) (д, е), в годы с высокой (а, в, д) и низкой (б, з, е) завихренностью напряжения ветра в субтропической области. Плюсами показаны узлы сетки, где разность композитов значима на 95% уровне. Области с антициклонической завихренностью на в, з затемнены

Заключение. Для ситуаций с экстремально высокими и низкими значениями завихренности касательного напряжения трения ветра в области антициклонической завихренности в районе ССАК был проведен анализ пространственной структуры полей касательного напряжения трения ветра, его завихренности и поля скорости течений в Северной Атлантике.

Получено, что в годы с экстремально высокими значениями антициклонической завихренности напряжения трения ветра в области субтропического круговорота, центр этой завихренности расположен в районе Азорских островов. Увеличение завихренности обусловлено усилением Западных ветров и Пассатов. В эти годы происходит усиление циклонической завихренности напряжения трения ветра в субполярной зоне и в окрестности ВЗК. В эти же годы наблюдается увеличение скоростей в Северном Пассатном, Лабрадорском, Восточно-Гренландском и Северном Атлантическом течениях.

В годы с экстремально низкими значениями антициклонической завихренности – центр завихренности расположен в районе Бермудских островов, сама область значительно вытянута в северо-восточном направлении. Такое распределение завихренности обусловлено в основном изменением пространственного распределения величин скоростей в Западных ветрах. Положение наибольших значений касательного напряжения трения ветра для Западных ветров смещено к северо-востоку. Значения касательного напряжения трения ветра в районе Пассатов незначительно отличаются от среднеголетних.

Таким образом, изменения величины завихренности в районе ССАК обусловлены не только увеличением или уменьшением скорости ветра, но изменениями структуры поля ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hellerman S., Rosenstein M.* Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // *J. Phys. Oceanogr.* – 1983. – 13. – № 7. – P. 1093 – 1104.
2. *Sturges W., Hong B.G., Clarke A.J.* Decadal wind forcing of the North Atlantic subtropical gyre // *J. Phys. Oceanogr.* – 1998. – 28. – №. 4. – P. 659 – 668.
3. *Häkkinen S, Rhines P.B.* Shifting surface currents in the northern North Atlantic Ocean // *J. Geophys. Res.* – 2009. – 114. – № C4. – C04005.
4. *White M.A., Heywood K.J.* Seasonal and interannual changes in the North Atlantic subpolar gyre from Geosat and TOPEX/POSEIDON altimetry // *J. Geophys. Res.: Oceans* (1978 – 2012). – 1995. – 100. – № C12. – P. 24931 – 24941.
5. *Han G., Tang C.L.* Interannual variations of volume transport in the western Labrador Sea based on TOPEX/Poseidon and WOCE data // *J. Phys. Oceanogr.* – 2001. – 31. – №. 1. – P. 199 – 211.
6. *Джиганишин Г.Ф., Полоцкий А.Б.* Низкочастотная изменчивость расходов Гольфстрима: описание и механизмы // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2009. – 3. – С. 30 – 49.
7. *Orvik K.A., 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. – 30. – №. 17.
8. *Spall M.A., Pickart R.S.* Wind-driven recirculations and exchanges in the Labrador and Irminger Seas // *J. Phys. Oceanogr.* – 2003. – 33. – № 8. – P. 1829 – 1845.
9. *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.
10. *Balmaseda M.A., Vidard A. and Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // *Mon. Weath. Review.* – 2007. – 136. – № 8. – P. 3018 – 3034.
11. *Mächel H., Kapala A., Flohn H.* Behaviour of the centres of action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability // *Int. J. Clim.* – 1998. – 18. – №. 1. – P. 1 – 22.