## Многолетние изменения крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике на основе спутниковых альтиметрических измерений

А.М. Федоров<sup>1</sup>, А.А. Кубряков<sup>2</sup>, Т.В. Белоненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия <sup>2</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: aandmofficially@gmail.com

Анализируется изменчивость поверхностной крупномасштабной геострофической циркуляции в Северной Атлантике по данным спутниковых альтиметрических измерений за период 1993-2015 гг. Исследуются линейные тренды изменчивости интенсивности течений, а также тренды зональных и меридиональных составляющих течений, позволяющие оценить изменения как величин, так и направлений течений в Северной Атлантике. Предложена методика сравнения полей «первого» и «последнего» моментов, рассчитываемых по трендам, которая позволила выявить пространственные изменения крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике за указанный период. Установлено, что отрицательные тренды (ослабление течений) характерны для большей части рассматриваемой акватории: наиболее значительное уменьшение скоростей отмечается в районе Гольфстрима, где оно может достигать 1,7 см/с в год, при этом изменения интенсивности течений в Гольфстриме пространственно-неоднородны: в то время как на северной периферии происходит значительное уменьшение его интенсивности, на южной наблюдается небольшое увеличение скорости, свидетельствующее о смещении струи Гольфстрима в южном направлении. Изменения наблюдаются также и в районе Карибского течения, где его скорости за исследуемый период снизились на ~10%. Отмечено изменение формы Субтропического круговорота в зональном направлении, смещение на север Северного пассатного течения и Межпассатного противотечения, а также изменения направлений в Антильском, Азорском, Северо-Атлантическом течениях.

**Ключевые слова**: течения, Атлантический океан, альтиметрия, Гольфстрим, тренды, крупномасштабная циркуляция

Одобрена к печати: 13.10.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-225-237

### Введение

Североатлантическая циркуляция оказывает значительное влияние на климат Северного полушария и состояние Мирового океана в целом, оказывая непосредственное воздействие на климат Западной Европы и России. Изменения океанологических полей, происходящие в Атлантике, в большой степени определяют изменчивость физических процессов Северного Ледовитого океана и морей России, влияя на гидрологический режим Северного морского пути, планирование и обеспечение мореплавания, а также проектирование и гидрометеорологическое сопровождение нефтегазодобычи в Арктике, и являются одним из приоритетных направлений исследования программы «Мировой океан». На *рис. 1* представлена карта-схема с основными структурами крупномасштабной циркуляции Северной Атлантики.

На этой схеме показаны также основные циркуляционные круговороты Северной Атлантики: основной Субтропический круговорот (области 1, 2, 3 и 5), севернее которого расположен Субполярный круговорот, состоящий из Северо-Атлантического течения на юго-востоке, восточного и западного Гренландских течений на севере и Лабрадорского на западе (область 4). Система Гольфстрима, в свою очередь, делится на три части: Флоридское течение, Гольфстрим и Северо-Атлантическое течение (области 4 и 5). В центре основного Субтропического круговорота расположено общирное Саргассово море, характеризующееся слабыми переменными течениями (Жуков, 1976), связанными с движением вихрей и волн Россби (Chelton, Schlax, 1996; Chelton, Schlax, Samelson, 2011; Palter, 2015).



Рис. 1. Схематическое изображение основных поверхностных течений в северной части Атлантического океана: 1 — приэкваториальная область с Северным пассатным течением и Межпассатным противотечением; 2 — Северное пассатное, Карибское и Мексиканское петлевое течения; 3 — область у побережья Флориды до 37° з.д., в которой находится основной поток Гольфстрима; 4 — Северо-Атлантическое течение; 5 — область с уходящей на юго-восток ветвью Азорского течения и включающая восточную часть Субтропического круговорота с холодным Канарским течением. Числами обозначена величина переноса, выраженная в свердрупах (Stewart, 2008)

Контактные и спутниковые измерения показывают, что в последние десятилетия циркуляция и термохалинные поля Северной Атлантики претерпевают значительные изменения. Существенное усиление Гольфстрима в последние годы исследуется в статье (Карлин, Малинин, Гордеева, 2013). Отмечается влияние изменений циркуляции и термохалинных характеристик на крупномасштабные (50–80 лет) изменения климата северного полушария (Polyakov et al., 2009). Показывается прямая связь между изменением температуры Северной Атлантики и нагревом атмосферы в декадном ходе и обратная зависимость между этими характеристиками в межгодовой изменчивости (Palter, 2015). Непосредственное влияние Гольфстрима на температуру воздуха и на поле давления не только в деятельном слое атмосферы, а всей тропосферы — от поверхности до тропопаузы — установлено в работе (Minobe et al., 2008), где также говорится об изменениях в системе Гольфстрима, обусловленных ростом температуры. Показано, что начиная уже с 2000 г. происходит интенсификация в Северном Атлантическом течении (Hakkinen, Rhines, 2009). Смещение Гольфстрима к югу отмечалось также в работе (Rossby et al., 2014), где показано, что межгодовое колебание в расходе Гольфстрима может составлять 4,5%, а долгосрочное достигать 10%.

Комбинированные измерения современных альтиметров дают возможность определять ежедневные распределения скоростей геострофических течений в бассейне. В работе на основе спутниковых альтиметрических измерений за 1993—2015 гг. изучается изменчивость крупномасштабной геострофической циркуляции в Северной Атлантике, анализируются тренды

интенсивности скоростей геострофических течений, исследуются изменения структуры течений в указанных районах.

#### Данные

В настоящей работе используется массив спутниковых данных о геострофических скоростях течений на регулярной сетке, восстановленный по комбинированным измерениям современных альтиметров за 1993–2015 гг. Массив был получен из архива спутниковых данных AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data)<sup>1</sup>. Пространственное разрешение массива — 1/4°, временное разрешение — 7 дней. Абсолютная динамическая топография определяется как сумма аномалий уровня, определяемых по измерениям альтиметров, и средней динамической топографии, оценка которой проводилась по методике работы (Rio, Guinehut, Larnicol, 2011). Используя полученные массивы абсолютной динамической топографии, из уравнений геострофического баланса мы рассчитывали поверхностные скорости геострофических течений:

$$u_g = -\frac{g}{f} \cdot \frac{\partial h}{\partial y}; \ v_g = \frac{g}{f} \cdot \frac{\partial h}{\partial x},$$

здесь  $u_{g}$ ,  $v_{g}$  — компоненты поверхностного течения; h — абсолютная динамическая топография; g — ускорение свободного падения; f — параметр Кориолиса.

#### Тренды скоростей течений в Северной Атлантике

Методом наименьших квадратов рассчитывались линейные тренды интенсивности течений и отдельно — тренды для каждой из компонент скорости, для которых в дальнейшем оценивался модуль скорости в каждой точке сетки. Таким образом, рассчитывались характеристики трех линейных трендов: интенсивности течений (величины скорости в каждый момент времени), а также зональной и меридиональной составляющих скорости.

На *рис. 2* представлены средние поверхностные течения за период 1993–2015 гг., а также линейные тренды их интенсивности. На *рис. 2a*, где отражены основные океанические структуры Северной Атлантики, видно, что наибольшая интенсивность характерна для Гольфстрима с максимальными величинами скоростей, достигающими 1,5 м/с в районе полуострова Флорида. В Южном Пассатном течении в среднем скорости невелики и составляют 0,2–0,3 м/с, как и в Лабрадорском и Гренландском течениях. Межпассатное противотечение характеризуется скоростями 0,4–0,5 м/с. В Петлевом течении Мексиканского залива средние скорости составляют преимущественно 0,4–0,8 м/с. Азорское течение

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> http://www.aviso.oceanobs.com/ (дата обращения: 10.02.2017)

имеет значительно меньшие скорости — около 0,1 м/с, также Северное Пассатное течение представляет собой обширный сток вод со средними скоростями 0,5 м/с. В Северо-Атлантическом течении средние скорости составляют 0,1 м/с, но в некоторых областях они достигают 0,2 м/с.



Рис. 2. Средние за 1993—2015 гг. значения модуля скорости (м/с) (а); тренды интенсивности скорости течений за 1993—2015 гг. (м/с в год) (б). Черным квадратом показана область, где наблюдаются наиболее значимые изменения скорости течений. Для дальнейшего анализа были определены два пункта, расположенные в Гольфстриме (черные точки), с координатами: а — 38,7° с.ш., 65° з.д.; б — 37,3° с.ш., 65° з.д.

На *рис. 26* представлено распределение линейных трендов интенсивности течений в исследуемом районе. Выяснилось, что для большей части акватории характерны отрицательные тренды, т.е. наблюдается ослабление течений. При этом наиболее значительное уменьшение скоростей отмечено в районе Гольфстрима, где оно может достигать 1,7 см/с в год (величина тренда здесь равна -1,7 см/с в год). Отрицательные тренды также имеют место в Мексиканском заливе и Карибском море.

В дальнейшем анализируется крупномасштабная изменчивость основных океанических структур Северной Атлантики (*puc. 1*).

#### Гольфстрим

На *рис. 26* в районе Гольфстрима, для которого характерны наибольшие тренды скоростей (область, ограниченная черным квадратом), мы видим как положительные тренды, которые располагаются в южной части струи течения, так и примыкающие с севера области с отрицательными значениями трендов. Другими словами, в указанном районе в северной части Гольфстрима наблюдается уменьшение скоростей, в то время как в южной его части наблюдается их увеличение, что может указывать на смещение струи Гольфстрима на юг. Для более детального анализа рассматривались временные ряды скоростей течений (интенсивности) в двух пунктах в районе Гольфстрима, расположенных на одном меридиане (*рис. 26*). На *рис. 3* показан временной ход скорости в этих пунктах, а также линейные тренды.



Рис. 3. Временной ход скорости течения (м/с) и тренды в Гольфстриме для пунктов с координатами 38,7° с.ш., 65° з.д. (синий, тренд — черный пунктир) и 37,3° с.ш., 65° з.д. (красный, тренд сплошная черная линия) с осреднением: а — 30 дней; б — 730 дней

На *рис. За* в пункте с координатами 38,7° с.ш., 65° з.д. скорость изменялась в диапазоне от 0,1 до 1,7 м/с, а в пункте с координатами 37,3° с.ш., 65° з.д., расположенном южнее, в диапазоне от 0,05 до 2,00 м/с. За счет сглаживания диапазоны изменчивости несколько уменьшились, и при этом на обоих графиках (*рис. За* и *б*) стало хорошо видно, что скорости течений в этих пунктах изменяются почти в противофазе. В «северном» пункте наблюдается тенденция к снижению скорости течения, в то время как для расположенного южнее пункта скорости растут. Максимальное значение скоростей наблюдалось в «северном» пункте в 1995 г. и превысило 1 м/с, а минимальное значение скоростей (0,37 м/с) — в «южном» пункте в 1996 г. К концу рассматриваемого периода в «северном» пункте скорости понизились до 0,6 м/с, зато в «южном» пункте они увеличились и превысили 0,8 м/с. В целом за исследуемый 23-летний период указанные изменения скоростей в этих пунктах произошли приблизительно на одну и ту же величину: 0,4 м/с. Описанные изменения подтверждают вывод о смещении створа Гольфстрима в южном направлении.

Рассмотрим отдельно изменения зональной  $V_x$  и меридиональной  $V_y$  составляющих в Гольфстриме. На *рис.* 4 анализируются их тренды. На *рис.* 4а видно, что пространственная

изменчивость зональной составляющей тренда скорости имеет преимущественно зональный характер расположения изолиний, и на графике струя Гольфстрима как бы разделяется на два слоя, образуя вытянутую дипольную структуру, где области положительных (и максимальных) значений тренда зональной составляющей расположены с южной периферии створа течения, к которым примыкают области отрицательных (и минимальных) значений. В то же время для меридиональной составляющей течений поля трендов имеют ячеистую структуру, что, по-видимому, связано с изменениями областей меандрирования Гольфстрима и характерной для него вихревой динамикой.



Рис. 4. Тренды зональной Vx (а) и меридиональной Vy (б) составляющих скорости течений (м/с в год). Тренды векторов скорости течения: без фильтрации (в), с пространственной фильтрацией 3° (г); цветом показаны величины скоростей (м/с в год)

При использовании альтиметрических данных в анализе возникают определенные проблемы, связанные с несовершенством методологической базы. Например, в исследовании (Rossby et al., 2014) авторы попытались дать оценку расхода в Гольфстриме при помощи спутниковых данных, но данный способ оказался не совсем достоверным из-за меандрирования Гольфстрима, что не позволило точно определить положение основного потока. При исследовании трендов мы выяснили, что в некоторой степени эти проблемы связаны с изменчивостью меридиональной составляющей. Рассчитанные тренды компонент скоростей позволяют построить векторы течений, фиксирующие тенденции изменения их направлений (*puc. 4в* и *e*). Для несглаженных рядов скоростей из-за значительного влияния вихревой динамики анализ векторов трендов сложен для интерпретации (*puc. 4в*), в результате было применено крупномасштабное пространственное сглаживание исходных данных (с шириной окна 3°). Пространственная фильтрация позволяет убрать шум, создаваемый рингами, рециркуляцией Гольфстрима, другими явлениями меньшего масштаба. На *puc. 4e* видно, что в северной части рассматриваемой акватории векторы трендов направлены на запад, т.е. в направлении, противоположном основному струйному потоку, и в тоже время расположенные южнее, они направлены на восток. Отметим, что в целом смещение Гольфстрима на юг сопровождалось также его общим ослаблением, так как в среднем отрицательные тренды больше по величине, чем положительные, и векторы трендов в среднем направлены на запад.

#### Карибское течение

Ослабление течения можно также наблюдать и в южной части субтропического антициклона: в струе Карибского течения. На *puc. 5* представлены тренды Карибского течения. Пункт с координатами 17,8° с.ш., 82° з.д. расположен в основной струе течения. На *puc 5a, б* показаны тренды скорости течения в этом пункте, рассчитанные с различным осреднением: по сглаженным по пространству данным значение тренда составляет 0,001 м/с в год, а по несглаженным — приблизительно -0,003 м/с в год. Заметим, что оба тренда отрицательны. Как и в Гольфстриме, направление трендов на *puc. 5в* противоположно направлению струи течения, а сами тренды скоростей — отрицательные. По *puc. 5а* можно оценить диапазон изменчивости скорости течения в Карибском течении за исследуемый период: максимальное значение составляло около 1 м/с (максимумы в 1998, 2003, 2008 гг.), минимальное — 0,1 м/с (минимумы в 2000, 2005, 2010 гг.). Отмечается снижение скорости течений: за 23 года скорости в Карибском течении снизились на ~10% от средних значений — от 0,48 м/с до 0,42 м/с.

Для иллюстрации изменений крупномасштабных течений в Субтропическом круговороте применялась следующая оригинальная методика. Строились векторные поля течений и интенсивности (величины) для условных «первого» и «последнего» моментов рассматриваемого промежутка. При построении полей «первого» и «последнего» моментов использовались сглаженные исходные ряды  $V_x$  и  $V_y$  (пространственная фильтрация с окном 3° по широте и долготе), для которых оценивались линейные тренды  $Tr_x$ ,  $Tr_y$ . Компоненты скорости X и Y для «первого» (индекс 1) и «последнего» (индекс 2) моментов с составляющими скоростей рассчитывались по следующим формулам:

$$X_{1,2} = V_{mx} \pm Tr_x \frac{t_2 - t_1}{2}; \ Y_{1,2} = V_{my} \pm Tr_y \frac{t_2 - t_1}{2},$$

здесь  $V_{mx}$  и  $V_{my}$  — сглаженный по пространству и осредненный по времени массив составляющих скоростей;  $t_1$  и  $t_2$  — начальное и конечное значения полученного массива дат (промежуток с 1993 по 2015 г.). Сравнение полей «первого» и «последнего» моментов позволяет увидеть изменения течений, произошедшие за рассматриваемый промежуток времени. Перейдем к анализу поля для различных районов Северной Атлантики.



Рис. 5. Временной ход интенсивности течения (м/с) и тренды в пункте с координатами 17,8° с.ш., 82° з.д., расположенном в Карибском течении, с фильтрацией: а — 30 дней; б — 730 дней; в — векторы трендов скорости течений, сглаженных по пространству с шириной окна 3° по широте и долготе, цветом показаны величины скоростей (м/с в год)

### Центральная и юго-западная часть Субтропического круговорота

На *рис. 6* синими и красными стрелками показаны векторы скоростей течений, рассчитанные по трендам составляющих и отнесенные к «первому» и «последнему» моментам анализируемого периода 1993—2015 гг. В Северном Пассатном течении (область 1) можно отметить смещение векторов к югу, в особенности это относится к юго-восточной части рассматриваемой области. Стрелки Межпассатного противотечения (область, расположенная южнее 1а), изменили свое направление с тенденцией на север. Аналогичные изменения характерны и для северной периферии Пассатного течения (область, расположенная южнее 1а). В области 16 увеличилась западная составляющая течений. В центральной части (область 2) движения вод представляли собой массивный сток в экваториальные широты, движение происходило преимущественно в южном направлении, однако же теперь эти перемещения направлены на юго-восток. На широте 25° с.ш. (область 2) восточная составляющая направления течений значительно возросла. Начиная с 57° з.д. и практически до 40° з.д. сток вод стал принимать более меридиональный характер в направлении на юго-восток. В целом восточное направление в центральной части становится все более доминирующим, и такие изменения могут свидетельствовать, что Субтропический круговорот стал вытянутее в широтном направлении. Также можно отметить некоторую интенсификацию течений у Антильских островов (область 3), где увеличилась скорость течения, особенно в восточном направлении.



Рис. 6. Центральная и юго-западная часть субтропического круговорота. Синие стрелки показывают течения в условный «первый» момент времени, красные — в «последний». Длина стрелок характеризует величину интенсивности течений. Прямоугольниками показаны области, для которых анализируются изменения структуры течений

### Северная, северо-восточная часть Субтропического круговорота

На *рис.* 7 изображена восточная часть Субтропического круговорота. В области 4 (*рис.* 7) хорошо видны изменения направлений стрелок к северо-востоку. Азорское течение (область 5) становится интенсивнее в восточном направлении и свидетельствует о большей зональной локализации круговорота. В восточной части круговорота (область 6) не происходит существенных изменений направлений течений, стрелки векторов направлены на юг, хотя отмечается незначительный рост интенсивности течений у африканского побережья.

В Северо-Атлантическом течении (*puc. 8*) увеличилась скорость течений в области 7. Об этом увеличении также говорилось и в работе (Hakkinen, Rhines, 2009). Скорость течений в северном направлении значительно возросла (область 7а), при этом уменьшилась зональная составляющая, вследствие чего направление течения изменилось с северо-восточного на строго северное. В целом здесь сохраняется тенденция северо-восточного направления течений системы Гольфстрим (Северо-Атлантическое, Норвежское, Шпицбергенское), что подтверждается ростом интенсивности Северо-Атлантического течения. В области 8 можно отметить уменьшение скорости ветви Северо-Атлантического течения, распространяющейся на север. Следовательно, снизилась интенсивность и Восточно-Гренландского течения (область 8а).



Рис. 7. Восточная часть субтропического круговорота. Синие стрелки показывают течения в условный «первый» момент времени, красные — в «последний». Длина стрелок характеризует величину интенсивности течений. Прямоугольниками показаны области, для которых анализируются изменения структуры течений



Рис. 8. Северная, северо-восточная часть субтропического круговорота. Синие стрелки показывают течения в условный «первый» момент времени, красные — в «последний». Длина стрелок характеризует величину интенсивности течений. Прямоугольниками показаны области, для которых анализируются изменения структуры течений

#### Выводы

Проведенное исследование позволяет заявить, что в Северной Атлантике произошли и продолжают происходить крупномасштабные изменения структуры и интенсивности поверхностных течений. Вывод, представленный в работе (Карлин, Малинин, Гордеева, 2013), о существенном усилении Гольфстрима в последние годы не отражает пространственную неоднородность этих изменений. Мы показали на основе спутниковой альтиметрической информации за период 1993–2015 гг., что крупномасштабная изменчивость поверхностных течений в Северной Атлантике характеризуется существенной пространственной неоднородностью.

За период 1993–2015 гг. для большей части Северной Атлантики характерны отрицательные тренды, т.е. наблюдается ослабление течений. Отмечается снижение интенсивности в Гольфстриме, Карибском течении, Петлевом течении Мексиканского залива, Восточном и Западном Гренландских течениях. При этом наиболее значительное уменьшение скоростей также отмечено в районе Гольфстрима, и оно может достигать 1,7 см/с в год (величина тренда здесь равна –1,7 см/с в год). Отрицательные тренды в других областях также имеют место — Мексиканский залив, Карибское море.

Для Гольфстрима установлено, что увеличение его интенсивности наблюдается преимущественно для южной периферии, в то время как на северной периферии Гольфстрима наблюдается значительное его уменьшение. Такое распределение трендов может указывать на смещение струи Гольфстрима на юг. Отмечено ослабление Карибского течения, скорость которого уменьшилась на 10% за исследуемый период.

Предложена оригинальная методика анализа изменчивости течений сравнением полей «первого» и «последнего» моментов, рассчитываемых по трендам составляющих. Сравнительный анализ позволяет выявить пространственные изменения крупномасштабной циркуляции в Северной Атлантике: изменения Азорского, Антильского, Северо-Атлантического течений. Отмечено смещение системы Пассатных течений и Межпассатного противотечения севернее занимаемого ранее положения.

Предложенная методика позволяет проанализировать изменения структуры и интенсивности течений, не применяя сложный математический аппарат анализа векторных полей, однако в дальнейшем мы предполагаем продолжить исследование, применив векторно-алгебраический метод анализа течений, разработанный для анализа векторных полей (Белышев, Клеванцов, Рожков, 1983).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-05-00034 и 16-05-00452). Кубряков А.А. поддержан фондом РНФ (грант № 15-17-20020).

#### Литература

- Белышев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеоиз-1. дат, 1983. 264 с.
- Жуков Л.А. Общая океанология. Л.: Гидрометеоиздат. 1976. 376 с. 2
- Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость гидрофизических характеристик в Гольфстриме 3. // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 454–462. DOI: 10.7868/S0030157413040047.
- 4. Chelton D., Schlax M. Global observations of oceanic Rossby waves // Science, 1996. Vol. 272. No. 5259. P. 234-238.
- Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.N. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in 5. Oceanography, 2011. Vol. 91. P. 167–216. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002.
- 6. Hakkinen S., Rhines P.B. Shifting surface currents in the northern North Atlantic Ocean // J. Geophysical Research. 2009. Vol. 114. C04005. DOI: 10.1029/2008JC004883. Minobe S., Kuwano-Yoshida A., Komori N., Xie SP., Small R.J. Influence of the Gulf Stream on the troposphere
- 7. // Nature. 2008. Vol. 452. DOI: 10.1038/nature06690.
- Palter J.B. The Role of the Gulf Stream in European Climate // Annual Review of Marine Science. 2015. Vol. 7. 8. P. 113-137. DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015656.
- 9. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Bhatt U.S., Polyakova E.I., Zhang X. North Atlantic warming: patterns of long-term trend and multidecadal variability // Climate Dynamics. 2009. Vol. 34. P. 439-457. DOI: 10.1007/s00382-008-0522-3.
- 10. Rio M.H., Guinehut S., Larnicol G. New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements. // J. Geophysical Research. 2011. Vol. 116. C07018. DOI: 10.1029/2010JC006505.
- 11. Rossby T., Flagg C.N., Donohue K., Sanchez-Franks A., Lillibridge J. On the long-term stability of Gulf Stream transport based on 20 years of direct measurements. // Geophysical Research Letters. 2014. Vol. 41. DOI: 10.1002/2013GL058636.
- 12 Stewart R.H. Introduction to Physical Oceanography / Department of Oceanography. Texas A & M University. 2008. 353 p.

# Long-term changes in large-scale circulation in the North Atlantic Ocean based on satellite altimetry

## A.M. Fedorov<sup>1</sup>, A.A. Kubryakov<sup>2</sup>, T.V. Belonenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia <sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia *E-mail: aandmofficiallv@gmail.com* 

We analyze the variability of large-scale surface geostrophic circulation in the North Atlantic Ocean using satellite altimetry for the period 1993–2015. Quantitative and qualitative evaluation of linear trends of current variability is performed. The analysis of the trends of zonal and meridional velocity components is used to understand changes in direction of the currents. It is shown that the currents weaken over the major part of the basin. Maximum weakening is observed in the Gulf Stream, where it reaches 0.017 m/s per year. For the Gulf Stream, we show that an increase in current intensity is observed mainly at its southern periphery, while at the northern periphery, there is a significant decrease in its intensity. Constant weakening is also observed in the Caribbean Current, where velocity has decreased by  $\sim 10\%$  over the investigated period. We have developed a field comparison of the "first" and "last" moments, calculated using trends, as fields at the beginning of 1993 and end of 2015. Comparison of these fields allow to identify the spatial variation of large-scale circulation in the North Atlantic Ocean. By using such kind of analysis, it was found that Subtropical Gyre becomes wider in the east-west direction. North Equatorial current and Equatorial Countercurrent shift north. Also, we can note that large-scale currents change their direction almost in each part of the observed area. Direction variations occur in Antilles, Azores, and Northern-Atlantic currents.

Keywords: currents, the North Atlantic Ocean, altimetry, the Gulf Stream, trends, large-scale circulation

Accepted: 13.10.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-225-237

### References

- 1. Belyshev A.P., Klevancov Ju.P., Rozhkov V.A., *Verojatnostnyj analiz morskih techenij* (Probabilistic analysis of ocean currents), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 264 p.
- 2. Zhukov L.A., Obshhaja okeanologija (The total oceanography), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 376 p.
- 3. Karlin L.N., Malinin V.N., Gordeeva S.M., Izmenchivosť gidrofizicheskih harakteristik v Gol'fstrime (Variability of hydrophysical characteristics in the Gulf Stream), *Oceanology*, 2013, Vol. 53, No. 4, pp. 401–409.
- 4. Chelton D., Schlax M., Global observations of oceanic Rossby waves, *Science*, 1996, Vol. 272, No. 5259, pp. 234–238.
- 5. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.N., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 2011, Vol. 91, pp. 167–216, http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002.
- 6. Hakkinen S., Rhines P.B., Shifting surface currents in the northern North Atlantic Ocean, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, C04005. DOI: 10.1029/2008JC004883.
- 7. Minobe S., Kuwano-Yoshida A., Komori N., Xie S.P., Small R.J., Influence of the Gulf Stream on the troposphere, *Nature*, 2008, Vol. 452. DOI: 10.1038/nature06690.
- 8. Palter J.B., The Role of the Gulf Stream in European Climate, *Annual Review of Marine Science*, 2015, Vol. 7, pp. 113–137. DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015656.
- Polyakov I.V., Alexeev V.A., Bhatt U.S., Polyakova E.I., Zhang X., North Atlantic warming: patterns of long-term trend and multidecadal variability, *Climate Dynamics*, 2009, Vol. 34, pp. 439–457. DOI: 10.1007/s00382-008-0522-3.
- Rio M.H., Guinehut S., Larnicol G., New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements, *J. Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, C07018. DOI: 10.1029/2010JC006505.
- 11. Rossby T., Flagg C.N., Donohue K., Sanchez-Franks A., Lillibridge J., On the long-term stability of Gulf Stream transport based on 20 years of direct measurements, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41. DOI: 10.1002/2013GL058636.
- 12. Stewart R.H. *Introduction To Physical Oceanography*, Department of Oceanography, Texas A & M University, 2008, 353 p.