

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕНОСА ВОД В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

С.А. Мысленков

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
stassas@rambler.ru

Введение

Спутниковая альтиметрия – один из современных дистанционных методов зондирования Земли из космоса, который заключается в измерении высоты спутника относительно поверхности Земли по времени прохождения сигнала, посылаемого и получаемого после отражения от поверхности Земли. Суть метода сводится к вычислению положения морской уровенной поверхности.

Данные спутниковых альтиметров используются уже достаточно давно, но в последние несколько лет, благодаря запуску новых спутников с более точными приборами и старту проекта GRACE по уточнению геоида, точность данных спутниковой альтиметрии возросла настолько, что на их основе уже можно получать оценки скоростей течений [7, 8, 10].

Данные спутниковой альтиметрии имеют хорошее пространственное и временное разрешение, поэтому грамотное использование и корректная интерпретация этих данных является чрезвычайно важной задачей для комплексного исследования динамики морей и океанов.

С помощью гравиметрии определяется положение геоида относительно отсчетного эллипсоида [5]. Геоид – это эквипотенциальная поверхность Земли, которая совпадает со средним уровнем невозмущенного океана, продолженного над материками. Абсолютная динамическая топография представляет собой отклонение реальной поверхности океана от геоида и, по сути, является отражением крупномасштабной циркуляции в океане. Отклонение морской поверхности от геоида называется динамической топографией и вызывается различными причинами: течениями, приливами, атмосферным давлением и т. п. Подробное описание особенностей использования данных спутниковой альтиметрии, возможных погрешностей, введения дополнительных поправок можно найти в работах [1, 5].

Уровень океана можно рассматривать как интегральный показатель интенсивности термодинамических процессов в океане. При восстановлении динамической картины моря по данным спутниковых альтиметров существует проблема, связанная с отсутствием точного

геоида. Эту проблему можно решить, если принять за геоид некий среднемноголетний уровень, а отклонение от этого уровня – аномалию уровня – считать аналогом динамической топографии. Однако этот подход не позволяет оценивать скорости поверхностных течений в районах, где наблюдаются стационарные течения и вихри, которые вносят вклад в среднемноголетний уровень, и такой средний уровень уже не может быть принят за положение геоида в данном районе.

В последние годы скорости поверхностных течений, полученные по данным спутниковой альтиметрии, используются в качестве поправки при расчетах поля течений динамическим методом [2, 3, 4]. Скорость меридионального течения на некотором горизонте представляется в виде суммы скорости, рассчитанной динамическим методом от дна, и баротропной поправки, рассчитываемой по данным спутниковой альтиметрии. Для расчета скоростей течений динамическим методом обычно используются данные гидрологических разрезов. Этот метод дает приемлемые результаты, которые активно используются для выявления межгодовой изменчивости в транспорте глубинных и промежуточных водных масс.

Однако в ряде случаев применение такой методики приводит к наличию существенных «невязок» – некомпенсированных переносов вод на замкнутых разрезах. В работах [2, 3] при расчете переноса через 60° с.ш. в Северной Атлантике интегральный перенос в некоторые годы составлял -14 и -17 Св ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$), что противоречит объективным представлениям о циркуляции вод в данном районе. Приводятся некоторые причины, объясняющие наличие «невязок»: присутствие синоптических вихрей и недостаточное их разрешение станциями, ошибки вычисления переноса в западном пограничном течении, существенная внутригодовая изменчивость переноса. Последняя причина возникает из-за того, что расчеты производятся для определенного момента времени, когда выполнялся гидрологический разрез, а в отдельно взятом месяце интегральный перенос может быть существенно отличен от среднегодового. Из-за отсутствия регулярных гидрологических данных (разрезы выполняются даже не каждый год) оценить этим методом внутригодовую изменчивость невозможно.

В данной статье предлагается методика расчета баротропного переноса вод на основе данных спутниковой альтиметрии. Приводятся количественные оценки баротропного переноса через 60° с.ш. в Северной Атлантике с 2006 по 2010 год. Произведена оценка внутригодовой и межгодовой изменчивости баротропного переноса вод в Восточно-Гренландском и Северо-Атлантическом течениях и их взаимный баланс.

Используемые данные и методика расчета баротропного переноса вод

Для расчета течений на поверхности были использованы данные об абсолютной динамической топографии, предоставляемые в свободном доступе в рамках проекта AVISO и доступные на сайте [12] и на ftp сервере [11]. Подробное описание продукта представлено в работе [9]. Для расчетов был выбран массив ежесуточных значений динамической топографии с 5 июля 2006 г. по 24 апреля 2009 года. Пространственное разрешение данных для выбранного района составляет около $1/3^\circ$.

Используемые в расчетах сведения о рельефе дна взяты из базы ETOPO-1, доступной на сайте [13].

Скорость зональной и меридиональной составляющих крупномасштабных течений можно вычислить, исходя из формул для расчета скорости геострофического течения [6]:

$$U = -\frac{g}{\rho_0 f} \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial y}, \dots V = \frac{g}{\rho_0 f} \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial x},$$

где U и V – проекции скорости течения на оси координат; f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести; ξ – динамический уровень моря; ρ – плотность, p – давление.

С помощью данных об абсолютной динамической топографии можно найти второй член в правой части приведенных выше уравнений, который не меняется с глубиной и является баротропной поправкой для скорости течения на каждом горизонте. Баротропную составляющую скорости течения можно вычислить, если прибавить ко второму члену в правой части уравнений среднее по глубине значение первого члена. Так как в нашем случае поле плотности с такой временной дискретностью неизвестно, то баротропной составляющей течения будем называть второй член. Так как мы будем рассматривать относительные изменения баротропной составляющей, то добавление среднего значения первого члена в нашем случае не играет существенной роли.

Расчет переноса производился на разрезе по 60° с.ш. от южной оконечности Гренландии до шельфа Великобритании для меридиональной баротропной составляющей течений. На первом этапе разрез был разделен на два участка – Восточно-Гренландское и Северо-Атлантическое течение. Граница между течениями проводилась по минимуму в динамической топографии на разрезе (рис. 1). Такое выделение течений во многом условно, так как в действительности в каждом из выделенных участков наблюдаются несколько

потоков, в том числе и разнонаправленных, но в данной работе акцент сделан на преобладающие потоки.

Дальнейшие расчеты производились отдельно для каждого из двух участков по следующей методике: сначала по данным абсолютной динамической топографии рассчитывались скорости на поверхности между двумя соседними узлами динамической высоты. Далее на основе данных о рельефе дна вычислялись площади сегментов интегрирования участка разреза между соседними узлами динамической высоты (рис. 1). Таким образом для каждого сегмента разреза были получены площадь и меридиональная составляющая скорости течения на поверхности для середины сегмента. Так как разрешение спутниковой альтиметрии составляет $1/3^\circ$ по долготе, то всего получилось 144 сегмента интегрирования. Расчеты были выполнены для каждого дня с 5 июля 2006 г. по 24 апреля 2009 года. На следующем этапе поверхностные скорости интегрировались по площади каждого сегмента, и далее суммировались для всего участка. В результате для каждого дня были вычислены баротропные переносы для двух разнонаправленных течений.

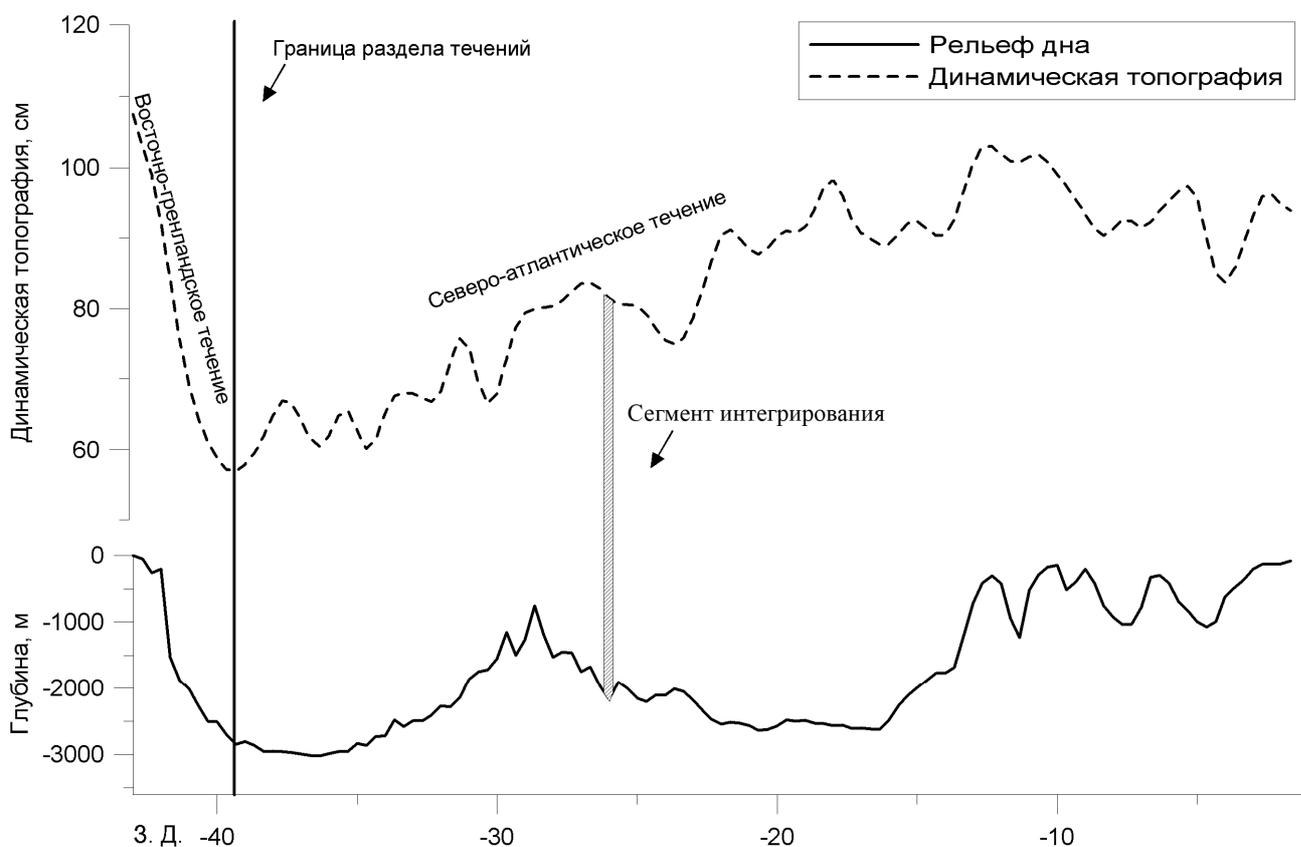


Рис. 1. Динамическая топография на 12.04.2008 г. и рельеф дна на разрезе по 60° с.ш.

Результаты

Расчеты показали, что ежесуточный баротропный перенос для Восточно-Гренландского течения лежит в диапазоне от 40 до 92 Св на юг, среднее значение за исследуемый период составляет 61 Св. Ежесуточный баротропный перенос для Северо-Атлантического течения лежит в диапазоне 51–105 Св, средний – 75 Св (рис. 2). Изменчивость переноса очень велика и может достигать 5–10 Св за сутки (врезка на рис. 2). Абсолютные значения баротропного переноса Восточно-Гренландского течения могут быть выше, чем Северо-Атлантического, и тогда суммарный баротропный перенос будет направлен на юг.

Анализ среднемесячных значений переноса позволил выявить отчетливый годовой ход, где минимум для Восточно-Гренландского течения приходится на июль-август и составляет 56 Св на юг, максимум приходится на зимние месяцы и составляет 65–70 Св. Для среднемесячных значений переноса в Северо-Атлантическом течении характерны минимум в летние месяцы в пределах 61–70 Св и максимум в ноябре-декабре – 85–90 Св (рис. 3).

Суммарный среднемесячный баротропный перенос положительный и находится в диапазоне 5–26 Св, средний составляет 14 Св (рис. 3).

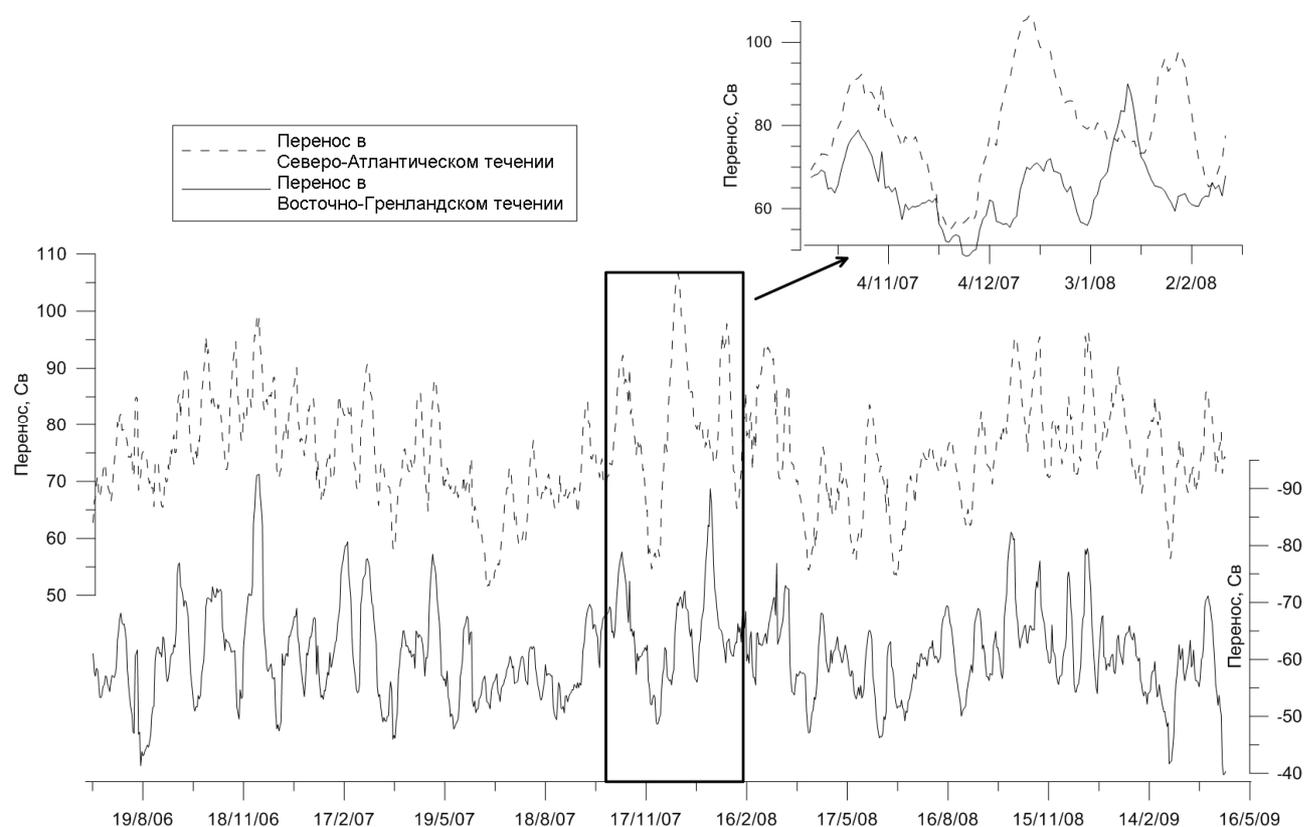


Рис. 2. Ежесуточный баротропный перенос в Восточно-Гренландском и Северо-Атлантическом течении.

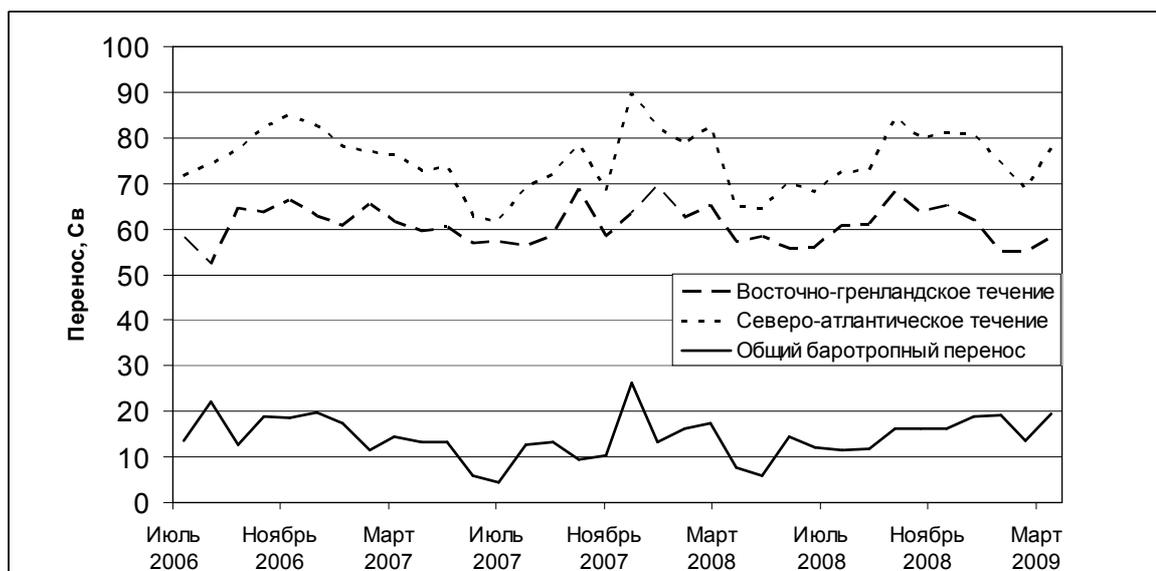


Рис. 3. Среднемесячный баротропный перенос в Восточно-Гренландском (на юг) и Северо-Атлантическом (на север) течениях и их суммарный баротропный перенос.

Учитывая, что трансатлантические разрезы в этом районе выполнялись в основном летом, можно предположить, что из-за наличия годового хода суммарного баротропного переноса расчеты интегрального переноса не учитывают 6–8 Св переноса на север.

Также необходимо отметить значительную суточную изменчивость баротропного переноса, как в течениях, так и суммарного. Например, перенос в Восточно-Гренландском течении за сутки может поменяться на 5–10 Св и, как следствие, сильно изменится суммарный баротропный перенос. С другой стороны, бароклинная составляющая течения, возникающая из-за пространственной неоднородности в поле плотности, физически не может испытывать подобную изменчивость, потому что для подобных колебаний переноса температура всего столба жидкости за сутки должна измениться на несколько градусов, чего в реальности не наблюдается.

Анализ имеющегося материала показал, что колебания ежесуточного суммарного баротропного переноса на разрезе могут составлять от –14 до +40 Св, также наблюдается отчетливый годовой ход. В результате вычисление абсолютного интегрального переноса с использованием данных трансатлантических разрезов и спутниковой альтиметрии предоставляет нам информацию о переносе вод только для конкретного момента времени, когда выполнялся этот разрез, и не может быть использовано для анализа межгодовой изменчивости. Также следует учитывать значительную ежесуточную изменчивость баротропного переноса и использовать осреднение за некий период времени, для которого производятся расчеты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-05-00634, 10-05-00144, 09-05-00788) и Министерства образования и науки (Госконтракт № П1147 и договор №11.G34.31.0007).

Список использованных источников

1. *Александрин А.И., Александрина М.Г., Загуменнов А.А.* Построение уровенной поверхности моря по данным альтиметрических измерений и полям термических структур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. – М.: ООО Азбука-2000, 2007. – Т. 1. – С. 247–253.
2. *Демидов А.Н., Добролюбов С.А., Мысленков С.А., Соков А.В., Тараканов Р.Ю.* Перенос водных масс через 60° с.ш. Северной Атлантики в 1997–2007 гг. по данным российских океанографических разрезов // Труды Гидрометцентра России. – 2009. – Вып. 343. – С. 90–101.
3. *Добролюбов С.А., Демидов А.Н.* Потоки массы, тепла и пресной воды на разрезах по 60° с.ш. в Северной Атлантике / В кн.: «Фундаментальные исследования океанов и морей». – Т. 1. – М.: Наука, 2006. – С. 92–109.
4. *Кошляков М.Н., Лисина И.И., Морозов Е.Г. и др.* Абсолютные геострофические течения в проливе Дрейка по наблюдениям 2003 и 2005 гг. // Океанология. – 2007. – Т. 47. – № 4. – С. 487–500.
5. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. – М.: ИЦ Море Международного института океана, 2005. – 366 с.
6. *Саркисян А.С.* Численный анализ и прогноз морских течений. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 182 с.
7. *Dohan, K., Maximenko N. et al.* Measuring the global ocean surface circulation with satellite and in situ observations // Proc. of OceanObs. – 2010:
8. *Maximenko N.A., Niiler P.P.* Mean surface circulation of the global ocean inferred from satellite altimeter and drifter data / In: 15 years of Progress in Radar Altimetry. – ESA Publication SP-614. – July 2006. – IPRC-458.
9. *Ssalto/Duacs User Handbook. (M)SLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Products.* – 2006. – CLS-DOS-NT-06.034.
10. *Willis J.K., Fu L.L.* Combining altimeter and subsurface float data to estimate the time averaged circulation in the upper ocean // J. Geophys. Res. – 2008. – V. 113. – C12017. –doi:10.1029/2007JC004690.
11. <ftp://ftp.avisioceanobs.com/>.
12. <http://las.avisioceanobs.com>.
13. http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html.

Поступила в редакцию 15.04.2011