

Проблемы восстановления динамической топографии моря по спутниковой альтиметрии и полям термических структур

М.Г. Алексанина, А.И. Алексанин

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
690041, Владивосток, Радио 5, (4232)310468
margeo@satellite.dvo.ru aleks@iacp.vl.ru*

Представлен подход для расчета величины средней многолетней динамической топографии моря на основе уравнения геострофического баланса и сопоставления спутниковых данных альтиметрических измерений и линий уровня тока, рассчитанным по полям пространственно-временных композиций ДОТК (доминантных ориентаций термических контрастов яркости) спутниковых изображений. Использовались альтиметрические данные за период с сентября 2003 по ноябрь 2004 гг. с квазисинхронных трасс спутников Jason-1 и Topex/Poseidon и соответствующие им спутниковые данные с NOAA/AVHRR.

Работа поддержана грантами РФФИ №06-01-00660, РФФИ №06-01-96915-р_офи и грантами ДВО РАН.

Введение

Спутниковая альтиметрия – это измерение высоты спутника относительно поверхности Земли по времени прохождения сигнала, посылаемого и получаемого после отражения от поверхности спутником. Решающую роль в спутниковой альтиметрии играет понятие геоида. По определению, это эквипотенциальная (уровенная) поверхность гравитационного поля Земли, совпадающая с невозмущенной поверхностью океана [1]. Отклонение уровня моря от его невозмущенного состояния, определяемое как динамическая топография (DT), связано с градиентом давления, который в свою очередь влияет на океаническую циркуляцию. Поэтому динамическая топография DT является определяющим параметром для расчета скоростей океанских течений.

Значение, полученное альтиметром – это высота спутника над поверхностью (alt). Вычитая (alt) из высоты орбиты (orb) спутника, отсчитанной от референц-эллипсоида, получаем высоту уровня моря над референц-эллипсоидом (SSH).

$$SSH = orb - alt - \Sigma dH, \quad (1)$$

где ΣdH отображает поправки, связанные с прохождением радиосигнала через атмосферу, приливами, инструментальные и орбитальные ошибки [2, 3]. Тогда динамическая топография или уровенная поверхность выражается таким образом

$$DT = SSH - G \quad (2)$$

Часто высота геоида неизвестна или содержит существенные ошибки. Уточнение высоты геоида (G) в открытом океане является одной из основных задач спутниковой альтиметрии. Аномалия высоты морской поверхности, измеренная альтиметром, выражается обычно через ее среднюю высоту (MSS):

$$SSH_a = SSH - MSS \quad (3)$$

В таком случае, для уточнения геоида достаточно рассчитать поправки

$$P = MSS - G \quad (4)$$

Основной нерешенной проблемой использования альтиметрических измерения для оценки скоростей поверхностных течений является отсутствие знаний средней многолетней динамической топографии моря, что эквивалентно расчету поправок P. Аномалии SSH_a, рассчитываемые относительно средней высоты поверхности, не содержат эту компоненту, что приводит к значительным артефактам при использовании их в качестве динамической топографии, особенно в областях стационарных течений моря.

Можно выделить 4 подхода к решению проблемы [4]:

- расчет средней топографии на основе климатических данных (часто используется климатология Левитуса);

- топография, рассчитываемая на основе моделирования циркуляции океана;
- "синтетическая" климатология - объединение этих двух подходов;
- использование спутниковой гравиметрии для расчета точного геоида и построения абсолютной динамической топографии на его основе.

Первые три подхода и их вариации обеспечивают наилучшую точность в настоящее время. Коррекция геоида обеспечивается за счет оптимальной подгонки градиента геоида к имеющимся *in situ* измерениям [5]. Но даже математически точные модели геоида не позволяют восстанавливать с нужной точностью его наклоны в областях с высокой его пространственной изменчивостью и высокими градиентами.

Чтобы по альтиметрическим измерениям получить оценки циркуляции моря требуется решение двух проблем – 1) восстановление геоида Земли с точностью 2-3 см; 2) пространственно-временная интерполяция данных на сетку, размер ячейки которой существенно меньше соответствующих характеристик исходных данных.

Продукция обработки альтиметрических спутниковых данных наиболее полно представлена на сайте AVISO (<http://las.aviso.oceanobs.com/las/servlets/dataset>). Для Северо-Западной части Тихого океана было проведено качественное сравнение поля скорости, рассчитанных по абсолютной уровенной поверхности (сайт AVISO), со спутниковыми ИК изображениями и картами ДОТК (доминантными ориентациями термических контрастов яркости [6]). В картах альтиметрических полей наблюдается отсутствие стационарных течений (Соя, Ойясио, Восточно-Сахалинское)[7], что свидетельствует о том, что геоид в данном районе с нужной точностью не определен. В то же время на картах термических структур стационарные течения прослеживаются хорошо. Поэтому представляет интерес исследовать совместное использование спутниковых альтиметрических измерений и полей ДОТК спутниковых ИК данных.

Метод и подход

Для мониторинга объектов и структур поверхности океана создан и работает метод расчета термических структур в форме карт доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК). Ориентации можно использовать как оценки направлений течения. Пространственно-временная композиция ДОТК позволяет восстанавливать общую картину устойчивых струйно-вихревых структур поверхности океана, как в течение месяца, так и в течение года [8]. Интегральная линия карты структур - кривая, в точках которой ДОТК являются касательными к ней. Интегральную линию карты ДОТК можно рассматривать как оценку линии тока на поверхности моря, вследствие высокой корреляции ориентаций ДОТК с направлениями скоростей поверхностных течений [9].

Согласно определению динамической топографии или океанографическому понятию уровня моря (1)-(4) получаем, что

$$DT = SSHa + MSS - G = SSHa + P \quad (5)$$

Считаем, что при выполнении геострофического баланса на линии тока высота уровенной поверхности везде постоянна, т.е. для точек линий тока, соединяющих две квазисинхронные альтиметрические трассы, выполняется соотношение $DT1 = DT2$ или $ssh1 + P1 = ssh2 + P2$, где $ssh1$ и $ssh2$ – аномалии высот, а $P1$ $P2$ – поправки. Тогда, линии тока позволяют экстраполировать значения уровенных высот на окрестную акваторию. Это первое.

Второе, набрав ряд таких переходов по линиям тока для заданных пар квазисинхронных альтиметрических трасс в различное время, можно найти величины изменчивости поправок ΔP на трассе.

$$\begin{aligned} SSHa(a1) + Pa &= SSHa(b1) + Pb1 & SSHa(a1) - SSHa(a2) &= SSHa(b1) - SSHa(b2) - (Pb1 - Pb2) \\ \Rightarrow & & Pb1 - Pb2 &= SSHa(b1) - SSHa(b2) - (SSHa(a1) - SSHa(a2)) \end{aligned} \quad (6)$$

$$SSHa(a2) + Pa = SSHa(b2) + Pb2$$

Величина изменчивости поправок на определенном интервале Δx одной трассы B определяется разницей изменчивости аномалий высот $\Delta ssh(a, B)$ на этом интервале трассы с изменчивостью

аномалий высот $\Delta ssha(A)$ на другой трассе A в точке за определенный интервал времени Δt , т.е. $\Delta Pb_x = \Delta ssha(B)_x - \Delta ssha(A)_t$. (рис.1).

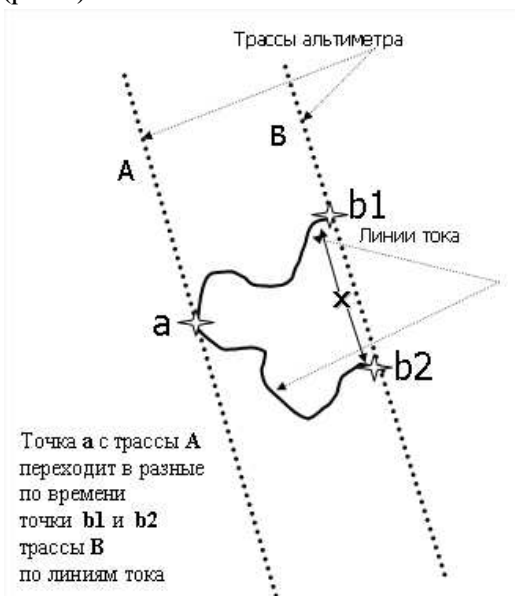


Рис. 1. Схема расчета изменчивости поправок MSS при переходе с одной альтиметрической трассы на другую

Интегральная характеристика от величины изменчивости поправок $\int \Delta Pb_x$ определяет абсолютные поправки к MSS на заданном участке трассы.

Данные

Подход был применен к спутниковым данным 2003-2004 г. для акватории северо-западной части Тихого океана с геострофическими течениями Ойясио, Субарктическим и Куроисио. Использовались альтиметрические данные за период с сентября 2003 по ноябрь 2004 гг. с квазисинхронных трасс спутников Jason-1 и Topex/Poseidon с межтрассовым расстоянием около 1.25° по долготе и соответствующие им интегральные линии тока (рис.2). Интегральные линии тока строились по 3-х дневным композициям ДОТК, соответствующим времени прохождения пар спутниковых трасс альтиметров над открытой от облачности акваторией.

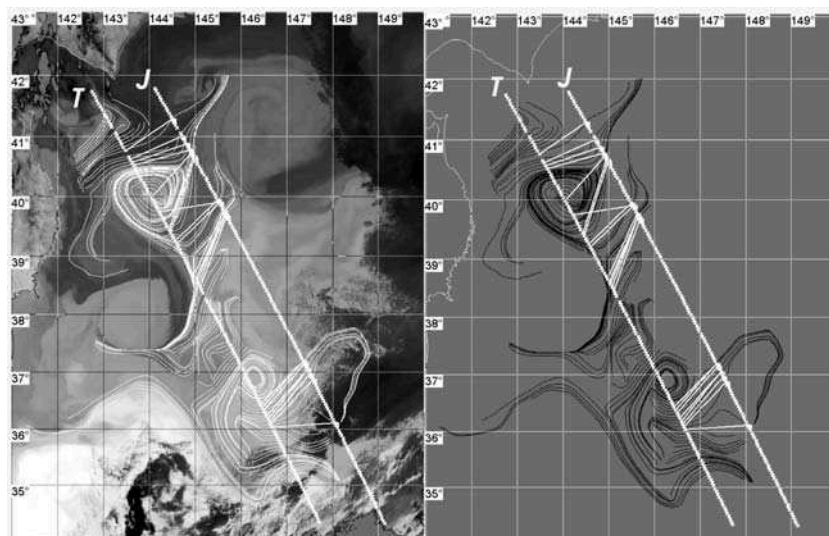


Рис. 2. ИК изображение северо-западной части Тихого океана (восточнее Японии) за 28 апреля 2004 года и соответствующие «линии тока» с переходами с трассы TOPEX на трассу JASON

Поскольку этот район интенсивно исследовался и накоплены значительные объемы судовых измерений, то следует ожидать, что средняя динамическая топография, используемая на сайте AVISO, имеет корректные значения ее перепадов на больших расстояниях (1000 км). Поэтому для оценки рассчитываемых нами поправок проводилось их сравнение с данными этого сайта.

Результаты экспериментов

Вариации поправок, полученные более чем за год по нескольким парам параллельных трасс Jason-1 и Торех/Poseidon, позволили получить интегральные характеристики поправок к альтиметрическим аномалиям высоты морской поверхности от о. Хоккайдо до течения Куроисио. Для пары трасс этого региона были получены величины изменчивости поправок и рассчитаны сами поправки.

На рис.3. представлены результаты экспериментов за год - сверху-вниз – изменчивость поправок (ΔP), интегралы поправок вдоль трасс ($\int \Delta P$), и данные с сайта AVISO за 28 апреля 2004

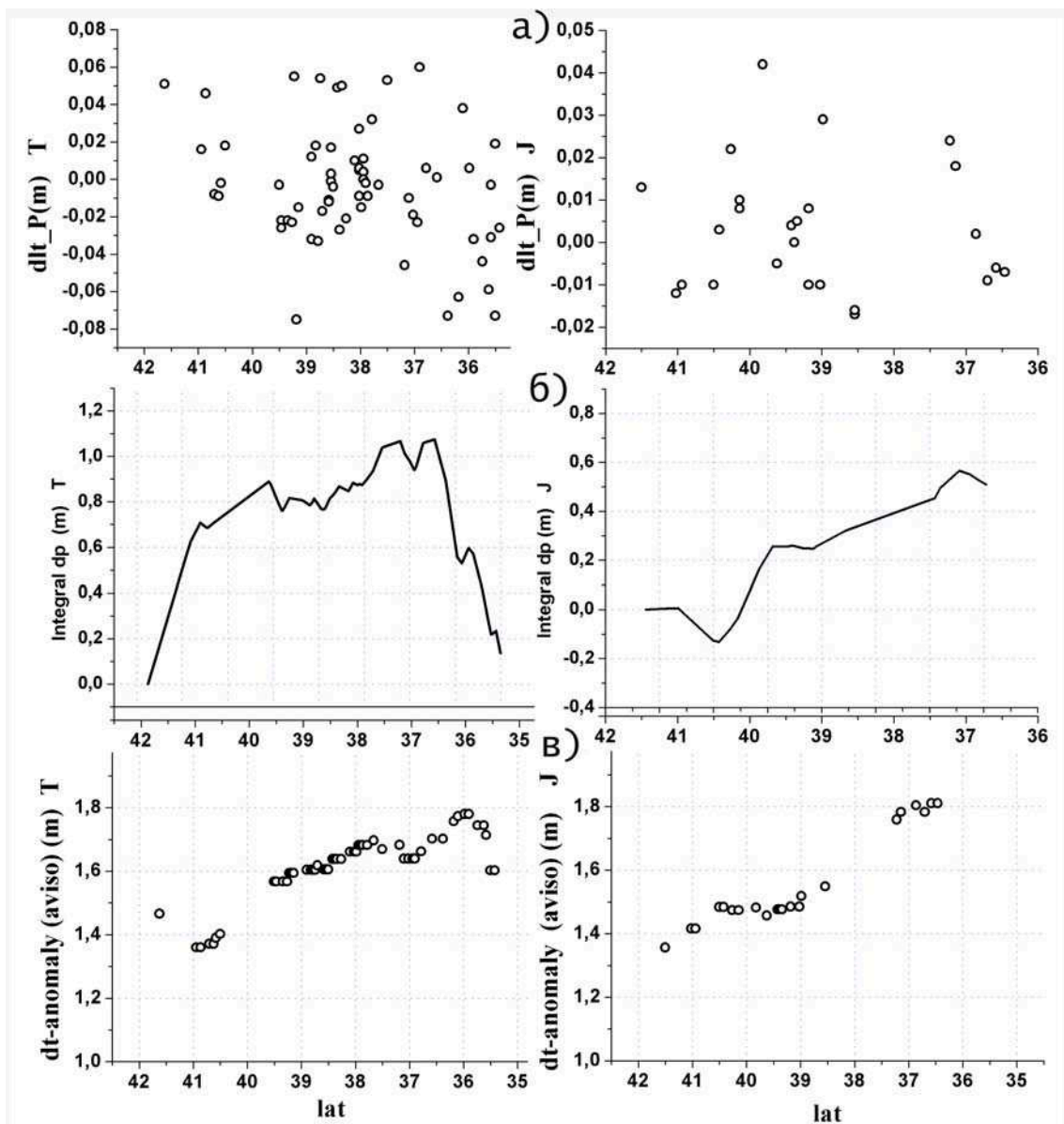


Рис. 3. Для пары трасс Торех (слева) и Jason (справа) показаны - а) изменчивость ΔP поправок MSS, б) соответствующие интегральные кривые $\int \Delta P$, и в) разность абсолютных высот и аномалий (DT-SSHa) с сайта AVISO

года, а именно разница динамической топографии и аномалий высот DT-SSHa. Справа графики соответствуют трассе TOPEX, а слева трассе JASON. Из графиков видно, что интегральные кривые поправок имеют те же тенденции в поведении и рост с уменьшением широты, что и поправки по данным AVISO. Величины перепадов поправок на севере и юге имеют близкие значения.

Подобный эксперимент был проведен для вихря, восточнее о. Хоккайдо (рис.4), но на других трассах. Были получены поправки за год наблюдений аналогичным способом, рассчитана абсолютная динамическая топография трасс на вихре за 9 апреля 2004 и было оценено рассогласование уровня моря в точках интегральных кривых карт ДОТК, приходящихся на пересечения с альтиметрическими трассами. Использование в качестве динамической топографии аномалий высот (SSHa) даёт среднеквадратичное рассогласование около 20 см. Полученные нами поправки уменьшили это рассогласование до 10см. Этот эксперимент подтверждает правильность выбранного подхода, а также говорит о возможности использования интегральных кривых, построенных по полям термических структур, для экстраполяции значений высот динамической топографии на окрестность точек альтиметрических измерений.

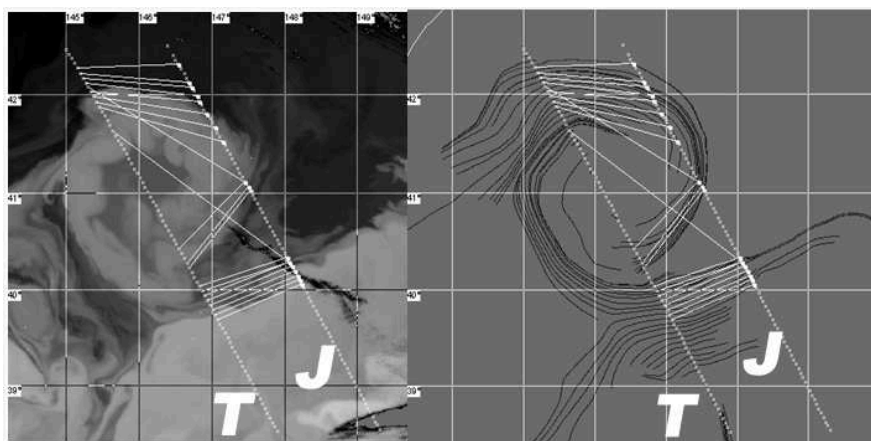


Рис. 4. ИК изображение вихря (слева), восточнее о. Хоккайдо за 09 апреля 2004 года, и соответствующие «линии тока» с переходами с трассы TOPEX на трассу JASON

Заключение

Предложен подход расчета средней динамической топографии на основе совместного анализа спутниковых альтиметрических данных и линий уровня тока, построенных по рассчитанным полям пространственно-временных композиций ДОТК (доминантных ориентаций термических контрастов) яркости спутниковых изображений. Суть подхода состоит в переходе по линиям тока, рассматриваемым как линии одного уровня, с одной альтиметрической трассы на другую квазисинхронную трассу. Предложенный подход был применен к спутниковым данным 2003-2004 г. для акватории северо-западной части Тихого океана с геострофическими течениями Ойясио, Субарктическим и Куроисио. Использовалось несколько (три) пары параллельных трасс Jason-1 и Topex/Poseidon. Было показано, что

1) Интегральные линии тока, строящиеся по полям ДОТК, можно рассматривать как линии уровня на поверхности моря. Предложенная методика позволяет рассчитывать перепады высот средней динамической топографии с масштабами 5-100км, что не позволяют делать применяющиеся сейчас в мире подходы.

2) Полученные предложенным методом более чем за год величины изменчивости поправок к MSS на отдельных участках трасс, а затем проинтегрированные, дали хорошо физически интерпретируемые величины перепадов высот средней динамической топографии.

3) Предложенный подход позволяет также экстраполировать альтиметрические спутниковые измерения на плотную сетку по интегральным линиям тока, рассчитанным по полям ДОТК.

Литература

1. *Пеллинен Л.П.* Высшая геодезия // М.: Недра, 1985. 128 с.
2. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // М.: ИЦ «Море» Международного института океана, 2005. 366 с.
3. *Романов А.А.* Геоинформационные технологии и интерактивная компьютерная обработка изображений в задачах дистанционного зондирования океана // М., Московский физико-технический институт, 1999. 232 с.
4. *Hernandez F., Schaeffer P., Rio M.-H., Tamagnan D., Le Traon P.-Y.* Mean dynamic topography for satellite altimetry: Two approaches, from oceanographic data or satellite gravimetry // Journées luxembourgeoises de géodynamique. Session N 89, Munsbach, LUXEMBOURG (12/11/2001) 2001, pp. 19-25.
5. *Dorandeu J., M. Ablain, and P.-Y. Le Traon.* Reducing Cross-Track Geoid Gradient Errors around TOPEX/Poseidon and Jason-1 Nominal Tracks: Application to Calculation of Sea Level Anomalies // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. V. 20. 2003. P. 1826-1838.
6. *Александрин А.И., Александрина М.Г.* Спутниковое информационное обеспечение мониторинга океана на Дальнем Востоке // Исследования дальневосточных морей России. М.: Наука, 2007. Т. II. С. 607-641.
7. *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.
8. *Aleksanin A.I. and Aleksanina M.G.* Detection of Stable Synoptical Features of Sea Surface from a Series of Infrared Satellite Images // Pattern Rec. and Image Proc. 2007. Vol. 17. No. 4. P. 480-486.
9. *Александрин А.И., Александрина М.Г., Горин И.И.* Спутниковые ИК-изображения: от термических структур к полю скоростей // Исследование Земли из космоса, 2001. №2. С. 7-15.