

Построение уровенной поверхности моря по данным альтиметрических измерений и полям термических структур

А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, А.А. Загуменнов

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

690041, Владивосток, Радио, 5

E-mail: aleks@iacp.vl.ru

При восстановлении циркуляции моря по альтиметрическим спутниковым измерениям существует проблема, связанная с отсутствием точного геоида, что приводит к необходимости работать с альтиметрическими аномалиями, которые не позволяют оценивать скорости поверхностных течений в районах, где наблюдаются стационарные течения и вихри. Предлагается подход к решению данной проблемы на основе спутниковых композиционных полей термических структур океана в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК). Высокая степень корреляций ДОТК с направлениями векторов поверхностных течений и стабильность ДОТК в течение нескольких дней позволяют строить интегральные кривые, которые можно рассматривать как псевдо-линии тока на поверхности. Линия тока, соединяющая две соседние квази-синхронные трассы альтиметра, должна иметь одинаковую высоту уровенной поверхности при выполнении геострофического баланса. Имея набор таких линий для заданных трасс альтиметра в различные интервалы времени, есть возможность найти соответствующие поправки к альтиметрическим аномалиям. Эти поправки, применяемые к альтиметрической среднеуровенной поверхности, и формируют геоид Земли с нужной точностью. Псевдо-линии тока позволяют экстраполировать значения уровенных высот на окрестную акваторию. Для реализации предложенного подхода созданы автоматические средства построения композиционных полей ДОТК, получения альтиметрических данных через ИНТЕРНЕТ и их совместной обработки с целью расчета поправок к геоиду и восстановления циркуляции океана. В работе рассмотрены различные способы расчета поправок на примере восстановления циркуляции течения Куроисио.

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

Введение

Получение оценок циркуляции моря по альтиметрическим измерениям требует решения двух проблем – восстановление геоида Земли с точностью 2-3 см и пространственно-временной интерполяции данных на сетку, размер ячейки которой существенно меньше соответствующих характеристик исходных данных. Расстояния наиболее близких альтиметрических трасс (спутники Jason-1 и Topex/Poseidon) превосходят 100 км в низких и средних широтах, что превышает характерные размеры синоптических вихрей океана. Наименьший (десятидневный) интервал повторяемости альтиметрических трасс слишком велик, поэтому пространственно-временная интерполяция данных приводит к значительным артефактам при восстановлении циркуляции.

Можно выделить 4 подхода при расчете поправок, апробированных в мире к настоящему времени [1]: на основе климатических оценок уровенной поверхности, рассчитанной по океанологическим измерениям; на основе средней циркуляции, рассчитанной численной моделью; на основе "синтетической климатологии", базирующейся на учете рассогласований между *in situ* наблюдениями и альтиметрическими оценками; на основе учета данных спутниковой гравиметрии. Ни один из них не гарантирует нужной точности расчета абсолютной высоты уровенной поверхности. В настоящее время восстановленные поля абсолютной уровенной поверхности и построенные по ним скорости поверхностных течений доступны на сайте AVISO <http://las.avisio.oceanobs.com> (миссия Французского Космического Агентства и NASA). Сопоставление полей течений с инфракрасными изображениями показывает наличие артефактов. На рис.1 приведен пример такого сопоставления. Наблюдается отсутствие стационарных течений (Соя, Ойясио, Восточно-Сахалинское) и потоки, выходящие на сушу.

Вывод, который можно сделать - геоид Земли в данном районе не определен с нужной точностью и требуется расчет поправок.

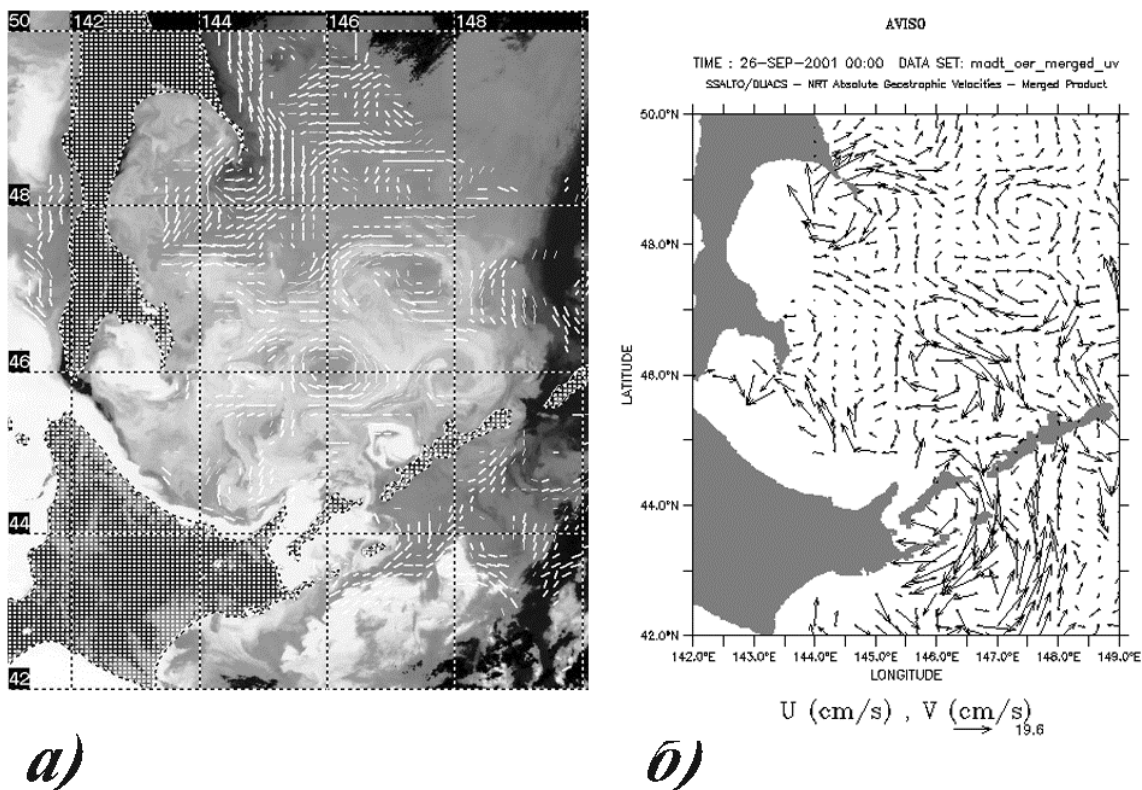


Рис.1. ИК-изображение за 30.09.01 с полем ДОТК и альтиметрические оценки скоростей поверхностных течений (AVISO) за то же время

Используемая информация

В работе использовались данные спутников Jason-1 и Topex/Poseidon (<ftp://podaac.jpl.nasa.gov>), а именно, их квази-синхронные трассы с межтрассовым расстоянием около 1.25° по долготе. Повторяемость трасс - 1 раз в 10 дней; расстояние между параллельными трассами одного спутника - около 2.5° . Доступ к альтиметрическим измерениям возможен в режиме, близком к режиму реального времени.

Альтиметрические измерения уже прошли предварительную обработку [2] и характеризуются величинами аномалии высоты морской поверхности Ssh и средней высоты поверхности mss:

$$\text{Ssh} = \text{orbit} - \text{mss} + \text{p}, \quad (1)$$

где orbit - расстояние между спутником и поверхностью, p - поправки, обусловленные различными искажающими факторами.

Для решения задачи созданы автоматические средства построения композиционных карт ДОТК, получения альтиметрических данных через ИНТЕРНЕТ и их совместной обработки с целью расчета поправок к геоиду и восстановления циркуляции океана.

Подход к решению задачи

При решении двух упомянутых выше проблем предлагается использовать спутниковые композиционные карты термических структур океана в форме доминантных ориентаций

термических контрастов (ДОТК). По сути ДОТК это угол статистически значимой касательной к изотерме в заданной окрестности точки. Высокая степень корреляций ДОТК с направлениями векторов поверхностных течений и стабильность ДОТК в течение нескольких дней позволяют строить интегральные кривые, которые можно рассматривать как псевдо-линии тока на поверхности [3, 4]. Линия тока, соединяющая две соседние квази-синхронные трассы альтиметра, должна иметь близкие по значению высоты уровенной поверхности при выполнении геострофического баланса (рис.2). Имея набор таких линий для заданных трасс альтиметра в различные интервалы времени, можно найти соответствующие поправки к альтиметрическим аномалиям. Эти поправки, добавляемые к альтиметрической среднеуровенной поверхности, и формируют геоид Земли. Псевдо-линии тока позволяют также экстраполировать значения уровенных высот на окрестную акваторию.

Пусть есть линии тока на поверхности моря, соединяющие 2 точки альтиметрической трассы – X1 и X2 (рис.2), тогда

$$\text{ssh1} + \text{gh1} = \text{ssh2} + \text{gh2}, \quad (2)$$

где ssh1 и ssh2 – аномалии высот, gh1 gh2 – поправки геоиду

Если для каждой точки трассы будет 2 и более уравнений, то получим переопределенную систему линейных уравнений, решаемую методом наименьших квадратов:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{Y}$$

$$\mathbf{X} = \text{Argmin} \|\mathbf{AX} - \mathbf{Y}\|, \quad (3)$$

где $\mathbf{X} = (\dots, \text{ghi}, \dots, \text{ghj}, \dots)$, $\mathbf{Y} = (\dots, \text{sshj} - \text{ssh}_i, \dots)$.

В силу того, что уровенная поверхность определяется с точностью до константы, одной из точек трассы присваивается фиксированное значение высоты.

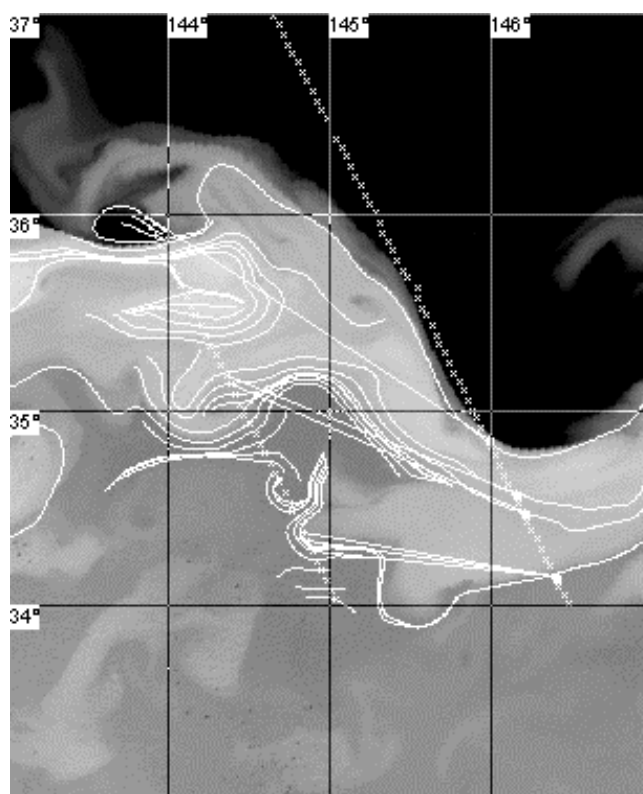


Рис.2. Псевдо-линии тока, рассчитанные по ИК изображениям, и квази-синхронные трассы альтиметрических спутников Jason-1 и Topex/Poseidon за 28.03.2004. Отрезками соединены точки разных трасс, соответствующих одной и той же линии тока

Расчет поправок к геоиду

При всей простоте постановки задачи (1) первые попытки ее решить для конкретных районов со стационарными течениями к успеху не привели. Не смотря на превышения числа уравнений над числом неизвестных в два-три раза, сингулярное разложение матрицы A говорит о плохой обусловленности задачи. Это указывает на то, что интегральные линии проходят по одним и тем же местам и в целом они хорошо соответствуют линиям тока. Потому необходимы некоторые процедуры регуляризации и специальные приемы обработки данных.

Можно выделить следующие подходы при решении задачи определения поправок к геоиду. Во-первых, это упомянутое использование интегральных кривых с заранее известными ограничениями на перепад уровней высот в данном районе (рассчитанных, например, динамическим методом по судовым STD-измерениям). Основная сложность - требуется пространственно-временная устойчивость ДОТК на всей трассе. Расчет таких карт в динамически активных районах (например, течение Куроисио) требует значительного количества изображений, которое может обеспечить только геостационарный спутник. Во-вторых, это использование синоптического подхода - аналитических моделей функции тока для вихрей и фронтов. Аналитическая модель вихря позволяет строить изолинии уровня поверхности [5], пересекающих трассы альтиметрических измерений, что дает сразу набор точек с одинаковыми высотами. В-третьих, это комбинация этих подходов. И в-четвертых, это использование оценок скоростей поверхностных течений по последовательности спутниковых изображений для:

- а) комбинирования с ДОТК при неустойчивости последних;
- б) расчета абсолютной уровня поверхности на основе синоптических моделей.

Для апробации подходов был выбран район продолжения течения Куроисио, где в рамках международного проекта KESS [6] тщательные подспутниковые измерения вдоль альтиметрических трасс позволяют рассчитывать на хорошую точность абсолютной уровня поверхности с сайта AVISO. В частности, были апробированы следующие схемы расчета поправок к геоиду.

Совпадение линии трассы с интегральной кривой

Иногда случается совпадение интегральной кривой с частью альтиметрической трассы с хорошей точностью. Требуемую пространственную точность можно оценить исходя из уравнения геострофического баланса:

$$f \cdot v = -g \cdot \partial \eta / \partial n, \quad (4)$$

где v - скорость, f - параметр Кариолиса, η - высота уровня моря, n - ортогональ к направлению движения. При максимальной скорости течения Куроисио около 1.5 м/сек и шаге альтиметрических отсчетов в 4-5 км $\Delta \eta \approx 4$ см, что соответствует примерной точности расчета уровня поверхности. Т.о. совпадение трасс с точностью 4 км можно считать приемлемым. Колебания самого геоида на таких расстояниях должно быть меньше и, видимо, так оно и есть, так как оценки точности уровня поверхности в противном случае были бы существенно хуже в силу несовпадения точек положений отсчетов на одной трассе в разное время измерений. Совпадение трассы с интегральной кривой означает то, что аномалии высот являются поправками к геоиду. На рис.3 приведен такой пример, позволивший рассчитать поправки на части трассы. В данном регионе такое совпадение не редкое, что позволило оценить поправки для диапазона трассы между 35-ым и 36-м градусом северной широты для спутника Jason-1.

Использование аналитической модели течения вдоль плотностного фронта

Расчет основан на факте когерентности профилей перепада уровня поверхности поперек течения Куроисио при ортогональном сечении течения в разных местах [7, 8]. Предполагается, что

ширина течения и поперечный профиль его постоянны. Для приведения соответствия уровней двух профилей используется положение северной границы фронта, пересечение трасс с которой дает одинаковые значения уровня (рис.4). В качестве линии фронта выбирается произвольная линия функции тока, рассчитанная по полю ДОТК. Угол между линией трассы и фронта позволяет оценить расстояние до границы от любой точки трассы. Точки разных трасс с одинаковыми расстояниями до границы должны иметь одинаковые высоты абсолютной уровенной поверхности.

В первом эксперименте использовалось знание поправок к геоиду на одной из трасс, полученное из предыдущего эксперимента. Зная поправки трассы 1, можно рассчитать поправки трассы 2 (рис.3). Результаты расчетов сравнивались с данными AVISO. Перепад высот между точками трассы 2 по аномалиям - 43см, с поправками 51 см, поданным AVISO - 57 см.

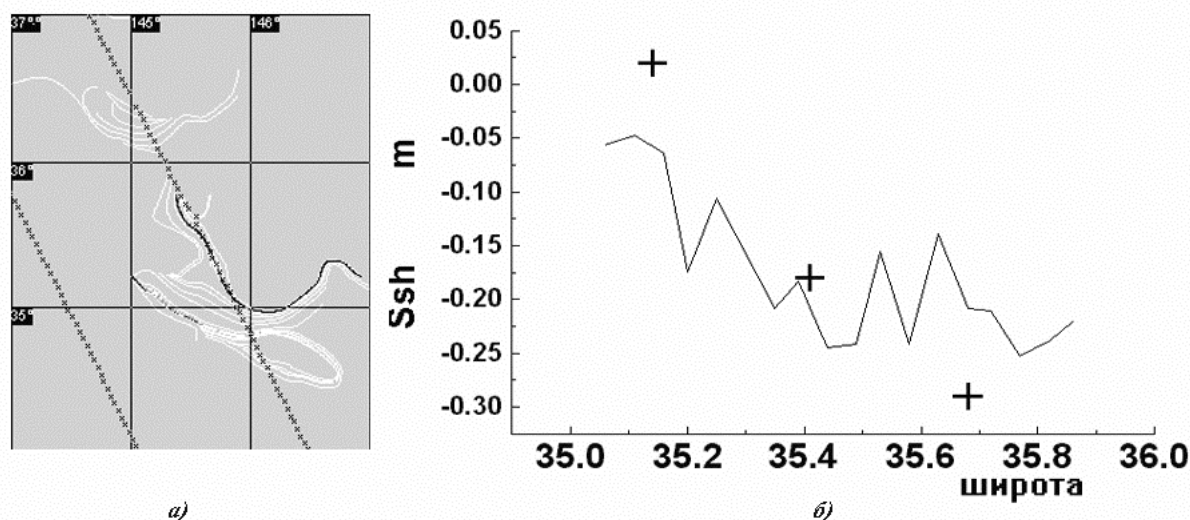


Рис. 3. а) Трассы альтиметров за 27.03.2004 и интегральные линии ДОТК. б) Аномалии ssh, лежащие на интегральной кривой, и абсолютные высоты (по AVISO) - крестики. Среднее рассогласование высот- 4 см

Во втором эксперименте решалась система уравнений с регуляризацией (52 уравнения). Использовались те же пересекающиеся трассы спутника Jason-1, но другие участки. Были взяты три пары квази-синхронных трасс за разное время, но соответствующих одним и тем же участкам. Для одной из 6 трасс были заданы высоты уровенной поверхности (для регуляризации, данные AVISO). Стандартное отклонение решения системы линейных уравнений (рассчитывается по невязкам каждого уравнения) составило около 7.9 см. Проверка правильности расчета северной границы фронта осуществлялась следующим образом. Последовательно для каждой пары трасс осуществлялась сдвигка их относительно друг друга с шагом 5 км (поправка на положение северной границы) и решалась новая система уравнений (1). Величина стандартного отклонения σ являлась критерием оптимальности при расчете сдвигки. Эксперименты показали, что минимальная величина σ получается при сдвигке лишь одной из трасс на 5 км (шаг расчета альтиметрических измерений на трассе). При других сдвигках величина σ быстро нарастала. Таким образом, можно сделать вывод, что поле ДОТК позволяет с высокой точностью рассчитывать линию фронта и согласовывать разнесенные по пространству данные.

На рис.5 представлены невязки для каждой из пар трасс. Для трассы за 28.03.2004 невязки первых трех точек существенно отличаются от остальных. Анализ соответствующего спутникового изображения показывает, что они относятся к области взаимодействия циклонического вихря с северной границей фронта, что искажает профиль уровенной поверхности фронта и приводит к значительным невязкам. Исключение этих трех уравнений дало стандартное отклонение 6.4. см (4

см - точность альтиметрических измерений). На рис. 6 представлены результаты расчетов. Можно отметить, что аномалии высот двух трасс существенно отличались по высоте и форме. Высоты урвенной поверхности для трех пар трасс хорошо соответствуют друг другу. Перепады высоты поперек Курошио на заданных участках достигали 60 см и хорошо восстанавливаются предложенной методикой.

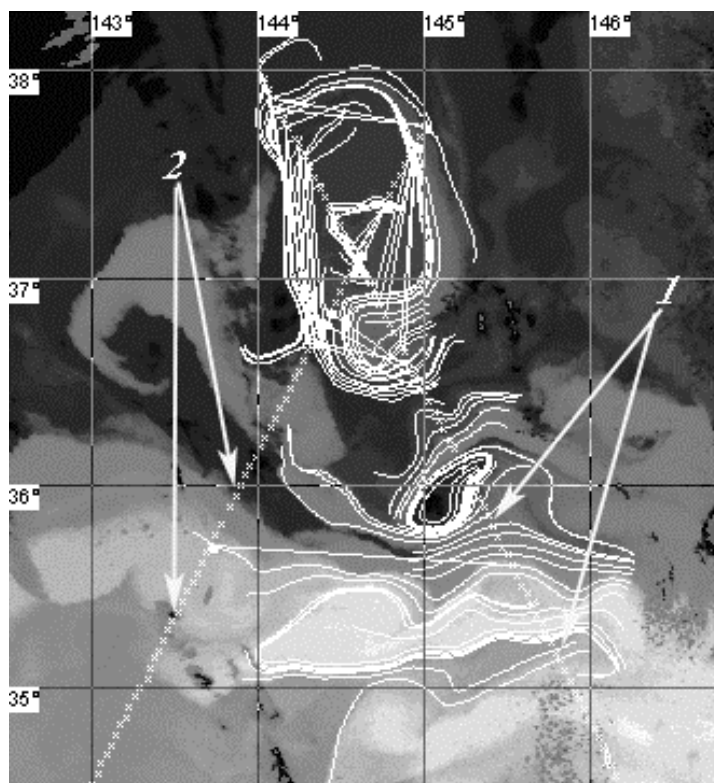


Рис. 4. Трассы альтиметров за 09.03.2004 и полутонное изображение. Стрелками указаны части трасс, использованных в эксперименте

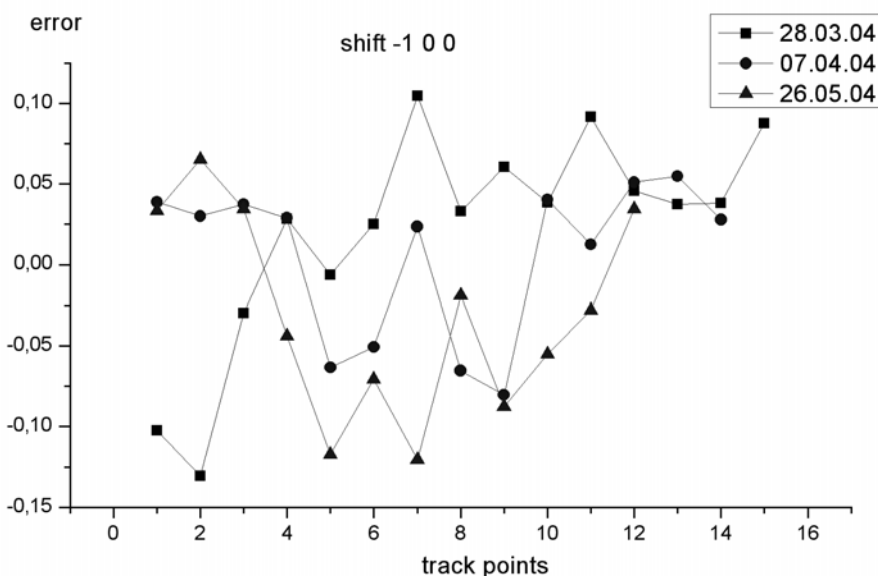


Рис. 5. Рассогласования высот абсолютной урвенной поверхности для точек трех пар трасс за - 28.03.2004; 07.04.2004; 26.05.2004

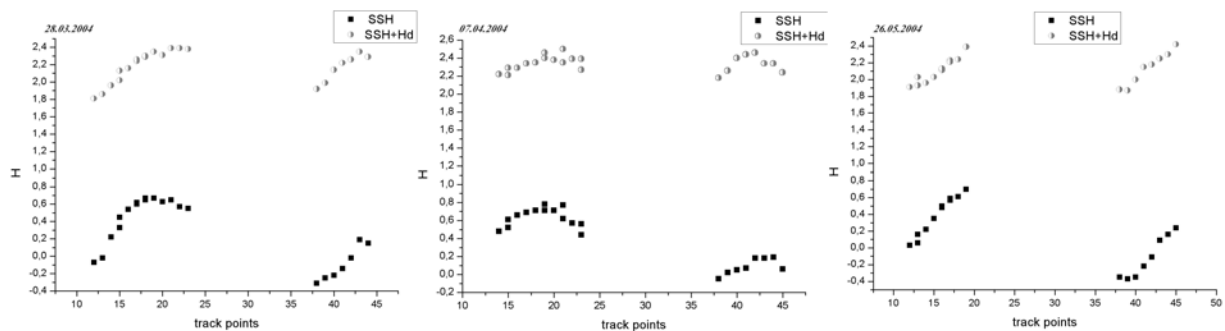


Рис. 6. Примеры восстановления поправок за даты - 28.03.2004; 07.04.2004; 26.05.2004 (слева – направо). Квадраты – аномалии высот, круги – рассчитанная уровенная поверхность

Литература

1. 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.
2. Desai D.S., Haines B.J, Case K. Near real time sea surface height anomaly products for Jason-1 and Topex/Poseidon. User manual. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, JPL D-26281, 2003,13p.
3. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И. Спутниковые ИК-изображения: от термических структур к полю скоростей//Исслед. Земли из космоса. 2001.№ 2.С.7-15.
4. Alexanin A.I., Alexanina M.G., Herbek E.E., Ryabov O. Scaling property estimation of Thermal sea surface turbulent structures on NOAA IR-imagery//In Proc. OCEANS'98, 28 Sept.-1 Oct., 1998. Nice, France. 1998.-Vol.2. P.1000-1005.
5. Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям. //Материалы Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса»,Москва,11-13 ноября.,2003,М:ИКИ РАН, 2004,с.382-386.
6. Qiu, B., S. Chen, and P.Hacker, 2006: Effect of mesoscale eddies on Subtropical Mode Water variability from the Kuroshio Extension System Study (KESS)//J.Phys.Oceanogr.,in press.
7. Белкин И.М., Грачев Ю.М., Михайличенко Ю.Г. Структура, кинематика и синоптическая изменчивость фронтальной зоны северо-западной части Тихого океана в районе 160° в.д. // Моделирование гидрофизических полей и процессов в океане/ Под ред. Моница А.С., Сеидова Д.Г. М.:Наука, 1986,с.170-200.
8. Алексанин А.И. Скорость геострофического течения на поверхности: сопоставление спутниковых и судовых измерений. // Исслед. Земли из космоса, №6, 1991, с.55-61.