

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

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

Институт Автоматики и Процессов Управления ДВО РАН, 690041, Владивосток,
Радио 5, (4232)3104680, aleks@iacp.dvo.ru , aleks@satellite.dvo.ru

Основные проблемы использования альтиметрических измерений для расчета циркуляции морей:

- 1) восстановление геоида Земли с точностью 2-3 см;**
- 2) пространственно-временная интерполяция данных.**

Альтиметрические измерения

Используемые спутники

Jason-1, Topex/Poseidon - квази-синхронные трассы с межтрассовым расстоянием около 1.25° по долготе

Повторяемость трасс - 1 раз в 10 дней
расстояние между трассами - около 2.5°

Измерения:

mss - средняя высота морской поверхности

$Ssh = orbit - mss + p$ - аномалия высоты

p - поправки

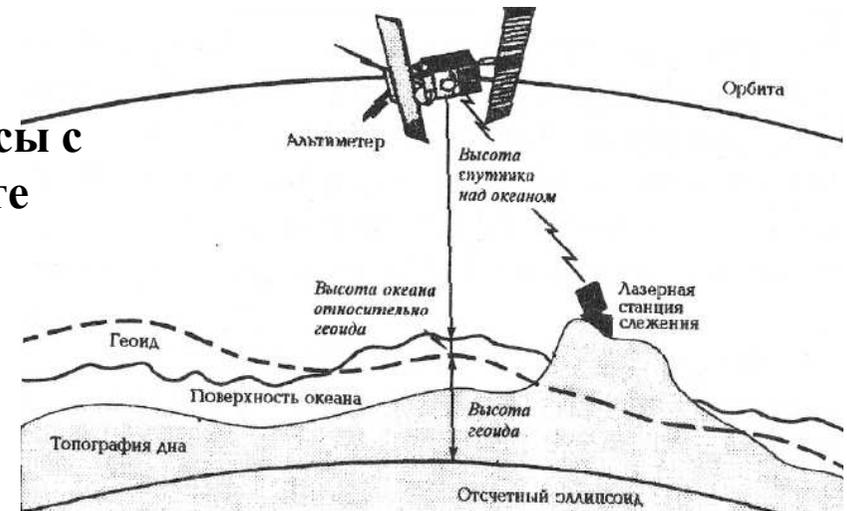
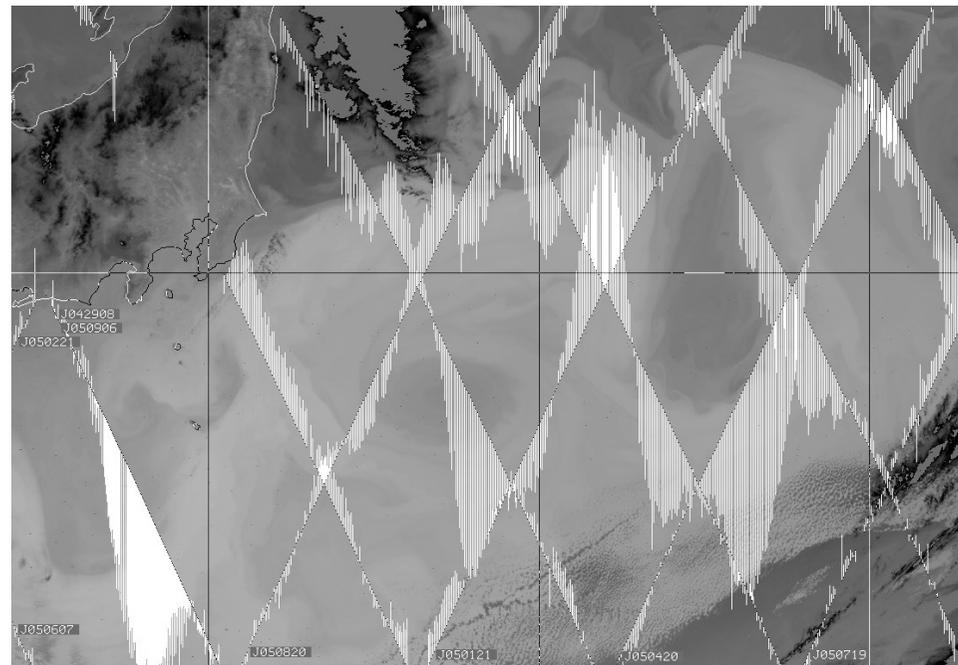


Схема измерений



ИК-изображение за 04.05.2005 и аномалии уровня поверхности спутника Jason-1

Доступ к альтиметрическим измерениям в режиме, близком к режиму реального времени.

Обработанные данные:

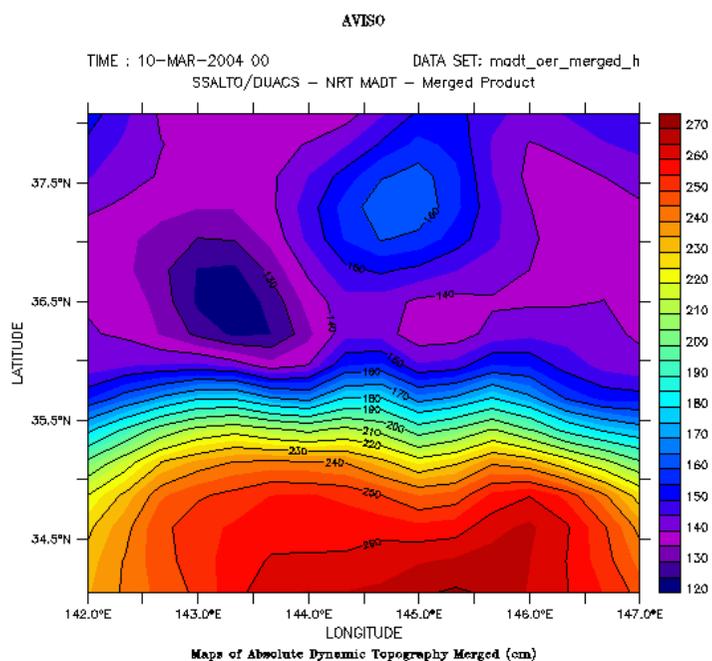
<ftp://podaac.jpl.nasa.gov>

Готовые поля:

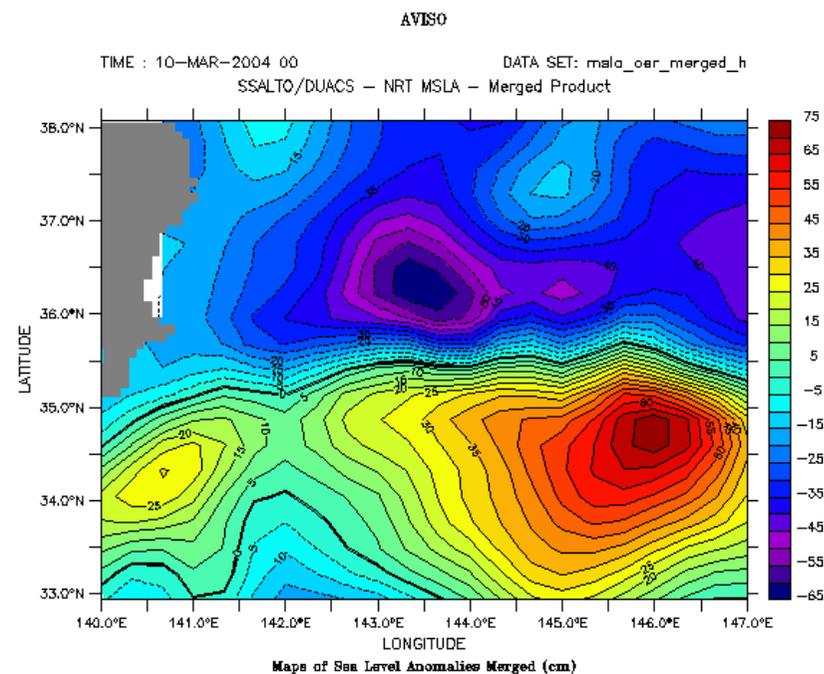
<http://las.aviso.oceanobs.com>

Сайт AVISO (FSA&NASA)

Сайт AVISO



Абсолютная уровенная поверхность
продолжения Куросио



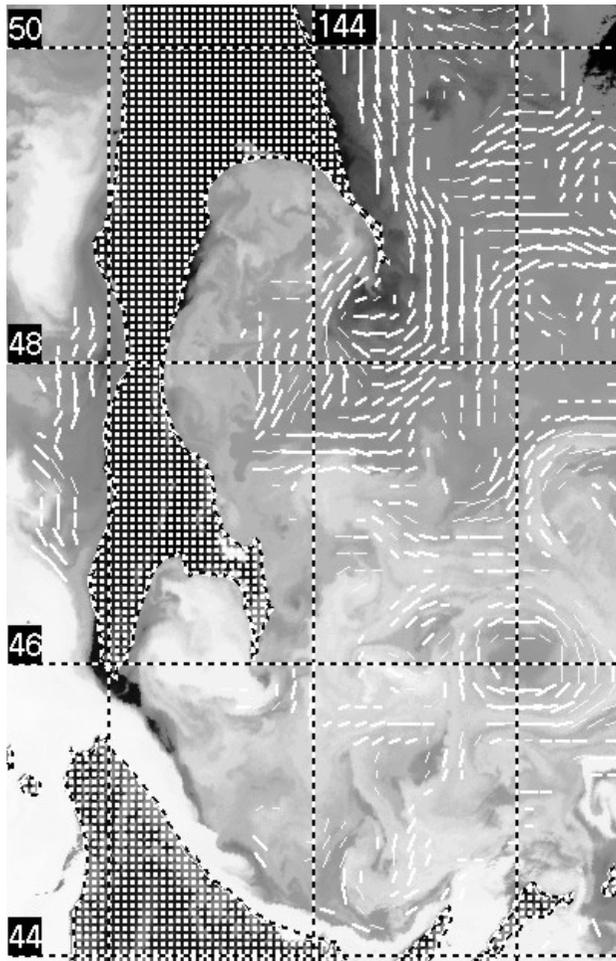
Аномалия уровенной поверхности
продолжения Куросио

Альтиметрические карты Охотоморского региона.

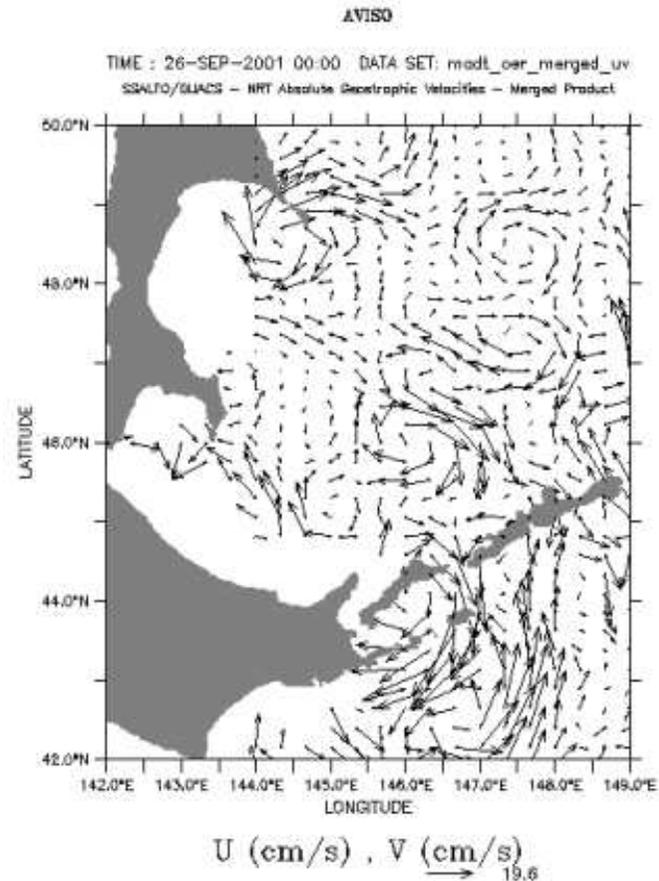
Артефакты альтиметрических полей -

отсутствие стационарных течений (Соя, Ойясио, Восточно-Сахалинское)

Вывод. Геоид в данном районе не определен с нужной точностью.



ИК-изображение за 30.09.01
с картой ДОТК



Карты альтиметрических оценок
поля скорости по абсолютной уровенной
поверхности

Возможные пути решения и постановка задачи

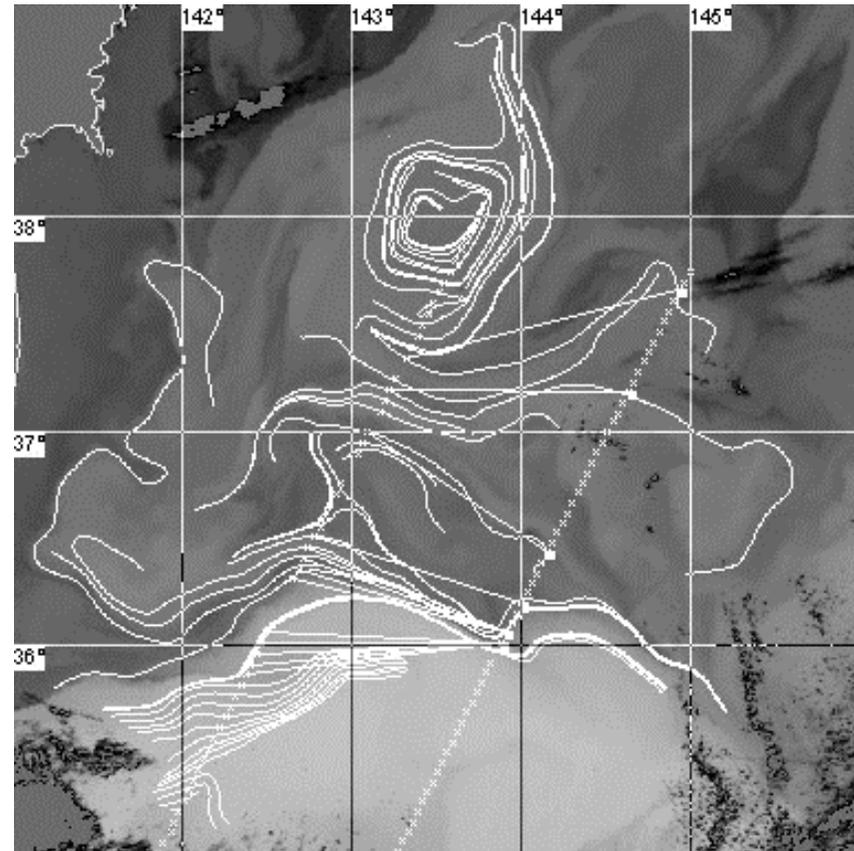
Пусть есть линии тока на поверхности моря, соединяющие 2 точки альтиметрической трассы – X1 и X2, тогда $ssh1+gh1=ssh2+gh2$, где $ssh1$ и $ssh2$ – аномалии высот, $gh1$ $gh2$ – поправки геоиду

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

$$AX = Y$$

$$X = \text{Argmin} \left\| AX - Y \right\|$$

$$X=(\dots, gh_i, \dots, gh_j, \dots), Y=(\dots, ssh_j - ssh_i, \dots)$$



Псевдо-линии тока, оцененные по ИК изображениям

Расчет доминантных ориентаций контрастов яркости

Поле яркости

$$\{ I_{ij} \}, ij \in a \times a$$



Поле градиентов яркости

$$\{ G_{ij} e^{i\varphi_{ij}} \}, \varphi_{ij} \in [-\pi, +\pi]$$

$$G_x = \left\{ \sum_{d=-a/2}^{a/2} [I_{i+a/2, j+d} - I_{i-a/2, j+d}] \right\} / a$$

$$G_y = \left\{ \sum_{d=-a/2}^{a/2} [I_{i+d, j-a/2} - I_{i+d, j+a/2}] \right\} / a$$



Поле ориентаций контрастов

$$\{ K_{ij} e^{i\theta_{ij}} \},$$

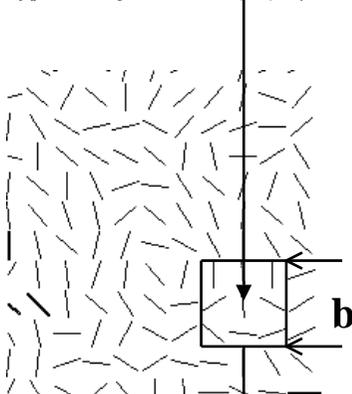
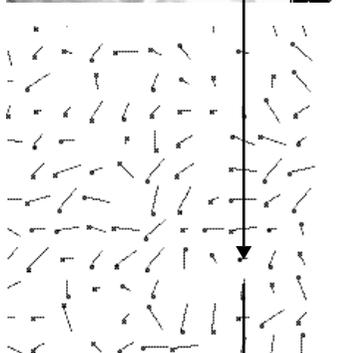
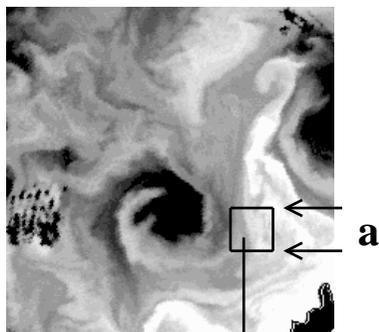
$$\theta_{ij} = \varphi_{ij} - \pi/2 :$$

$$\theta_{ij} \in [0, +\pi]$$



Поле доминантных ориентаций контрастов

$$\Theta = f(\theta_{ij}) : \\ (ij) \in [b \times b]$$



Направление яркостного контраста θ_{ij} - направление, ортогональное образу вектора яркостного градиента

$$\nabla u_{ij} = G e^{-i\varphi}.$$

Оценка доминантной ориентации термического контраста (ДОТК)

$$\theta_{mn}^* : \sum \Delta \theta_{ij} \rightarrow \min, \\ \Delta \theta_{ij} = W(\theta_{ij}) \cdot \min \{ |\theta_{ij} - \theta_{mn}^*|, |\theta_{ij} - \theta_{mn}^* - \pi| \},$$

где $W(\theta_{ij})$ - весовой коэффициент.

Для оценки статистической значимости ДОТК

используется неравенство Маркова (ϵ - допустимая мера разброса).

$$P^* : P\{\Delta \theta_{ij} < \epsilon\} > 1 - (M \Delta \theta_{ij}) / \epsilon$$

Из требования удовлетворения точности ϵ с вероятностью P^*

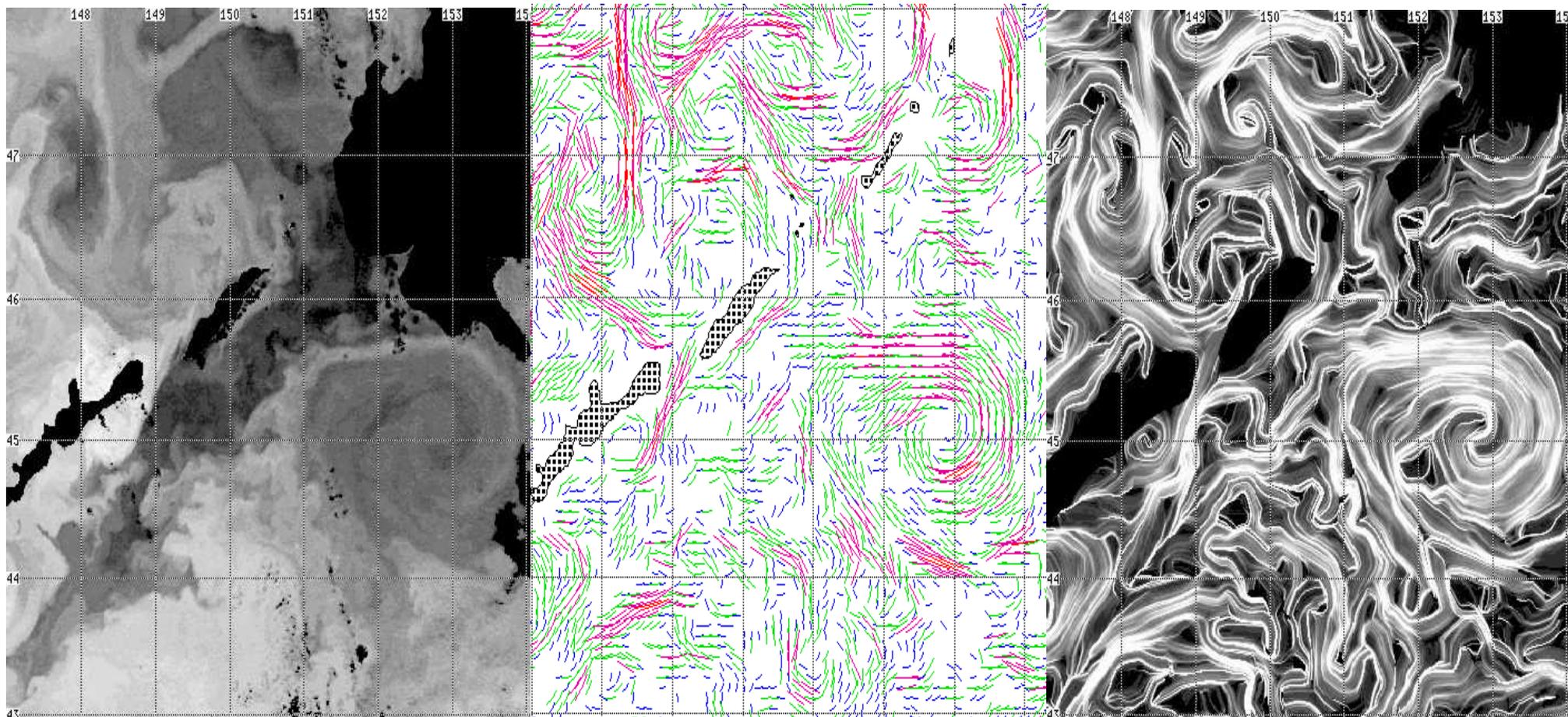
$$P\{\Delta \theta_{ij} < \epsilon\} > P^*$$

получаем условие выделения ДОТК

$$M \Delta \theta_{ij} < (1 - P^*) \times \epsilon,$$

$$\text{где } M \Delta \theta_{ij} = (\sum \Delta \theta_{ij}) / \sum W(\theta_{ij}).$$

От ДОТК к плотности интегральных кривых – линиям тока



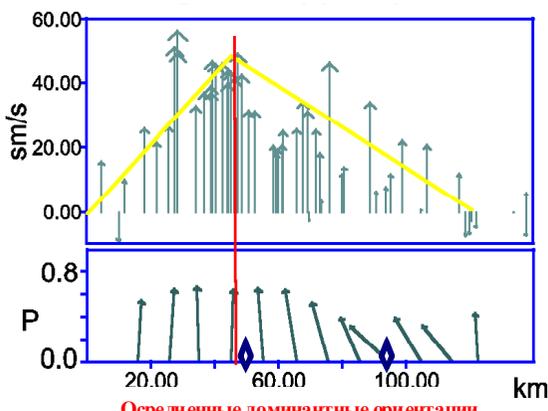
Фрагмент ИК изображения NOAA за 10.10.95.

соответствующее изображение ДОТК

соответствующее изображение плотности интегральных кривых

В силу сдвигового характера течений касательные к изотермам указывают на зоны максимальных скоростей.

Поэтому интегральные кривые должны концентрироваться именно в этих зонах.



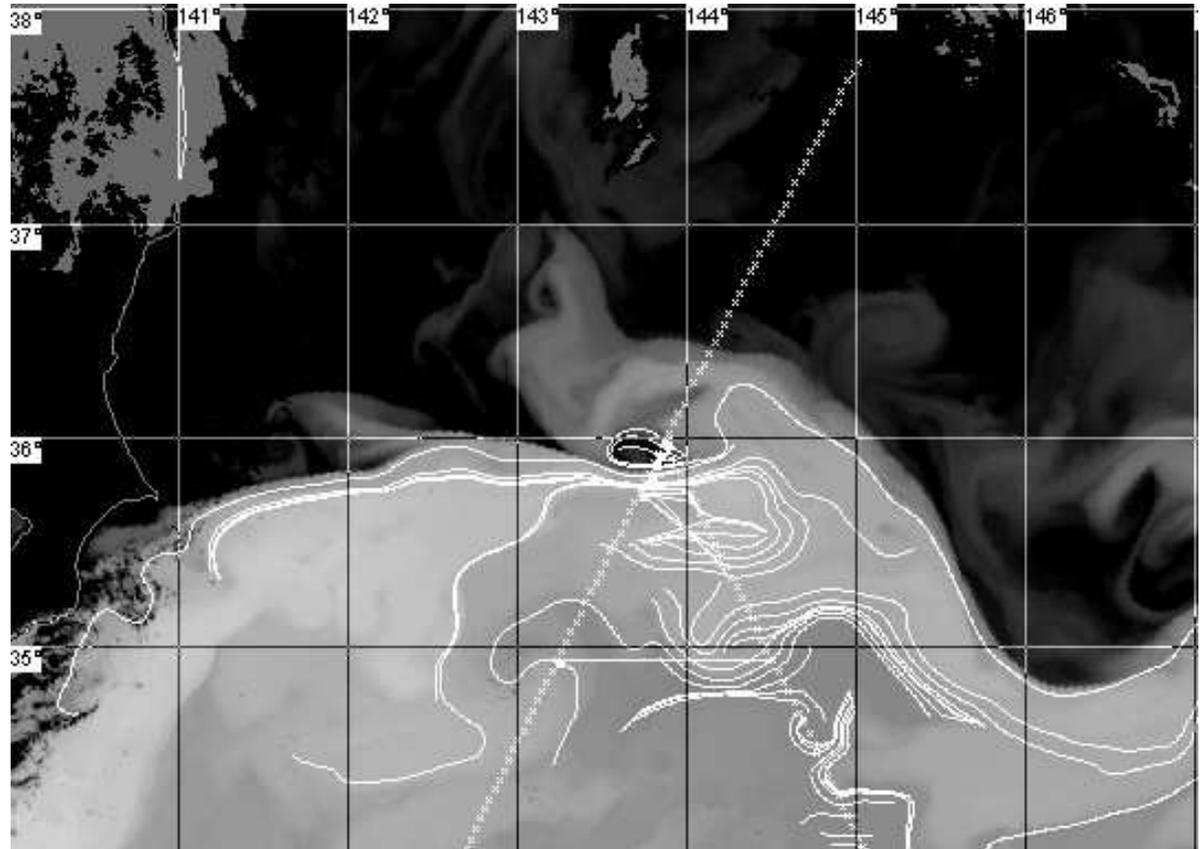
Яркость пикселя строящегося изображения – это количество интегральных кривых, прошедших через него. Чем выше яркость, тем выше плотность линий тока.

Особенности использования интегральных кривых поля ДОТК

Используются композиционные карты ДОТК с оценкой временной устойчивости.

Способы получения уравнений:

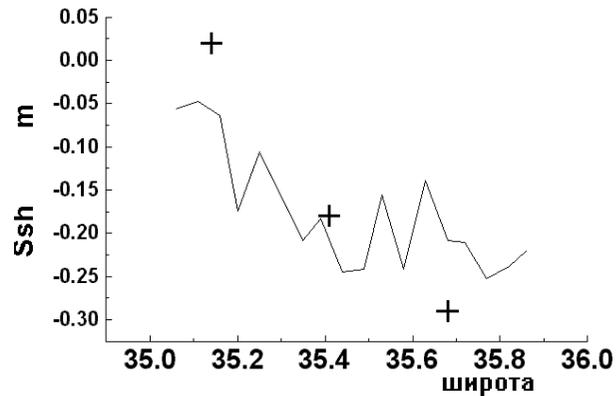
1. Использование интегральных кривых. Сложности: требуется пространственно-временная устойчивость ДОТК на всей трассе.
2. Использование синоптического подхода - аналитических моделей функции тока для вихрей и фронтов.
3. Комбинация этих подходов.
4. Использование оценок скоростей поверхностных течений по последовательности спутниковых изображений для:
 - а) комбинирования с ДОТК при неустойчивости последних;
 - б) расчет абсолютной уровенной поверхности на основе синоптических моделей



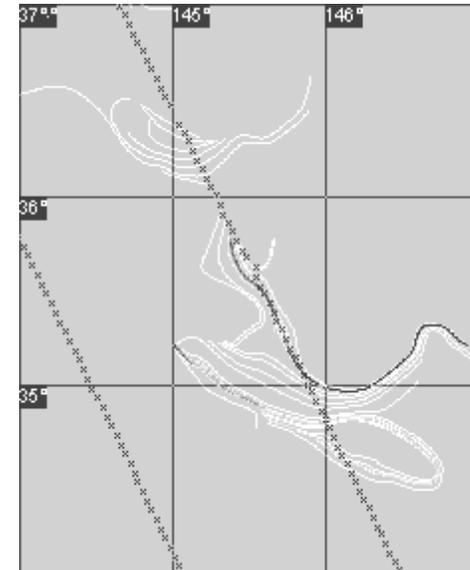
Примеры интегральных кривых на течении Курошио

Примеры расчета поправок к геоиду

Совпадение линии трассы с интегральной кривой



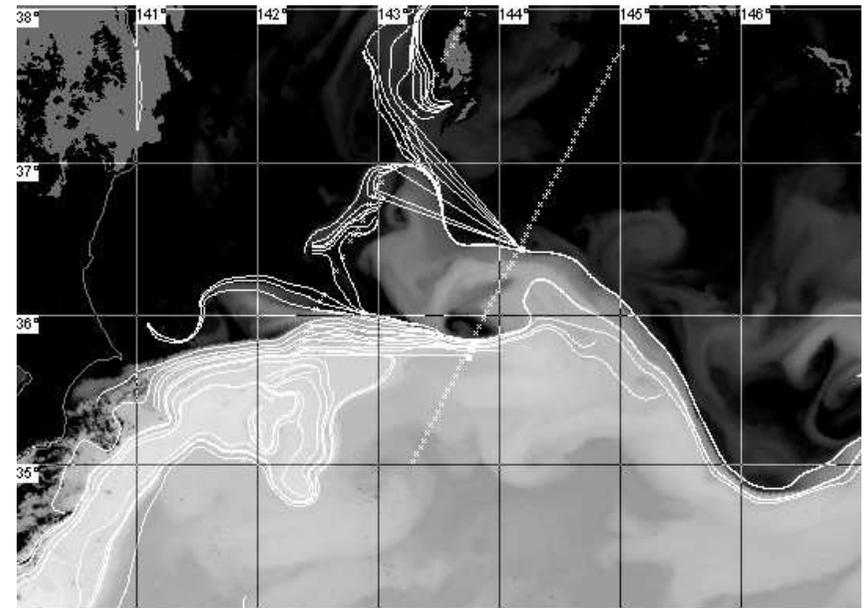
Аномалии ssh являются поправками к геоиду gh .
Абсолютные высоты (по AVISO) – крестики и аномалии с поправками. Среднее рассогласование высот- 4 см



Трассы альтиметров за 27.03.2004 и интегральные линии ДОТК

Комбинация интегральной линии с синоптическим подходом

Расчет основан на факте похожести профиля перепада уровенной поверхности поперек течения Куроисио. Для приведения соответствия двух профилей по пространству используется положение северной границы фронта и угол между линией трассы и фронта, берущиеся с карт интегральных кривых ДОТК.



Аномалии и восстановленная уровенная поверхность

Восстановление поправок одной трассы через знания поправок другой

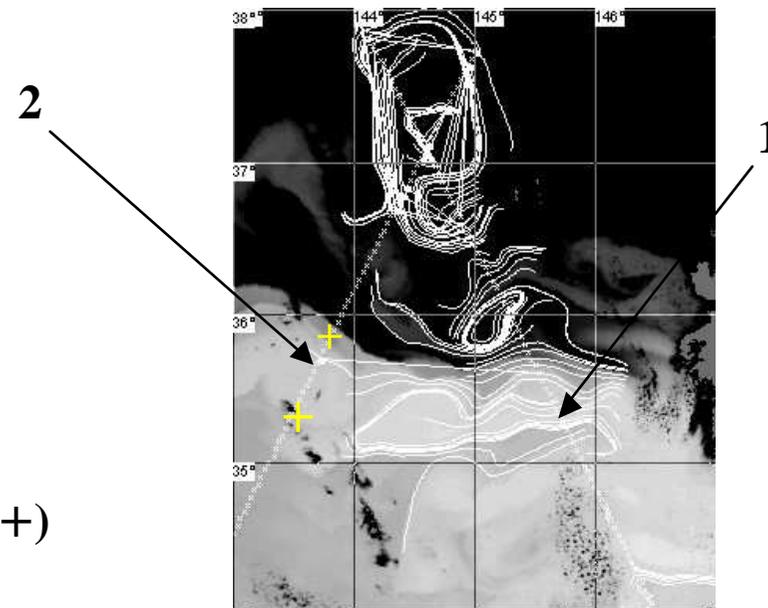
Зная поправки трассы 1,
можно рассчитать поправки трассы 2:

$$\text{ssh1} + \text{gh1} = \text{ssh2} + \text{gh2}$$

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

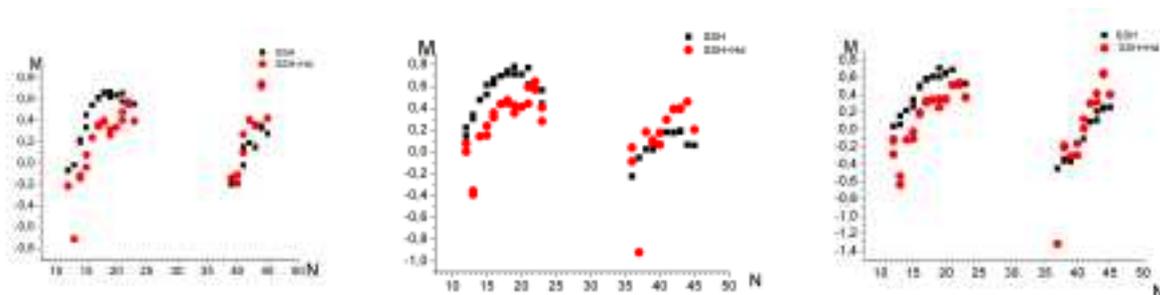
Сравнение с данными AVISO:

Перепад высот между точками трассы 2 (крестики +)
по аномалиям - 43см, с поправками 51 см,
данным AVISO - 57 см

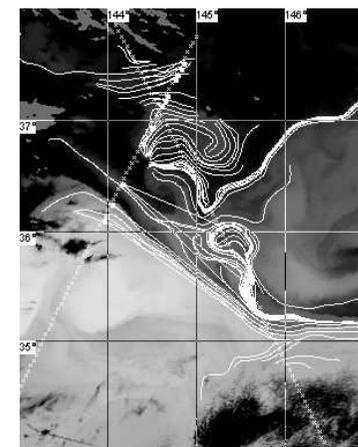


Трассы альтиметров за 09.03.2004
и полутоновое изображение

Решение системы уравнений с регуляризацией



Примеры восстановления поправок за различные даты.
Черный цвет - аномалии, красный - уровенная поверхность



Трассы альтиметров за 07.04.2004
и полутоновое изображение

Программно-техническое обеспечение для решения задачи

- √ 1. Архивы альтиметрических измерений за несколько лет
- √ 2. Архивы спутниковых изображений (полярно-орбитальных и геостационарных)
за несколько лет
- √ 3. Технология и средства массового расчета полей ТПО, ДОТК, интегральных
кривых в автоматическом режиме
- √ 4. Средства автоматического составления уравнений для расчета поправок к геоиду
- 5. и средства анализа и постановки задач расчета поправок
- 6. Средства автоматического выделения синоптических объектов:
 - √ – вихрей
 - фронтов.

Спасибо за внимание!

