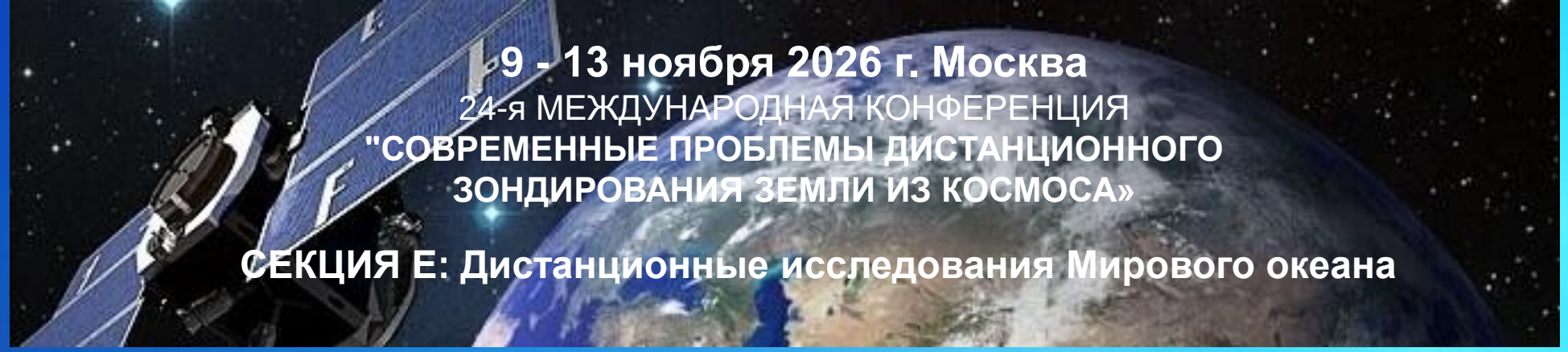


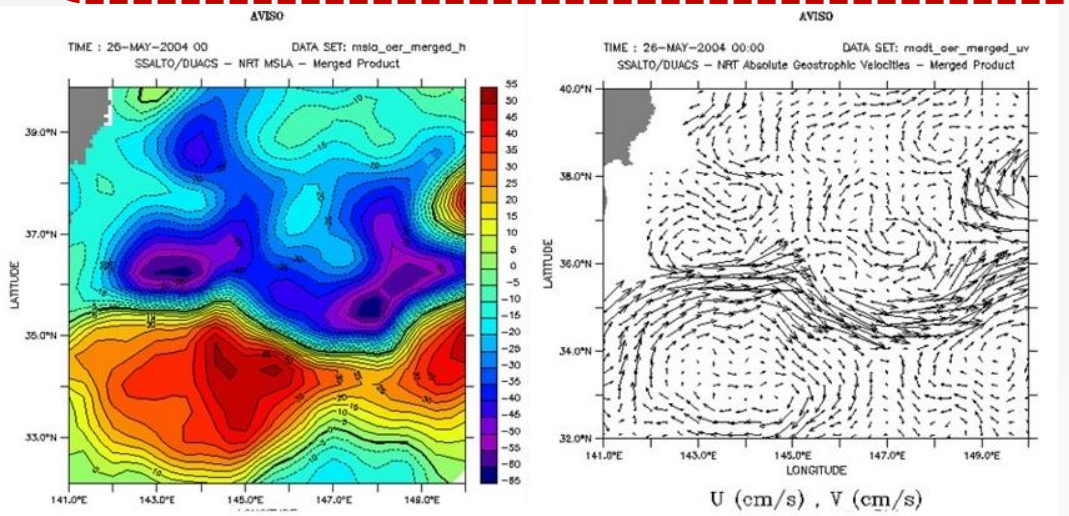
Синергизм спутниковых инфракрасных изображений океана и альтиметрических измерений при восстановлении уровенной поверхности океана

Александина М. Г. , Александин А.И., Карасев А. А.
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия
Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, 690950, Россия
e-mail: margeo@mail.ru

Существует 2 подхода к оценке скоростей течений поверхности океана по спутниковым данным

1. расчёт скорости течений по перепаду высоты динамической топографии* моря, которую измеряют спутниковые альтиметры

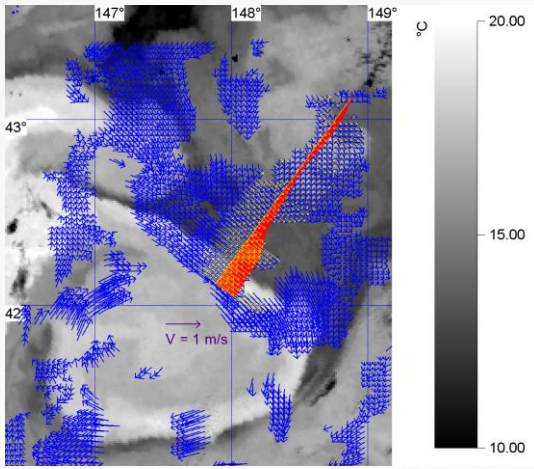
основной и общепринятый подход



Альтиметрия → Перепад уровенной поверхности → Скорости поверхностных течений

* Динамическая топография – отклонение реальной поверхности океана (уровня моря) от гравитационной поверхности геоида

2. прослеживание скорости перемещений оптических неоднородностей (морских маркеров) по временной последовательности спутниковых изображения в ИК (тепловом) и видимом диапазоне спектра**



Оценки скорости поверхностных течений, построенные спутниковым ИК-изображениям соответствуют переносу перемешанного слоя, а не течению тонкого слоя на поверхности моря. Поэтому компонента Экмановкого дрейфа составляет 1-3 см/сек и меньше точности расчета скорости.

****Алексанина М.Г., Загуменнов А.А., Шувалов Б.В. Оценка перепадов уровенной поверхности моря: скорости перемещений морских маркеров по ИК-изображениям в сравнении с данными спутниковой альтиметрии // Метеорология и гидрология. 2023. №1. С.43-53. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-1-43-53**

Пара ИК изображений с интервалом 6-12 часов → Прослеживание морских маркеров → Расчет априорной точности → Отбраковка по априорной точности → Скорости перемещений маркеров на поверхности моря

(*А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, А.Ю. Карнацкий. Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. №2. С.131-142.)

Сопоставление двух подходов*

Ранее было показано

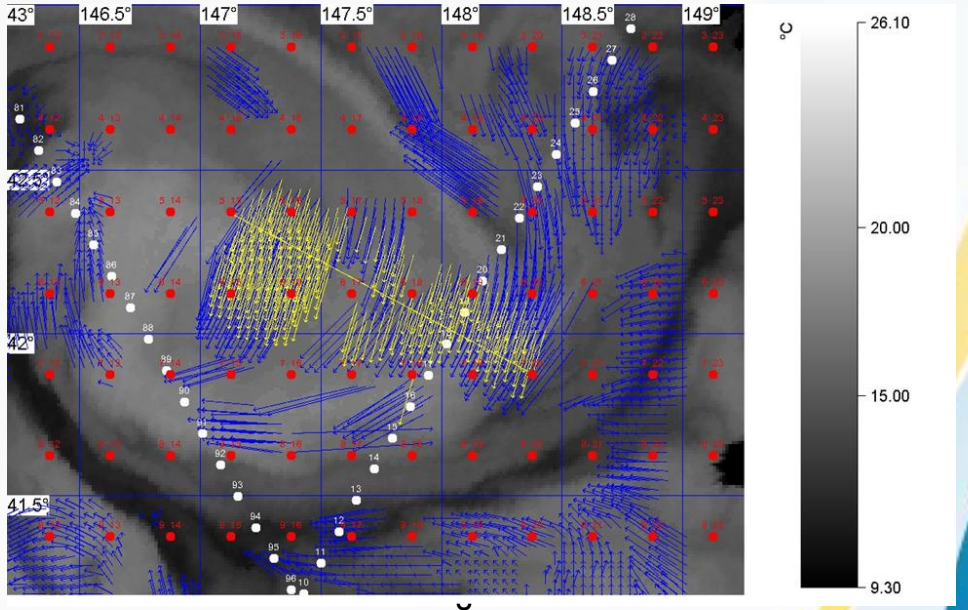
* Алексанина М.Г., Загуменнов А.А., Шувалов Б.В. Оценка перепадов уровенной поверхности моря: скорости перемещений морских маркеров по ИК-изображениям в сравнении с данными спутниковой альтиметрии // Метеорология и гидрология. 2023. №1. С.43-53. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-1-43-53



Расчёт перепада динамической топографии вдоль альтиметрических трасс по скоростям поверхностных течений спутниковых ИК-изображений показал хорошее соответствие двух типов измерений.

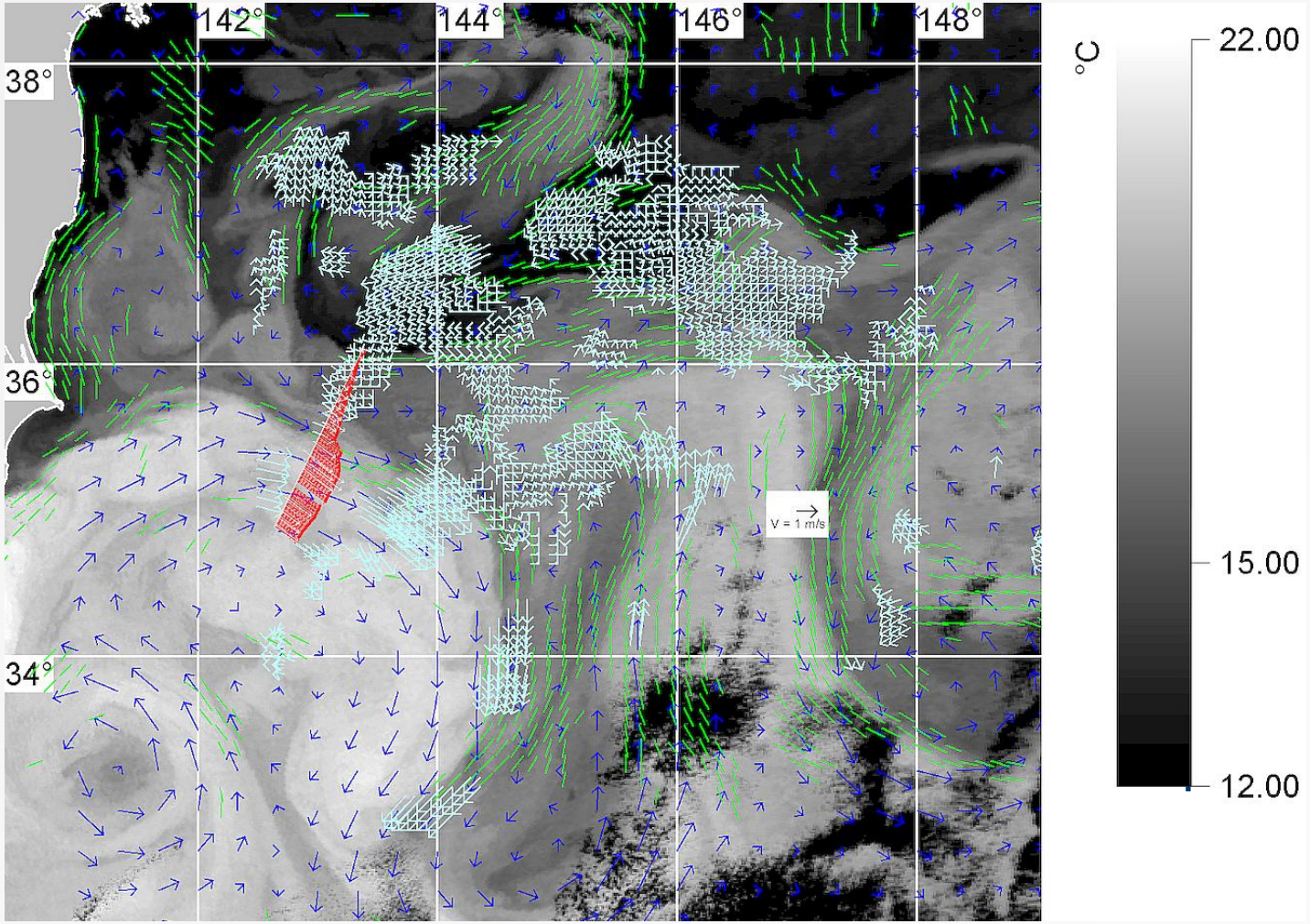
Недостаток спутниковых альтиметрических измерений — Редкость данных по пространству и времени. В результате методы аппроксимации генерируют значительные ошибки при пересчета на регулярную сетку.

Использование скоростей течений (Vmm), строящихся по последовательности изображений, показывает, что в пространстве между трассами альтиметрических спутников ошибки аппроксимации альтиметрических измерений остаются высокими.



Пример некорректной аппроксимации ринга Куросио (м): Реальный перепад высот около 1.16м, по альтиметру – 0.31м

Постановка задачи: аппроксимация альтиметрических данных в межтрассовом пространстве по спутниковым ИК данным -



Спутниковое ИК- изображение за 4 мая 2006 года , район геострофического течения Куросио, показано соответствие скоростей течений по спутниковой альтиметрии скоростям перемещений ММАТ и ДОТК.

псевдо-линиям тока, строящимся по доминантным ориентациям термических контрастов (ДОТК), которые строятся по спутниковым ИК-изображениям;

И скоростям поверхностных течений, которые строятся по последовательности ИК-изображений

Учесть специфику течений и уточнить интерполяцию измерений альтиметра между трассами смогут перепады, оценённые по скоростям течений, рассчитанным методом ММАТ.

Ранее было показано*, что:

1- Оценка перепада ДТ, рассчитанная по скоростям ММАТ хорошо согласуется с оценкой перепад ДТ, рассчитанной по данным спутниковой альтиметрии, вдоль трасс альтиметра.

2- Оценка перепада по скоростям (ММАТ) в узлах регулярной сетки выше оценки по спутниковой альтиметрии.

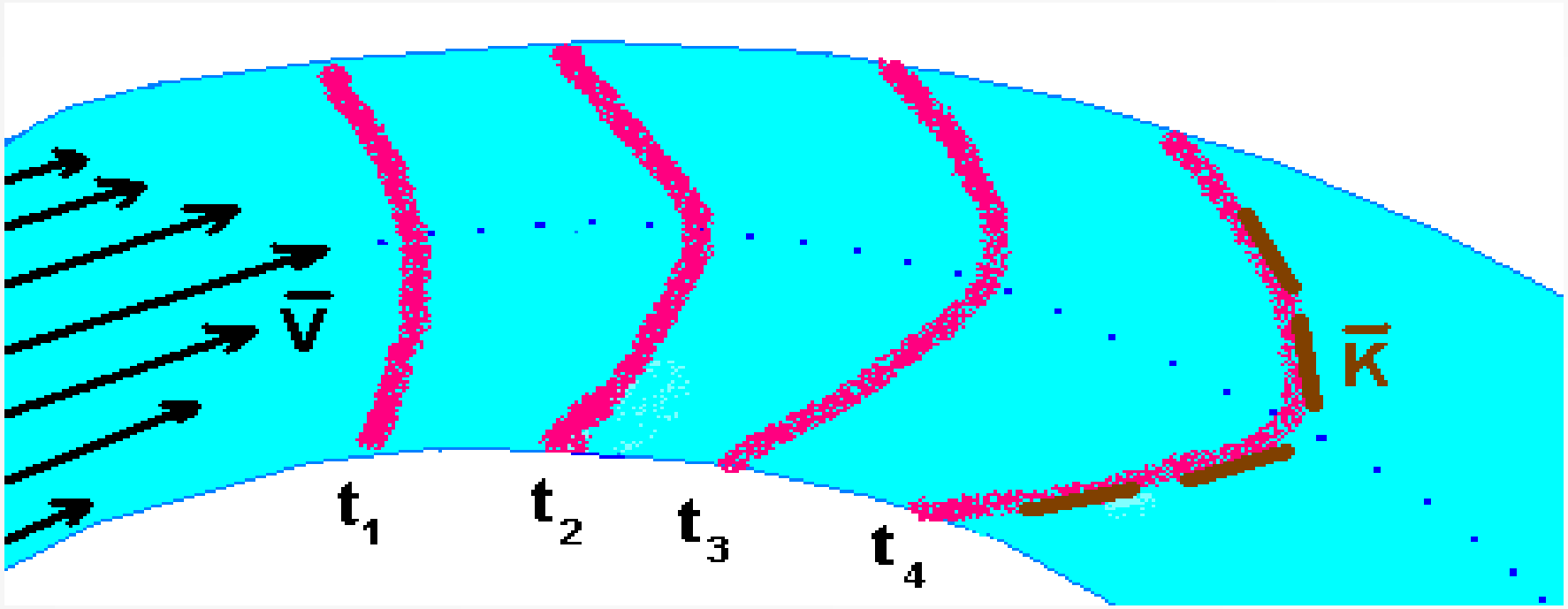
3 - Интерполяция измерений спутниковой альтиметрии в узлах регулярной сетки между трассами значения перепада ДТ занижает.

*Алексанина М.Г., Загуменнов А.А., Шувалов Б.В. Оценка перепадов уровенной поверхности моря: скорости перемещений морских маркеров по ИК-изображениям в сравнении с данными спутниковой альтиметрии // Метеорология и гидрология. 2023. №1. С.43-53. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-1-43-53

ДОТК – статистически значимые касательные к изотермам в заданной окрестности.

Коэффициент корреляции ДОТК и направлений скоростей поверхностных течений более 0.9

Причина: пространственная структура ТПО определяется сдвиговым характером течений



Конкретный вид термической структуры определяется сдвиговым характером течений - изменчивостью скорости поперек потока. Это приводит к вытягиванию термических контрастов вдоль потока.

ДОТК* – доминантные ориентации термических контрастов *

Поле яркости

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

↓

Поле градиентов яркости

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

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

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

↓

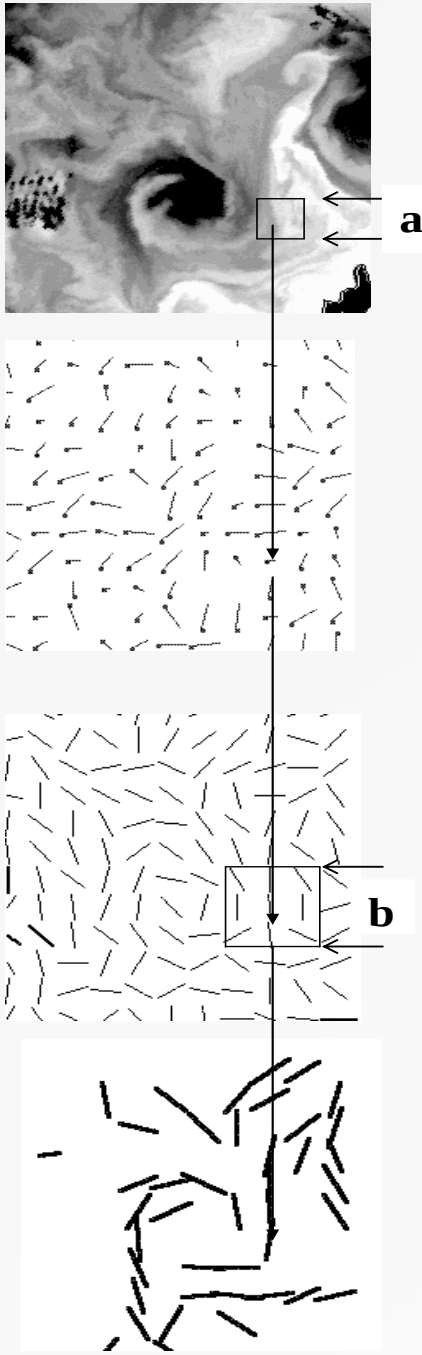
Поле ориентаций контрастов

$\{K_{ij} e^{i\theta_{ij}}\}$,
$\theta_{ij} = \varphi_{ij} - \pi/2$:
$\theta_{ij} \in [0, +\pi]$

↓

Поле доминантных ориентаций контрастов

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



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

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

*Алексанина М.Г. «Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA» («Исследование Земли из космоса», 1997, № 3, с. 44–51)

Оценка доминантной ориентации термического контраста (ДОТК)

$$\theta^*_{mn}: \ \Sigma \Delta\theta_{ij} \to \min,$$

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

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

Для оценки статистической значимости ДОТК

используется неравенство Маркова

(ε –допустимая мера разброса).

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

Из требования удовлетворения точности ε с вероятностью P^*

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

получаем условие выделения ДОТК

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

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

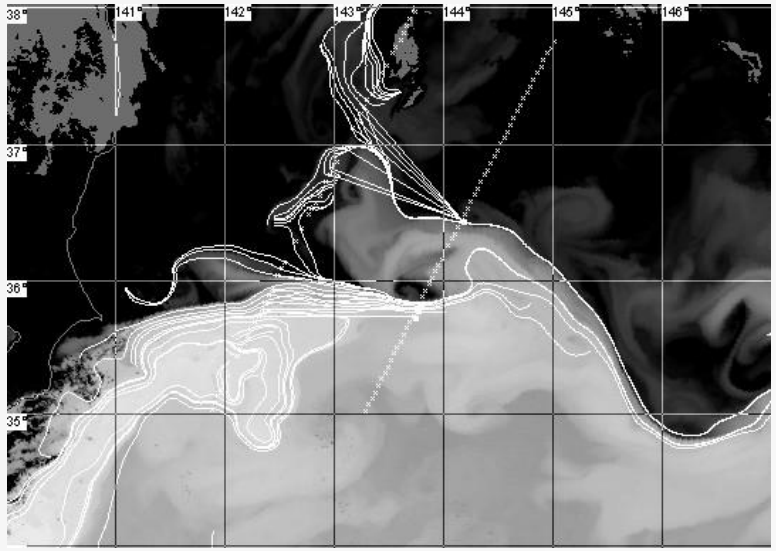
Параметры работы метода.

$\varepsilon = \pi/4$, a=7км, b=15км

Решение задачи:

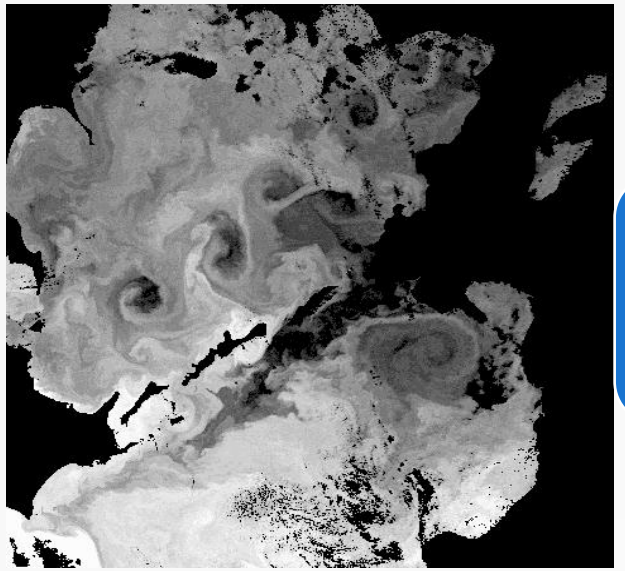
Интегральные линии тока (псевдолинии тока) по ДОТК– путь к сопряжению спутниковых ИК и альтиметрических измерений

Пример интегральных линий ДОТК (*доминантные ориентации термических контрастов - квазиизотермы*)

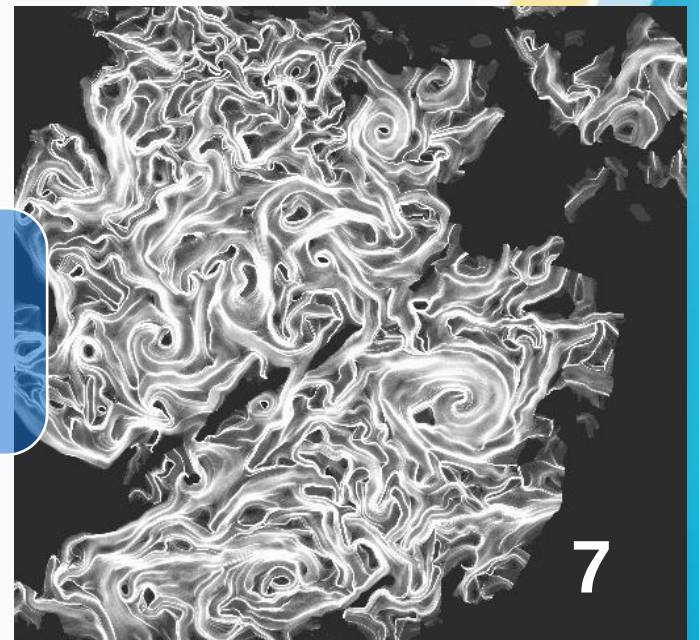


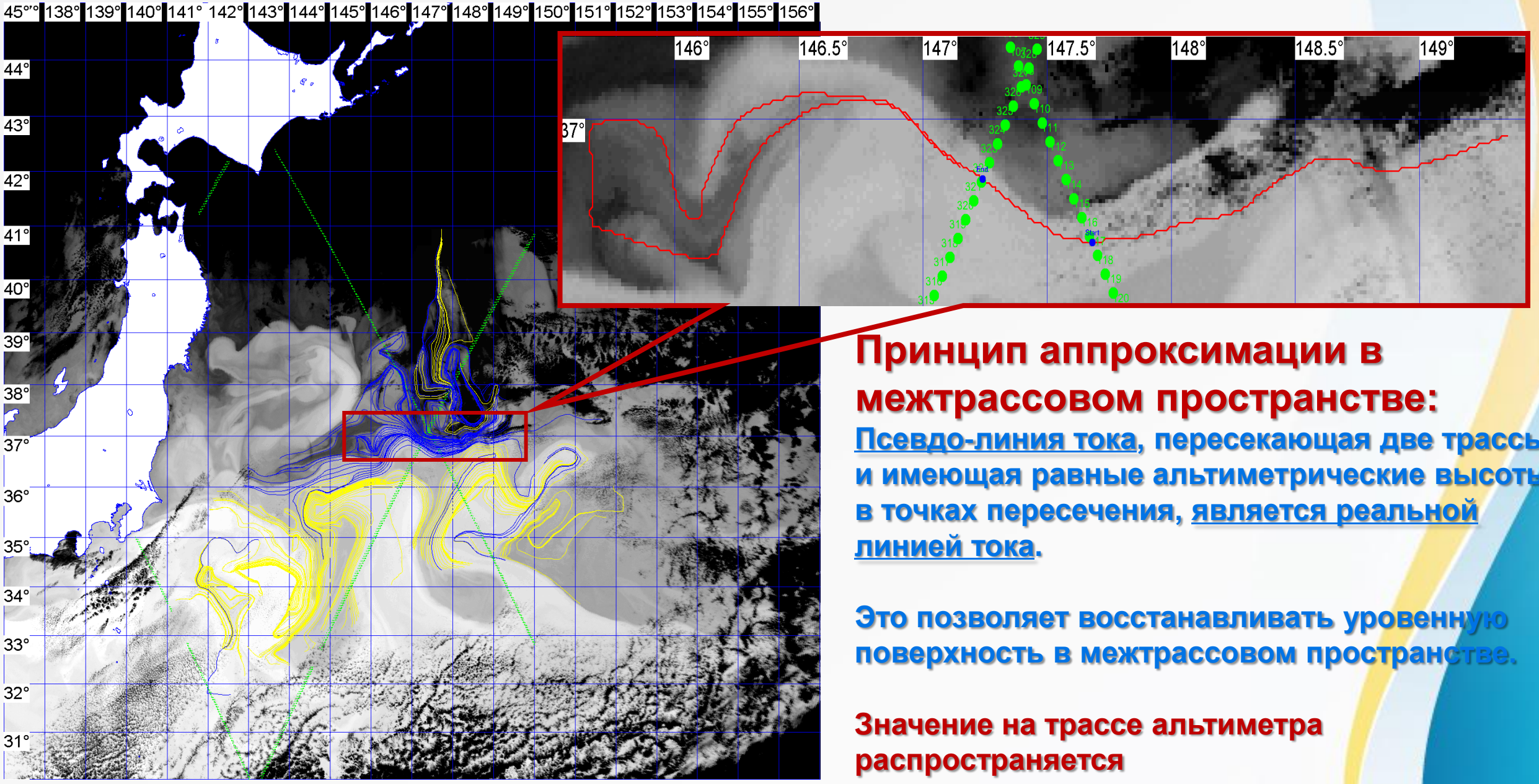
Линии тока по ДОТК можно использовать для аппроксимации на сетку редких и нерегулярных как альтиметрических измерений

Полутоновое ИК-изображение Охотского моря и плотности интегральных линий ДОТК



Изображение → ДОТК → Линии тока (*интеграл от ДОТК*)





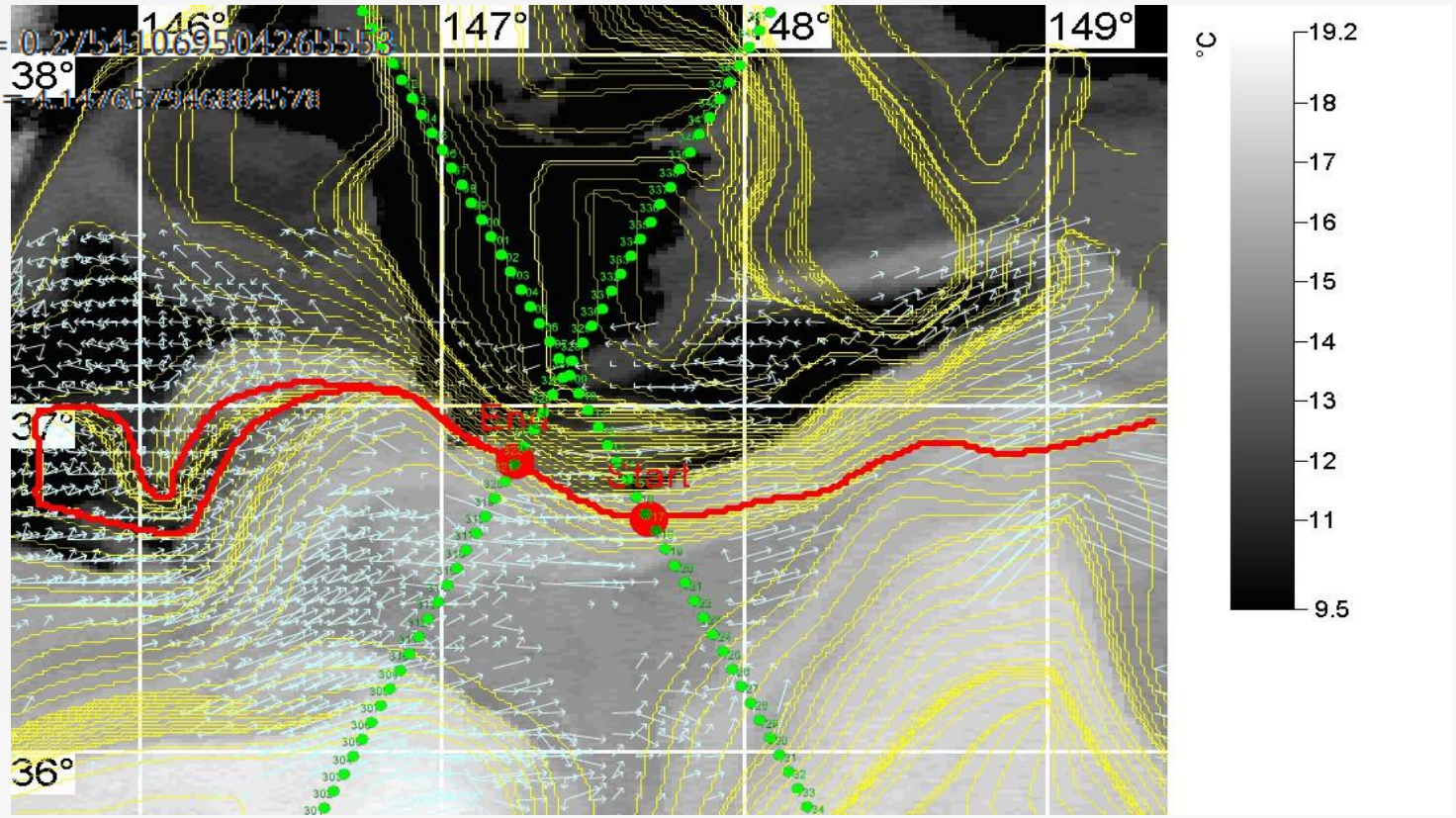
Принцип аппроксимации в межтрассовом пространстве:

Псевдо-линия тока, пересекающая две трассы и имеющая равные альтиметрические высоты в точках пересечения, является реальной линией тока.

Это позволяет восстанавливать уровенную поверхность в межтрассовом пространстве.

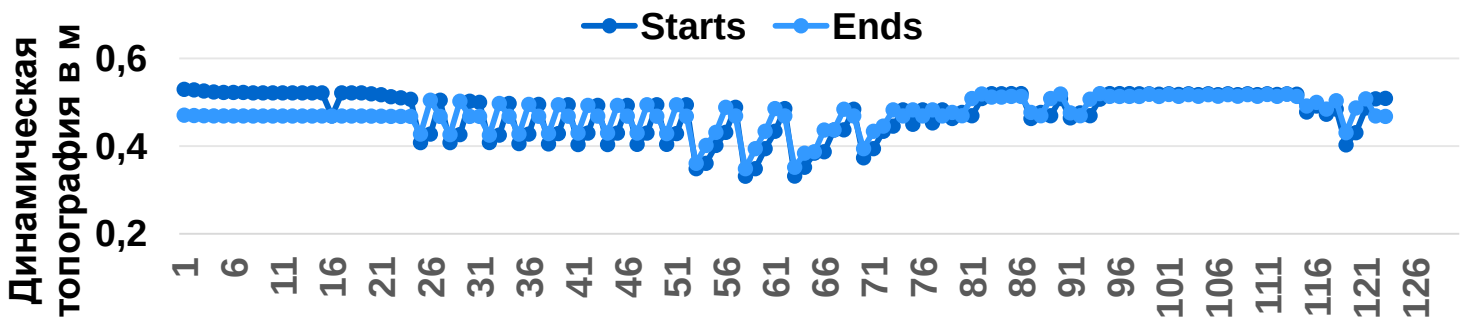
Значение на трассе альтиметра распространяется в пространстве по линии тока, пересекающей 2 трассы альтиметра.

Доказательство: линии тока – линии одного уровня перепада ДТ



Спутниковое изображение AVHRR/NOAA за 4 мая 2006 года.
Зеленые линии – треки альтиметрических спутников.
Желтые линии – это построенные по ДОТК линии псевдо-тока.
Красная линия одна из линий тока, на которой показаны пересечения с треками альтиметрических спутников.

График показывает значение динамической топографии (высоты) в начальной точке пересечений и в конечной



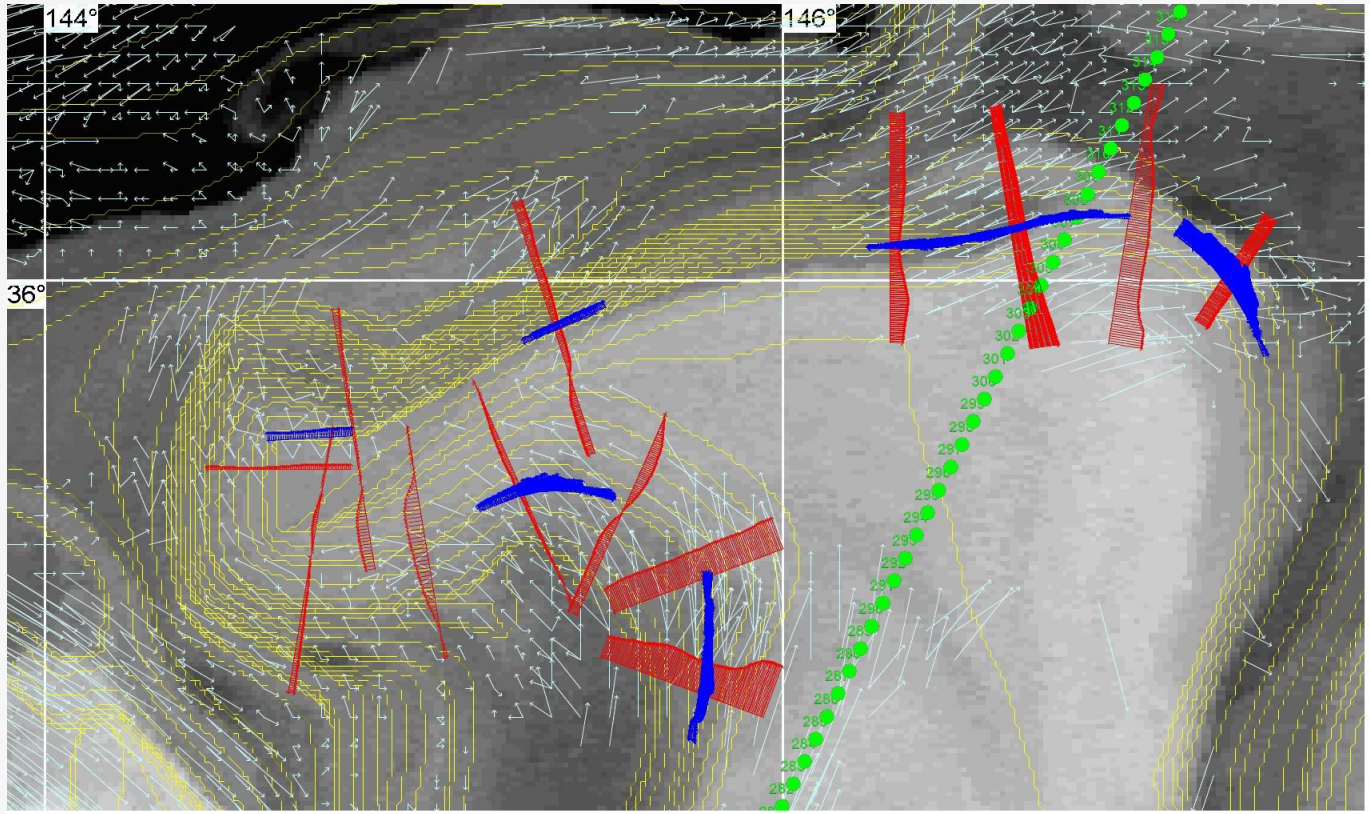
№ пары точек пересечения линии тока с одной альтиметрической трассы до пересечения линии тока с другой т

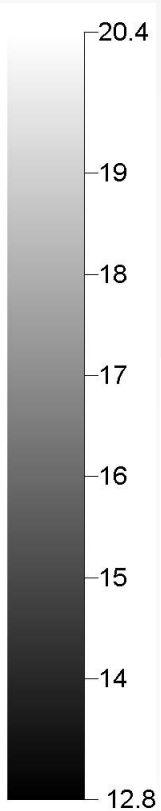
Среднее значение разностей составляет 0,0027м, что близко к нулю. Это позволяет заключить, **что псевдо-линии тока,** построенные по полю ДОТК на основе одиночных карт ТПО соответствуют изолиниям динамической топографии, т.е. **являются реальными линиями тока.**

Полученная оценка точности 0,04 м согласуется с типичной точностью альтиметрических измерений (0,02-0,04 см) и с теоретическими оценками погрешности метода.

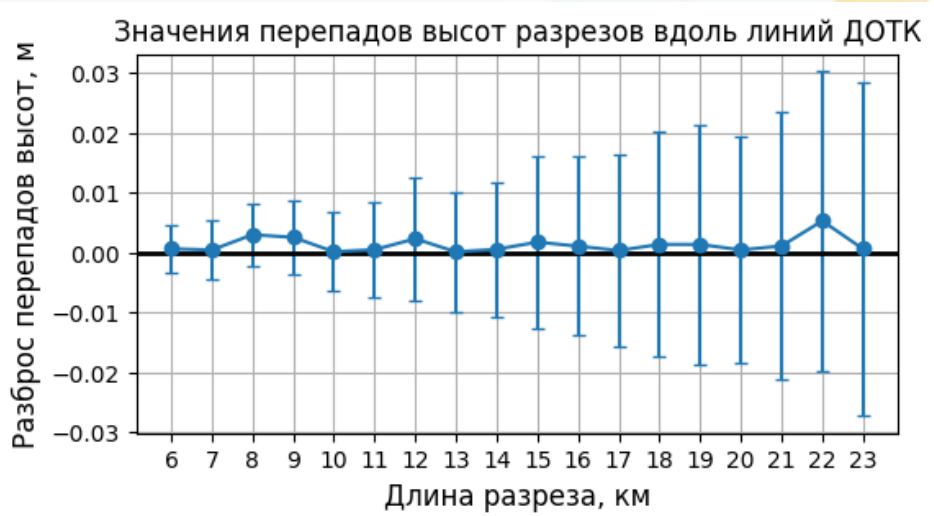
Линии тока по ДОТК – реальные линии высоты ДТ

Перепады высот (ДТ) поперек и вдоль линий тока, рассчитанные по скоростям течений - Vmm





Примеры расчетов высоты уровенной поверхности по скоростям течений -Vmm: красные - поперек псевдо-линии тока (тангенциальная компонента скорости), синие – вдоль линии (нормальная компонента).



Перепады динамической высоты, восстановленный путем интегрирования поля скоростей перемещений вдоль псевдо-линии тока, многократно меньше результатов интегрирования поперек линии.

То есть псевдо-линии тока близки к реальным линиям тока и соответствуют теоретическим представлениям о геострофическом балансе.

Скорость течения, направленная вдоль линий тока, пропорциональна градиенту динамической высоты в поперечном направлении.

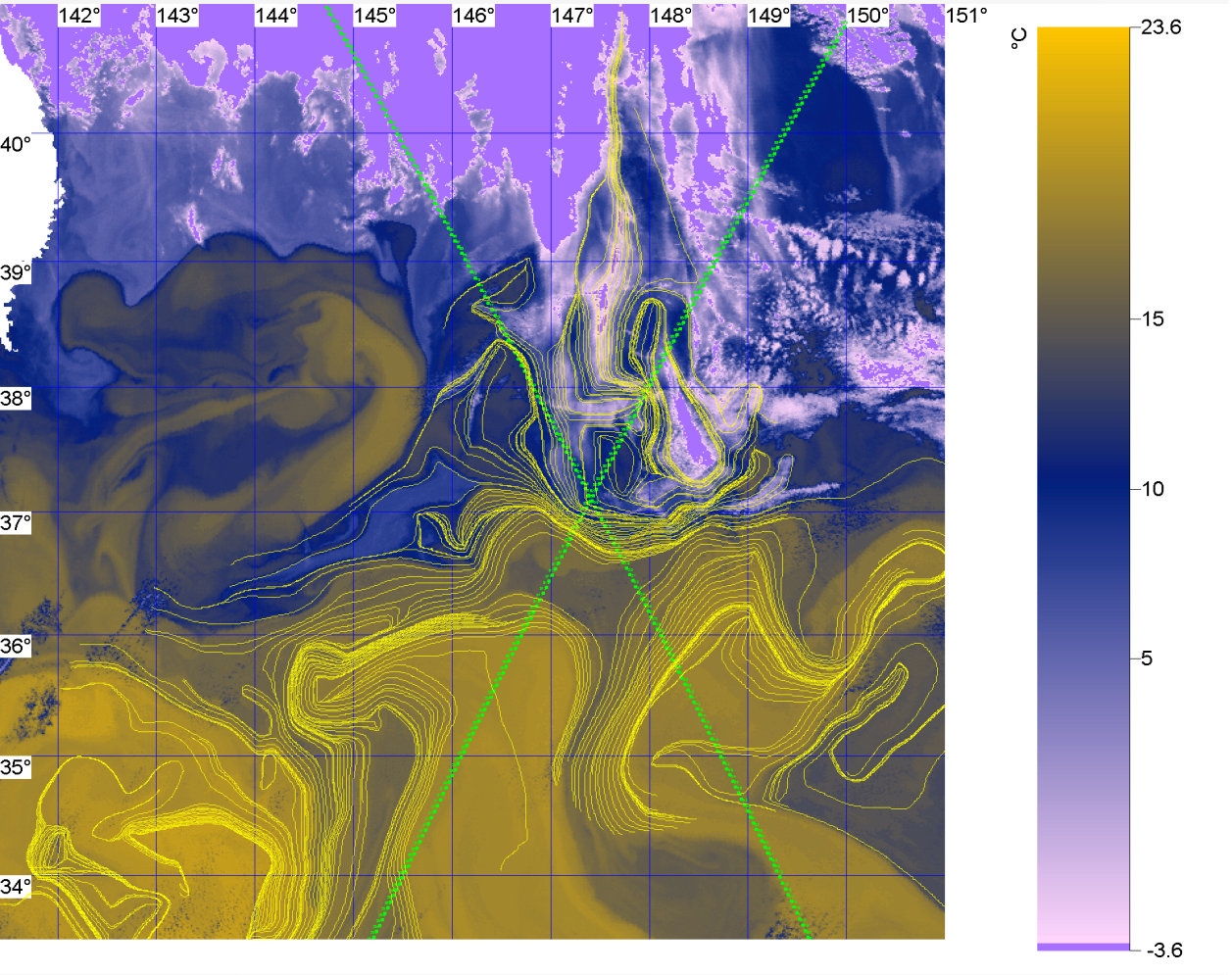
В ходе выполнения эксперимента было обработано 784 псевдо-линий тока и около 32000 разрезов.

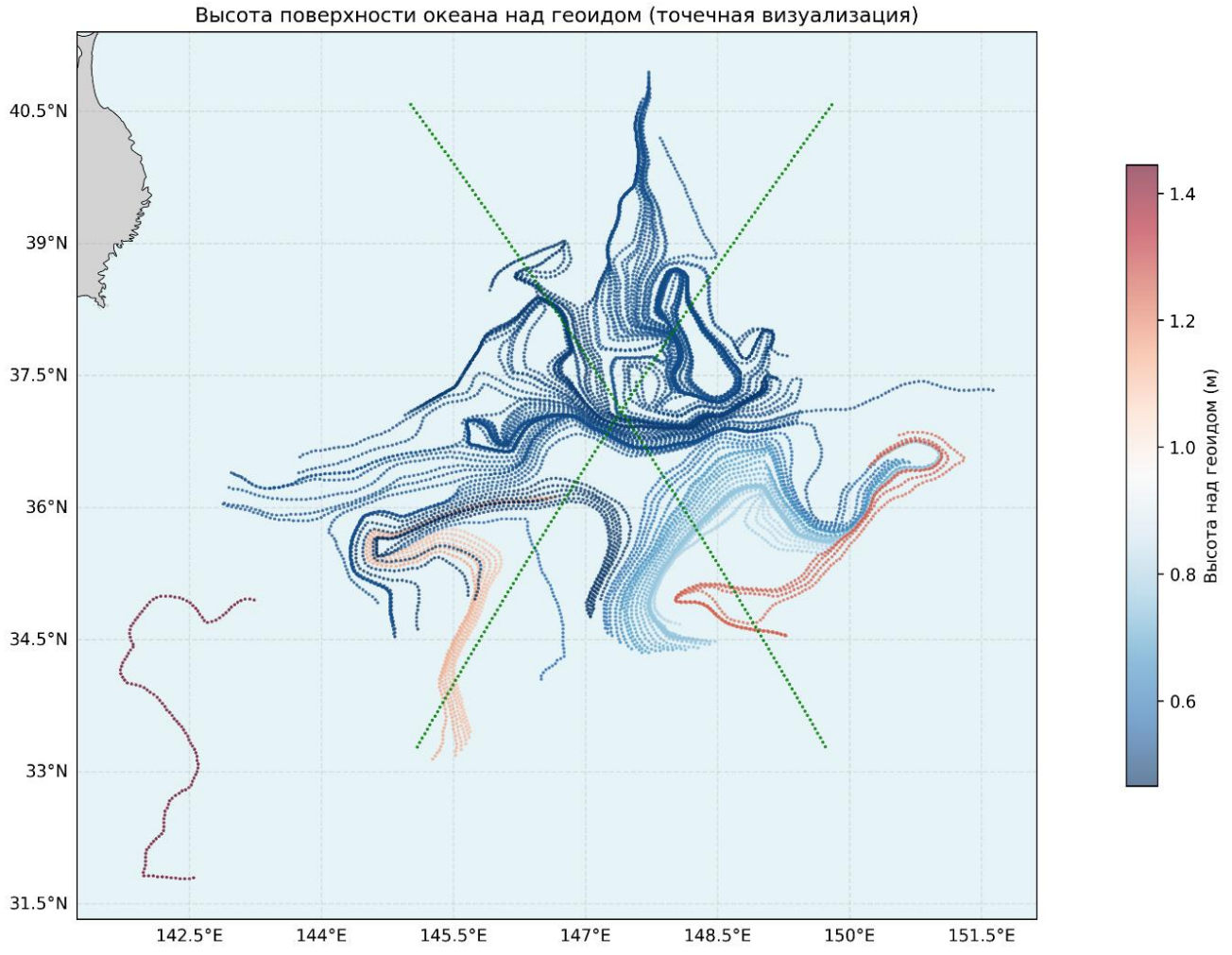
Среднее значение перепадов высот вдоль линий тока для всех интервалов длин составило 0,00258м.

Т.Е. перепад динамической высоты вдоль линий тока остается постоянным независимо от длины разреза и близок к нулю.

Синергизм:

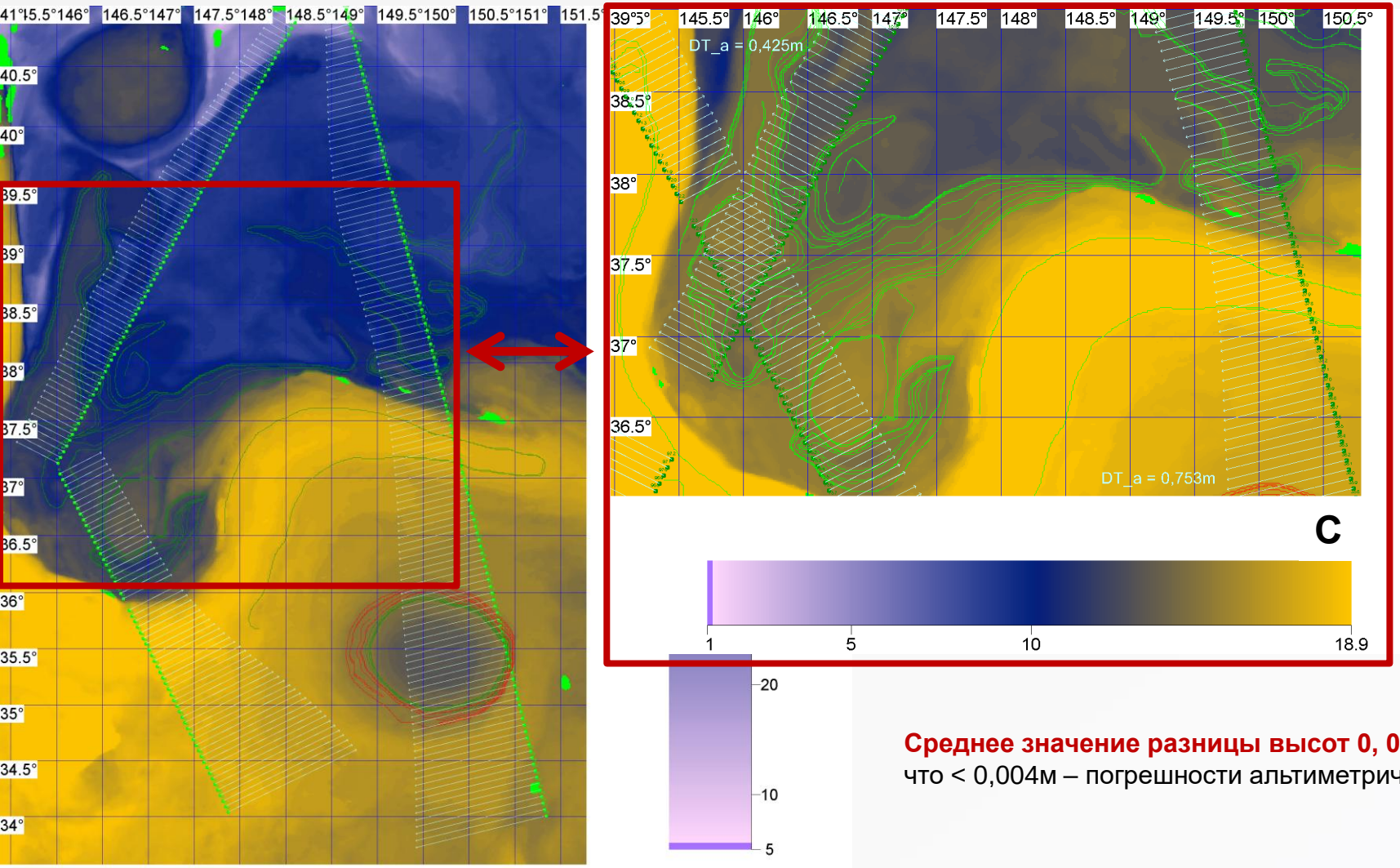
линии тока по ИК данным + скорости течений Vmm + измерения альтиметров => восстановление абсолютной уровенной поверхности (динамической топографии)

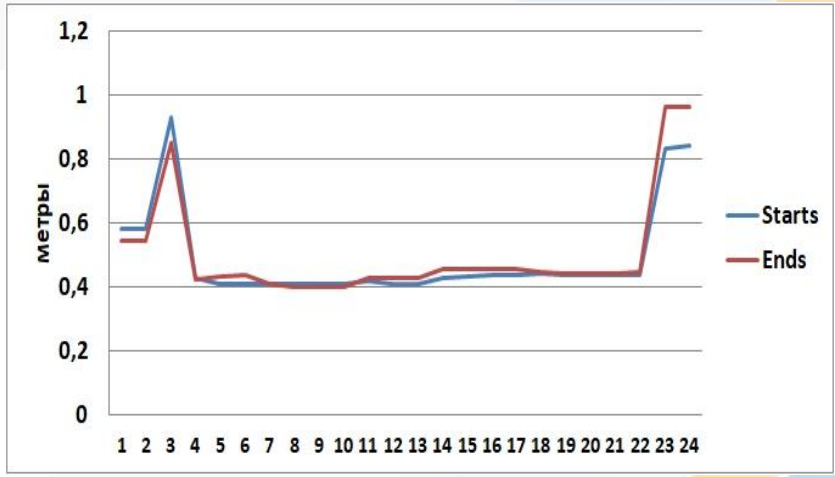


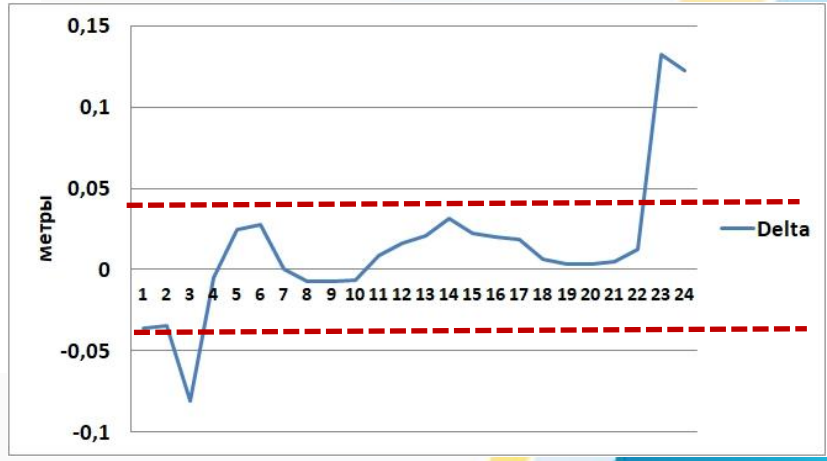


2023-04-27

Результаты на композиционной (всепогодной) карты ТПО (2024-05-03_05) с использованием пассивных микроволновых данных







Среднее значение разницы высот 0, 0125 м,
что < 0,004м – погрешности альтиметрических данных

Заключение

1. Предложена методика восполнения уровенной поверхности в межтрассовом пространстве альтиметрических спутников.
2. Методика основана на использовании псевдо-линий тока, которые строятся по картам ДОТК (доминантным ориентациям термических контрастов).
3. Также для восполнения уровенной поверхности в межтрассовом пространстве предлагается использовать карты скоростей поверхностных течений, которые стоятся по последовательности спутниковых ИК-изображений.
4. Развитие методики предполагает применение всепогодных карт ТПО, строящихся с с использованием пассивных микроволновых измерений.
5. Для восстановления уровенной поверхности вихрей в межтрассовом пространстве предполагается использовать имеющуюся технологию автоматического выделения вихрей синоптического масштаба по последовательности спутниковых композиционных карт ТПО с расчетом их геометрии и зон максимальных скоростей*

- Представленный подход - распространение измерений ДТ спутниковых альтиметров по линиям тока ДОТК с ИК изображений - является перспективным для восстановления высоты динамической топографии поверхности океана.
- Требуются дополнительные исследования для уточнения условий достоверности и надежности использования псевдо-линий тока за пределы альтиметрических трасс.

**Алексанин А.И., Загумённов А.А. Проблемы автоматического обнаружения вихрей океана по спутниковым ИК-изображениям // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С.65-74.*