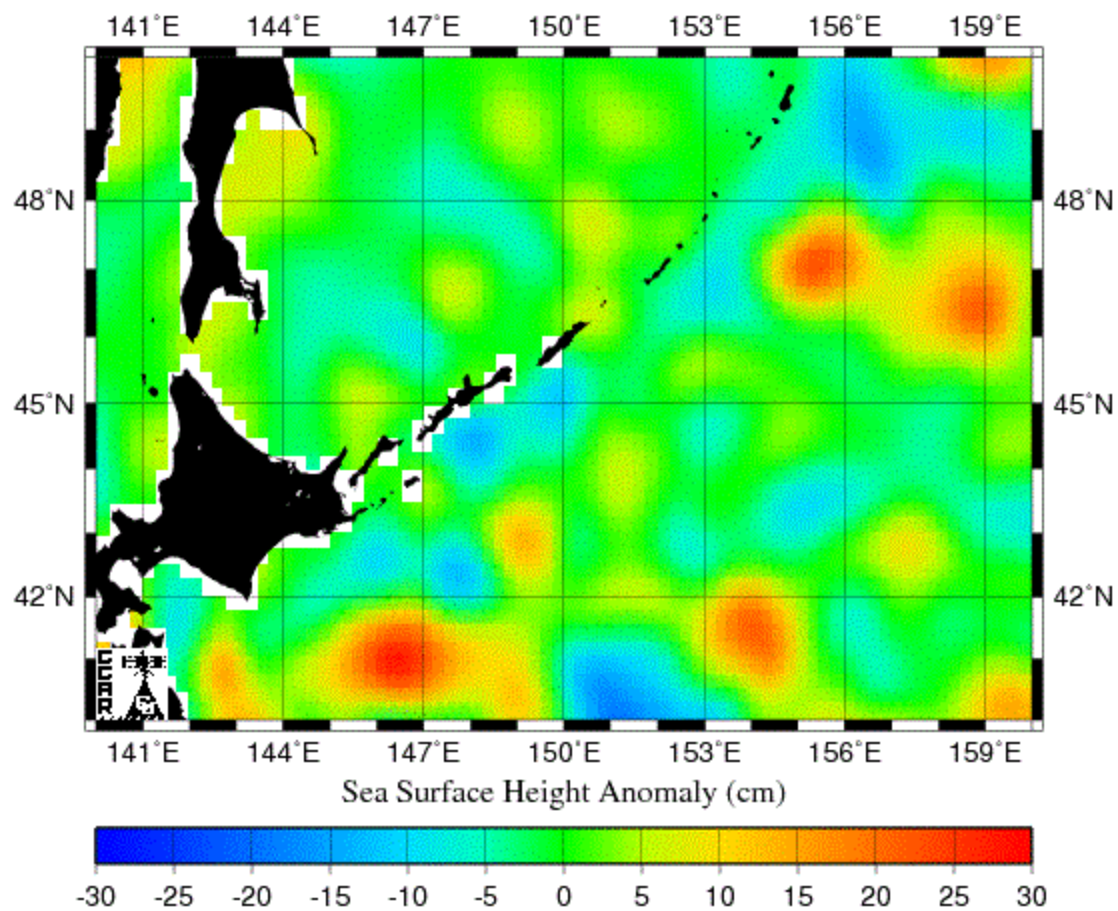




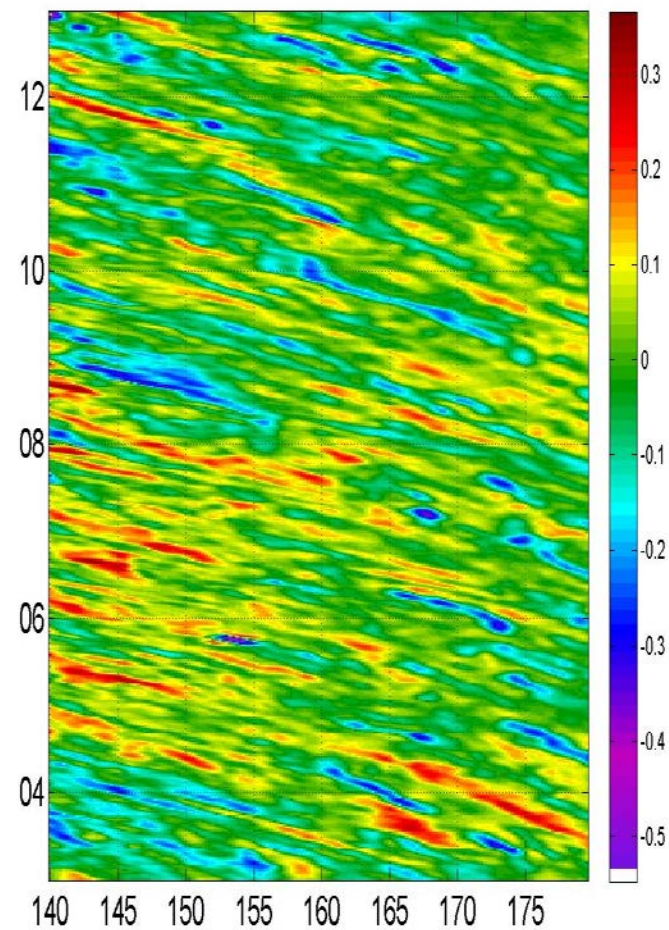
Оценка нелинейности в изменчивости уровня океана по данным спутниковой альтиметрии

Т.В. Белоненко, Н.В. Сандалюк

Historical Mesoscale Altimetry - Dec 20, 2003

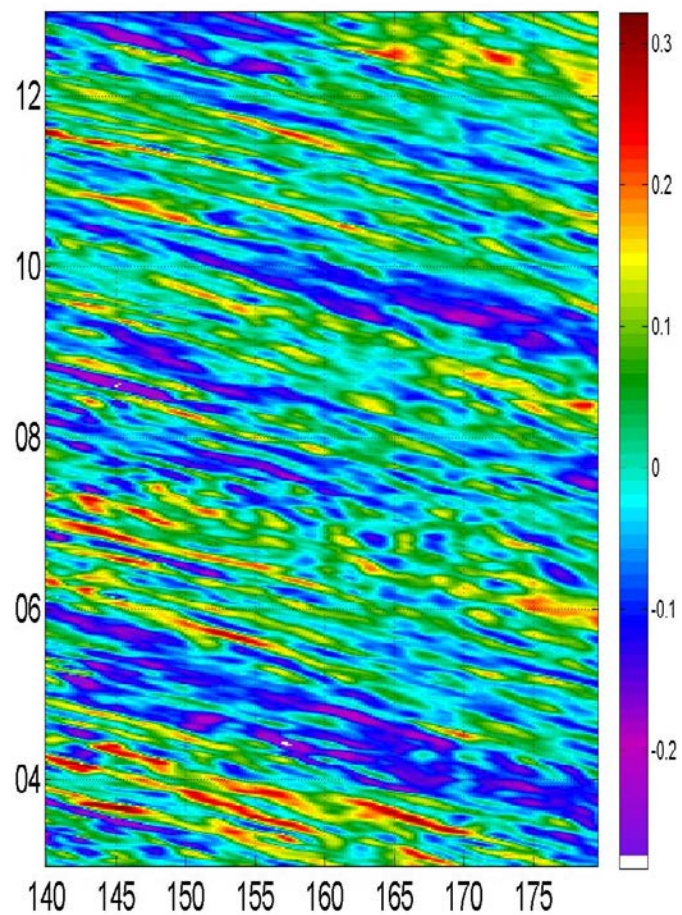


ADT Pacific_North_filtseas. Y(30)

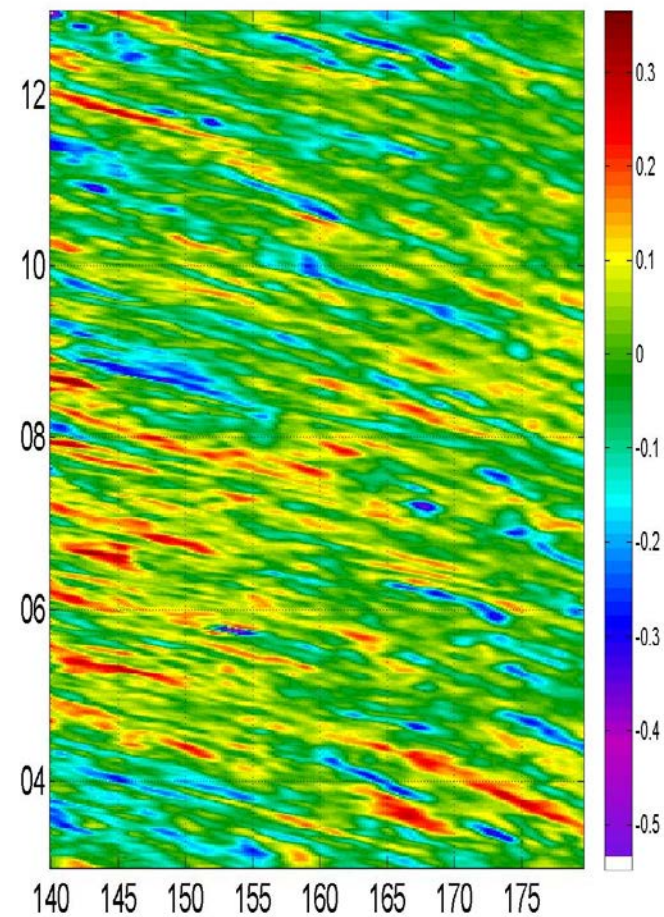


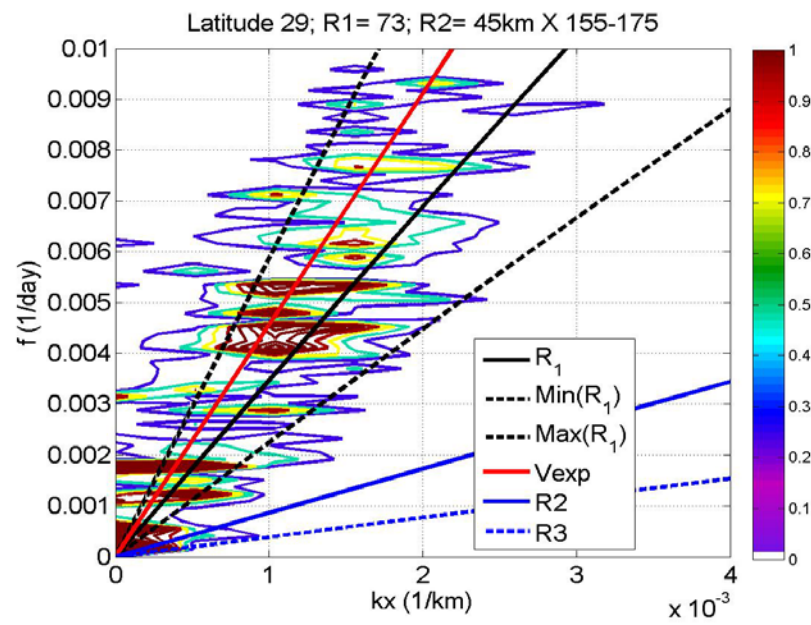
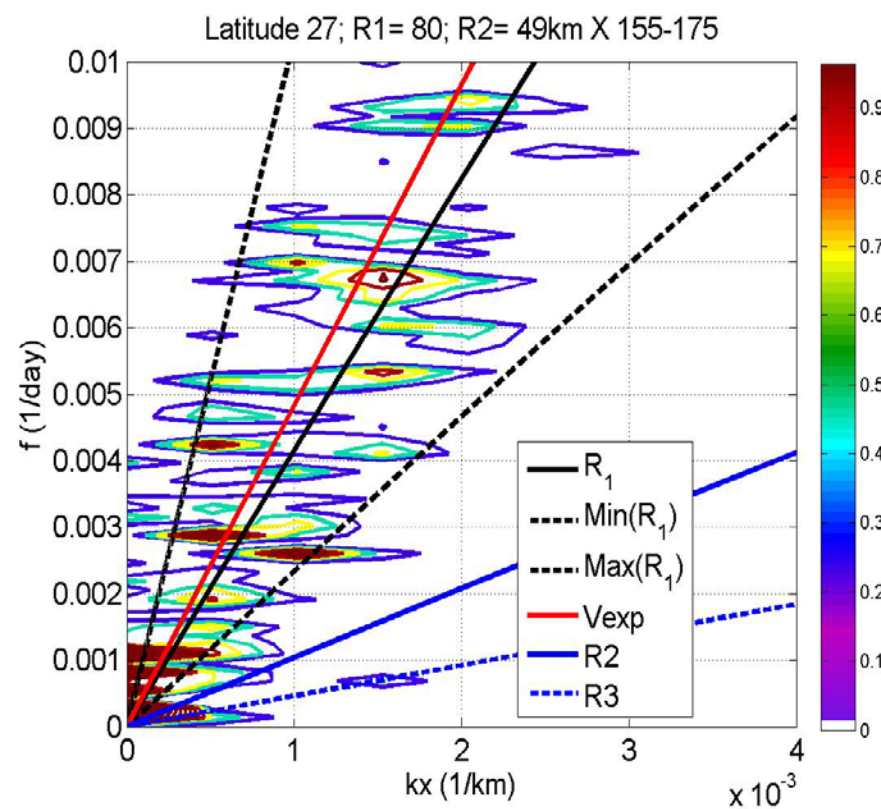
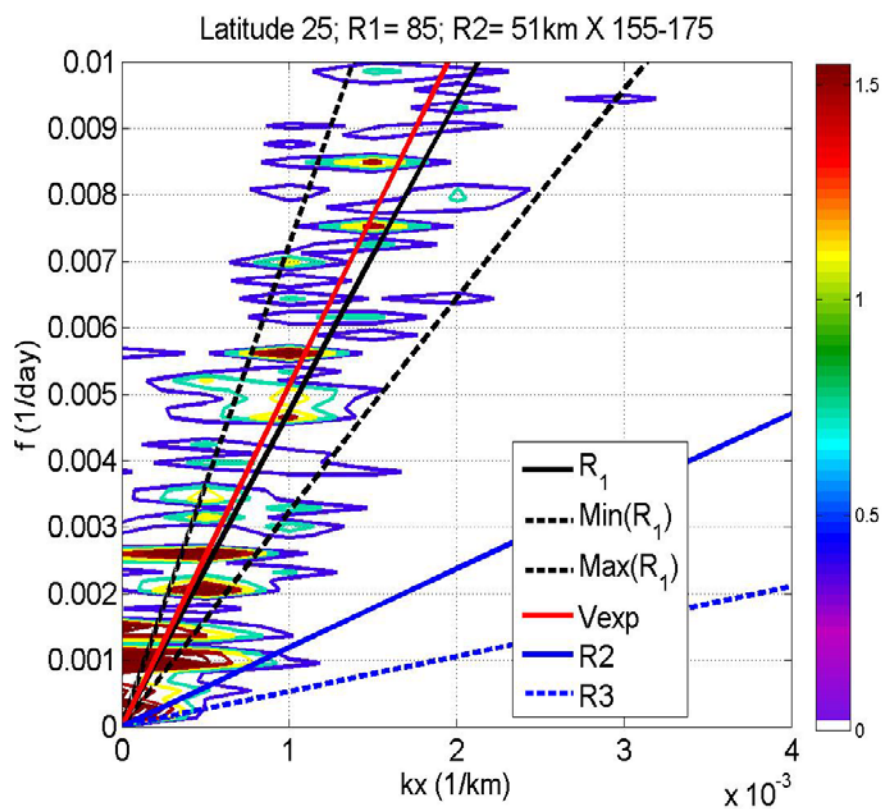
Примеры зональных пространственно-временных разрезов уровня океана по данным AVISO

ADT Pacific_North_Iltseas. Y(25)



ADT Pacific_North_Iltseas. Y(30)





2D-FFT аномалий уровня Фазовые скорости волн Россби:

- **эмпирическая, рассчитанная по преобразованию Радона** (красная сплошная линия);
- **теоретические** (черная сплошная линия);
- **второй бароклинной моды** (синяя сплошная линия).

Методы идентификации синоптических вихрей по спутниковым данным

Физические

- Оценка характеристик динамических полей:
значения SLA, относительной завихренности, параметра Окубо-Вейса
- Вихри - замкнутые контуры с пороговыми значениями

Геометрические

используют кривизну или форму поля мгновенного потока, например, метод блуждающего угла (winding-angle) или метод векторной геометрии

Данные

Спутниковые данные SLA - массив значений аномалий уровня моря COPERNICUS MARINE ENVIRONMENT MONITORING SERVICE

- Средний уровень океана за 21 год
- Пространственное разрешение 0,25°
- Диапазон данных 01/01/1993 - 22/04/2015

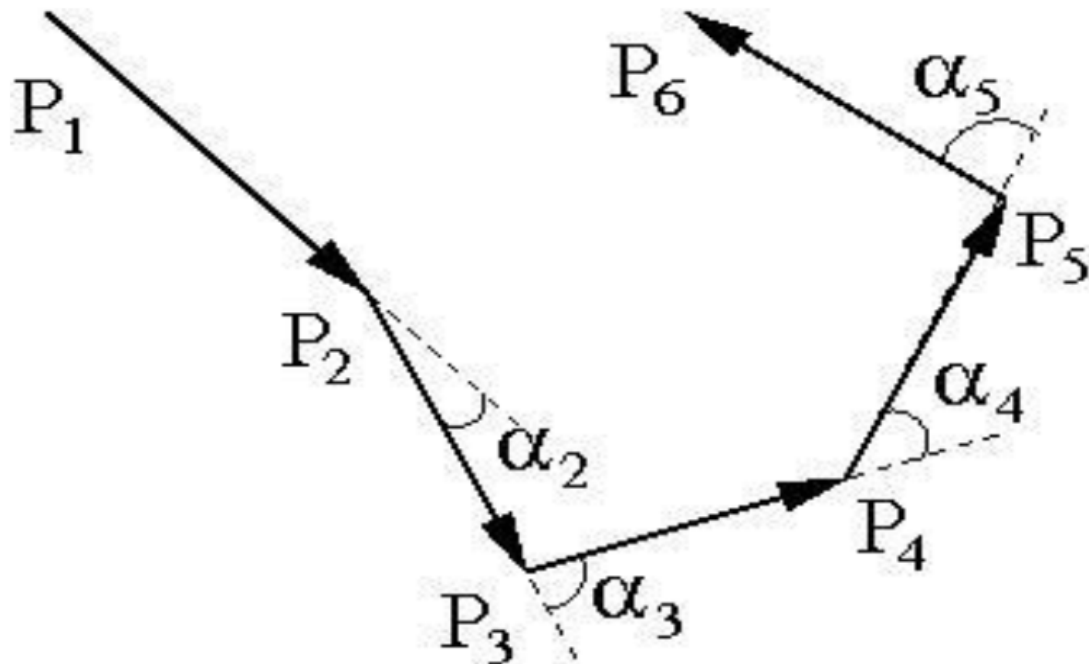


Figure 2. Winding-angle (WA) method for a segmented streamline.

Quantification and characterization of mesoscale eddies with different automatic identification algorithms

Bert Viikmäe† and Tomas Torsvik†

† Institute of Cybnetics, Tallinn
University of Technology
Akadeemia tee 21, 12618 Tallinn, Estonia
bert@ioc.ee; tomas.torsvik@ioc.ee

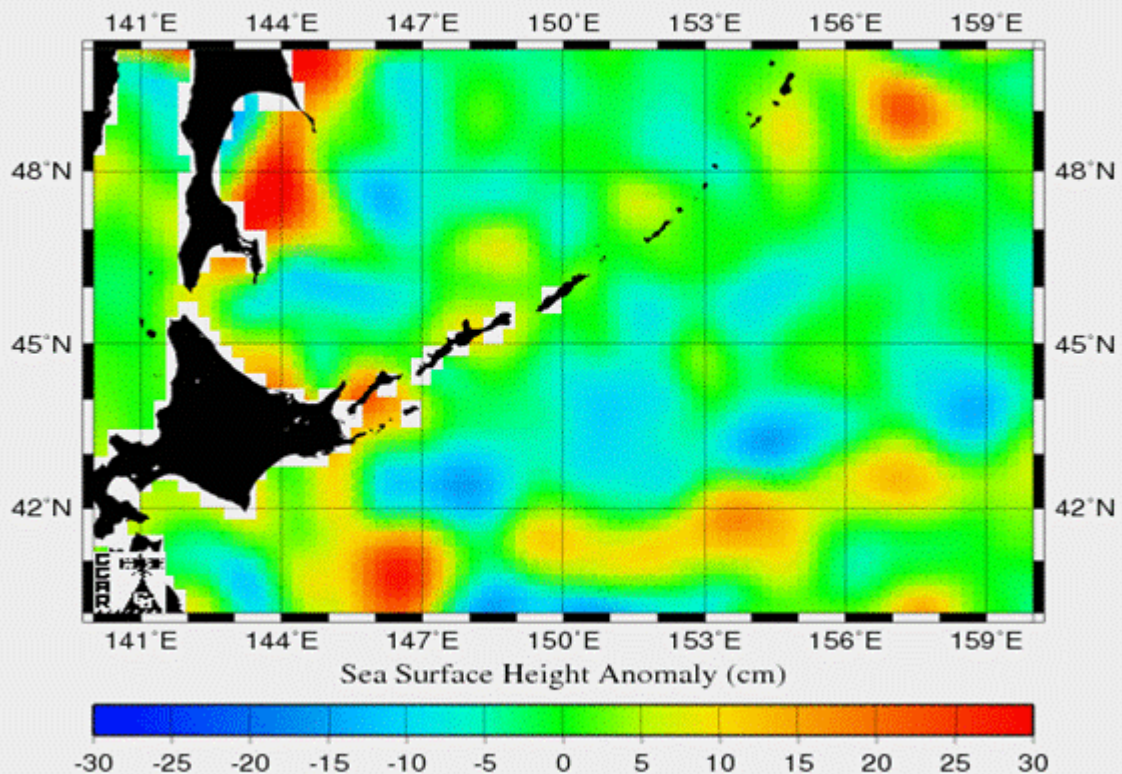


Метод блуждающего угла *Winding-angle method*

Алгоритм, примененный в данном исследовании, основан на выделении самого дальнего от центра замкнутого контура в поле аномалий уровня. Значение уровня (SSH) на всех пикселях выше (ниже) заданного порога для антициклонических (циклонических) вихрей.

Выделенный регион содержит не менее восьми 8 пикселей и не более 1000 пикселей. Выделенный вихрь содержит как минимум один локальный максимум (минимум) уровня моря (SSH) для антициклонических (циклонических) вихрей. Значение амплитуды вихря составляет не менее 1 см.

Historical Mesoscale Altimetry - Jan 10, 2003



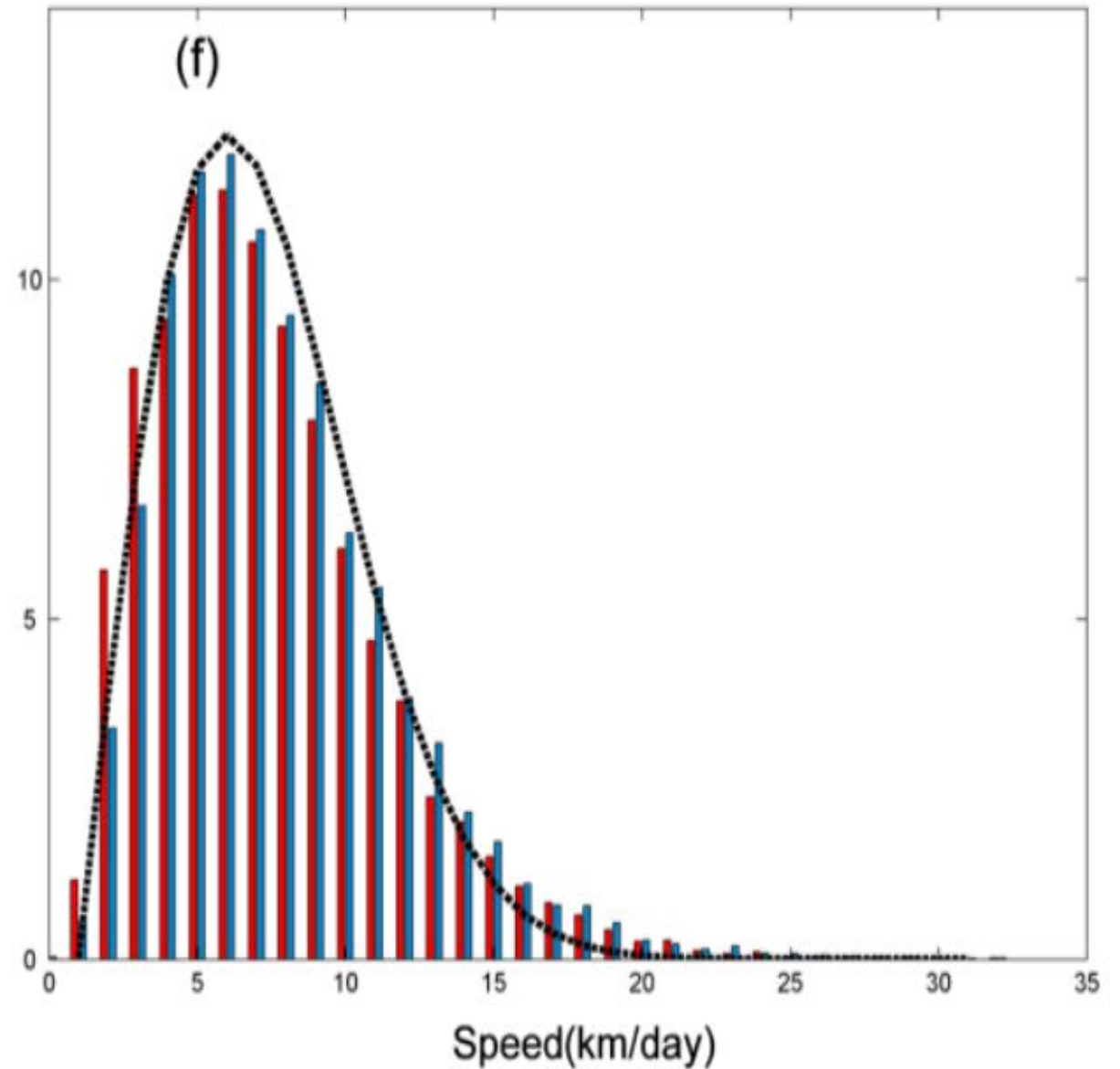
Радиус вихрей варьируется от 30 до 170 км, средний радиус циклонических вихрей равняется 85 км, антициклонических — 86 км.

Средняя продолжительность жизни для всех вихрей - 18 недель, однако некоторые вихри существуют в течение нескольких лет.

Расстояния перемещений вихрей изменяются в пределах от 100 до 3000 км, большая часть как антициклонических, так и циклонических вихрей проходят расстояние в 200-300 км.

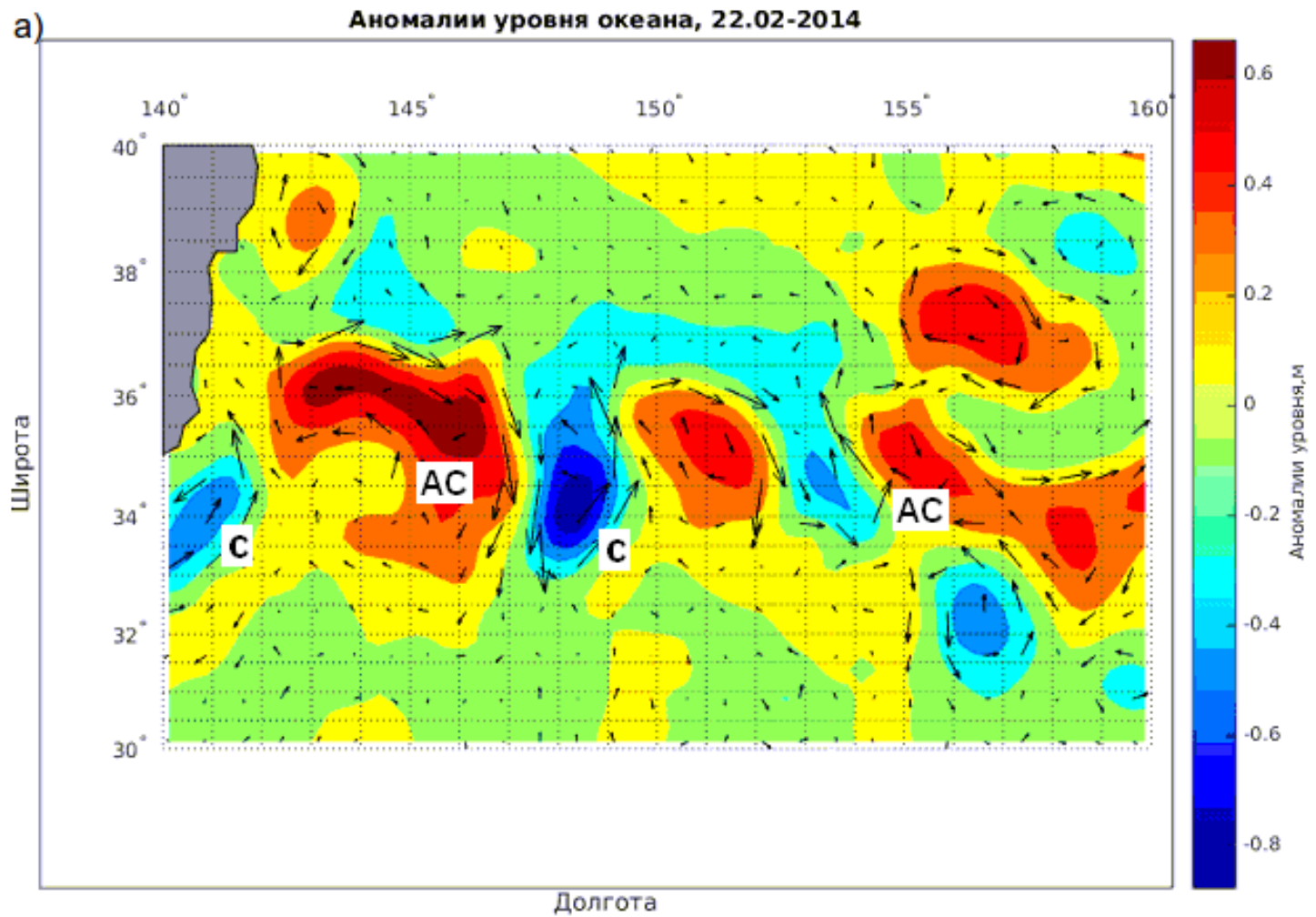
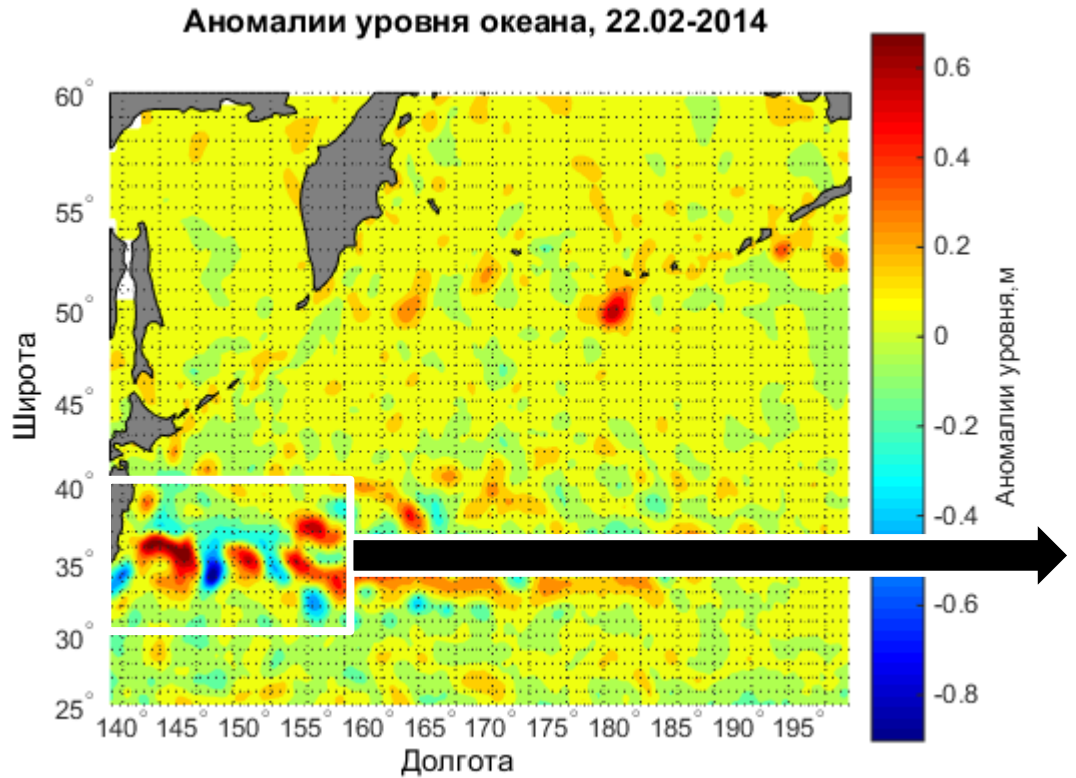
Кинетическая энергия вихрей на порядок выше средней кинетической энергии Мирового океана, а именно: кинетическая энергия вихрей здесь варьируется от 0 до $1200 \text{ см}^2 / \text{с}^2$.

Большая часть вихрей перемещаются со скоростью 4-9 км/день.
Для антициклонических вихрей (красный цвет) характерны меньшие скорости движения, чем для циклонических (синий цвет).



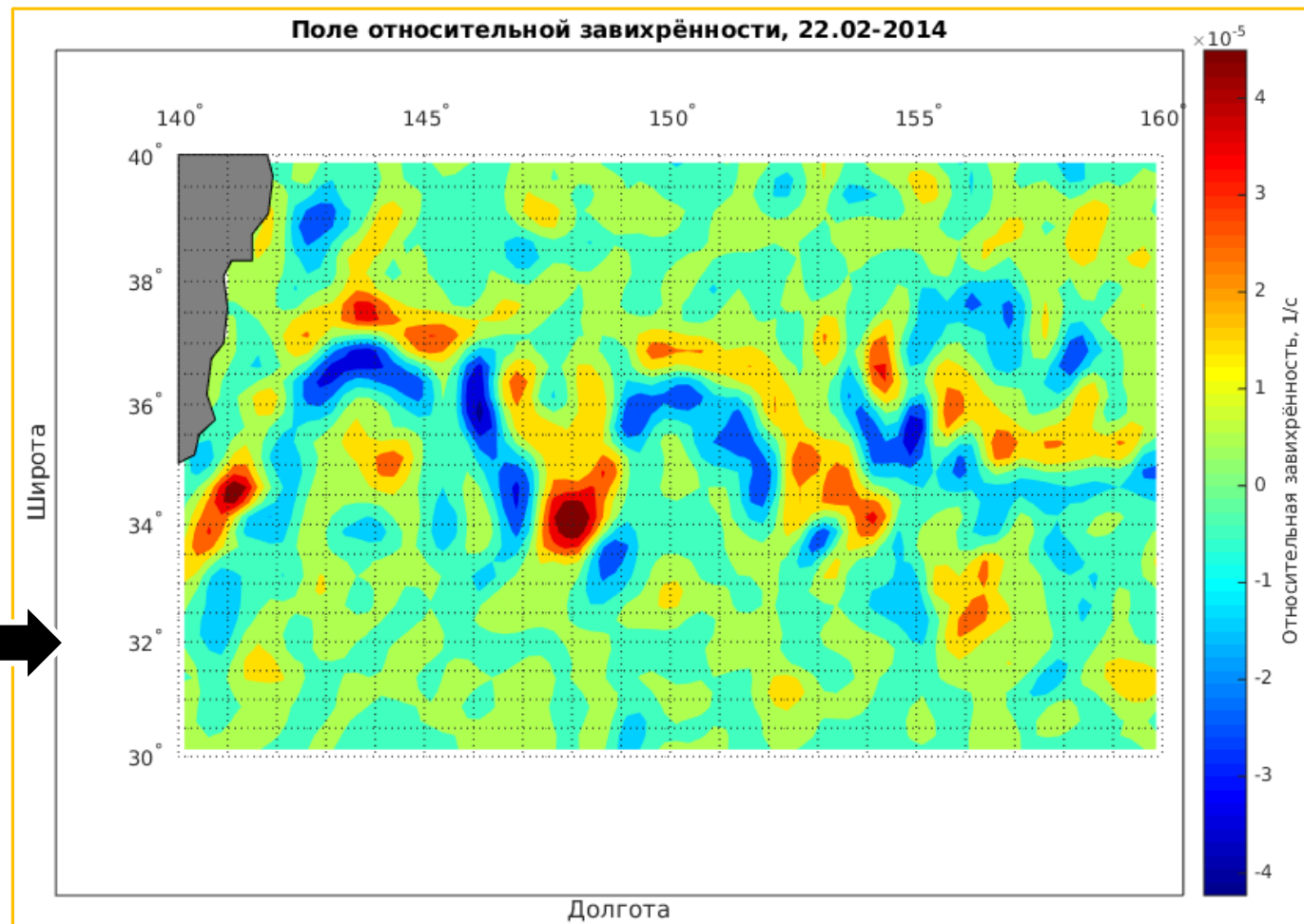
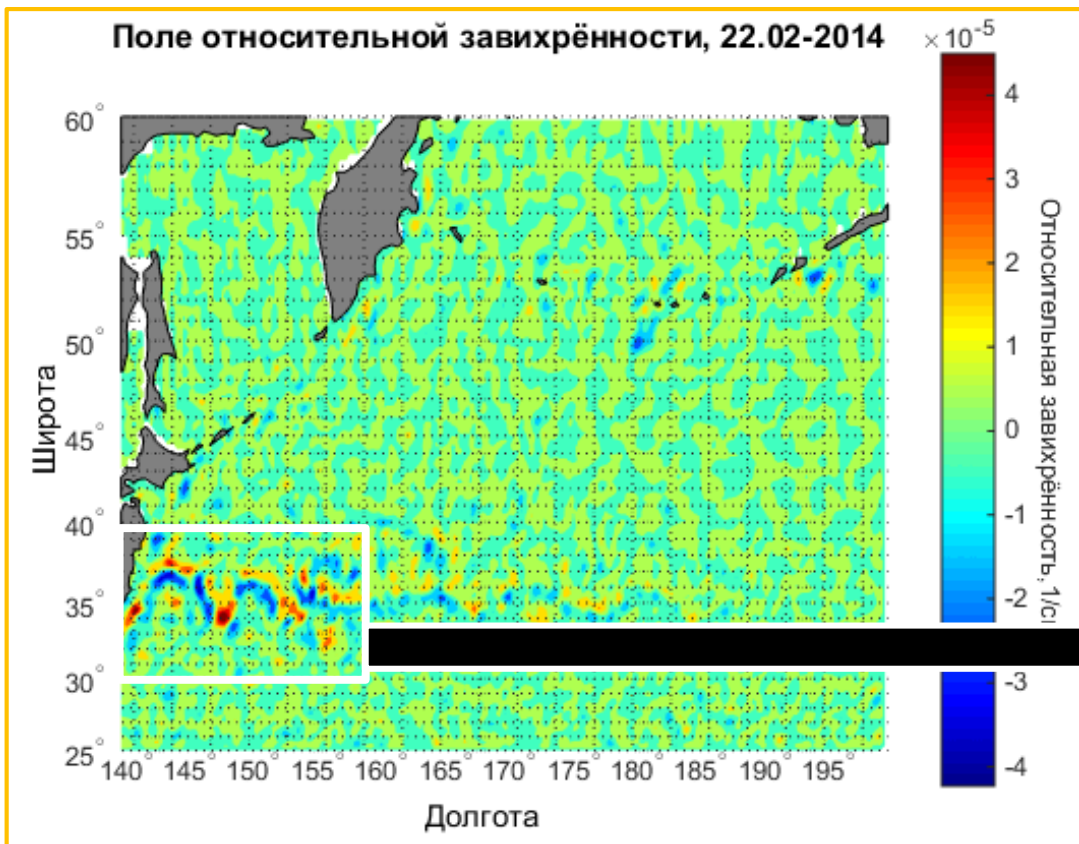
Методы идентификации синоптических вихрей по спутниковым данным

Метод SLA



Метод оценки относительной завихрённости

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$



Метод Окубо-Вейса

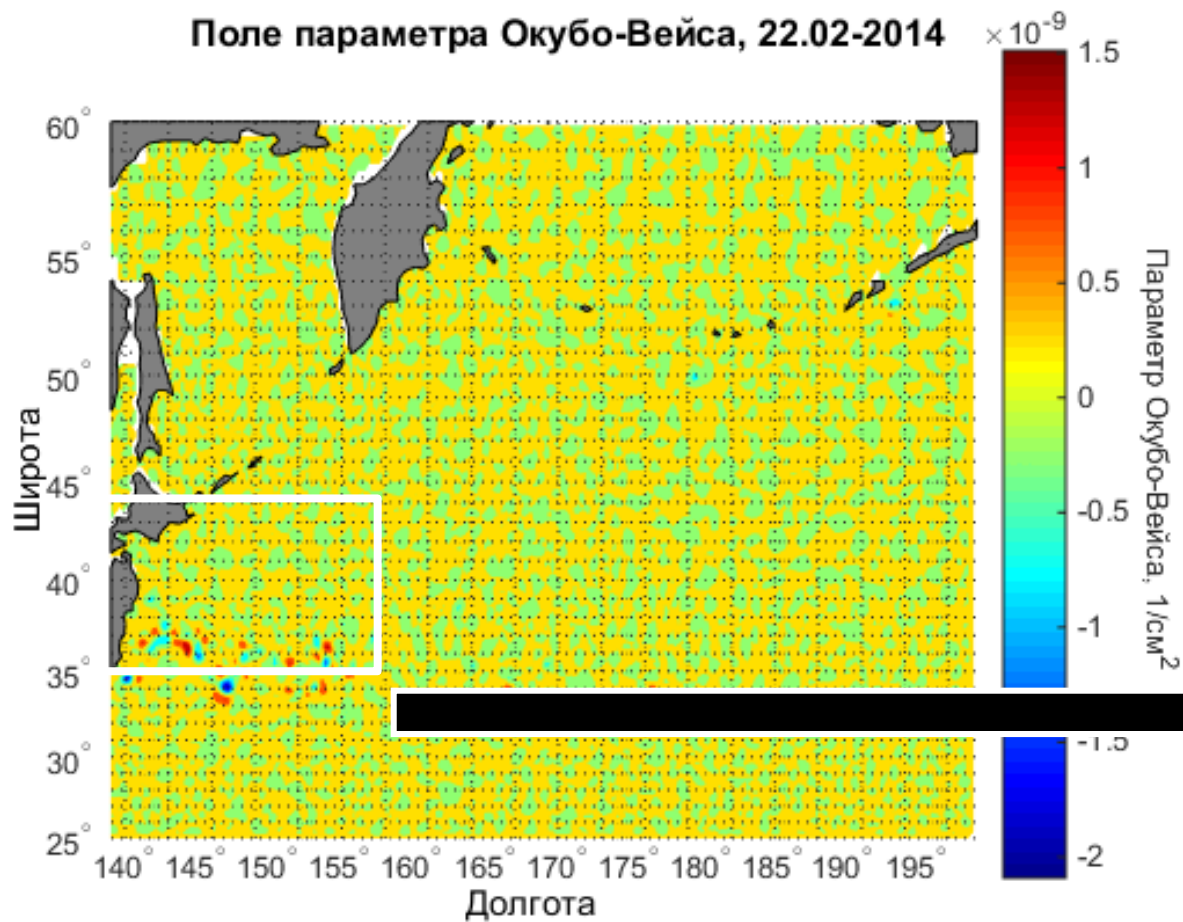
$$W = S_n^2 + S_s^2 - \zeta^2$$

$$S_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$$

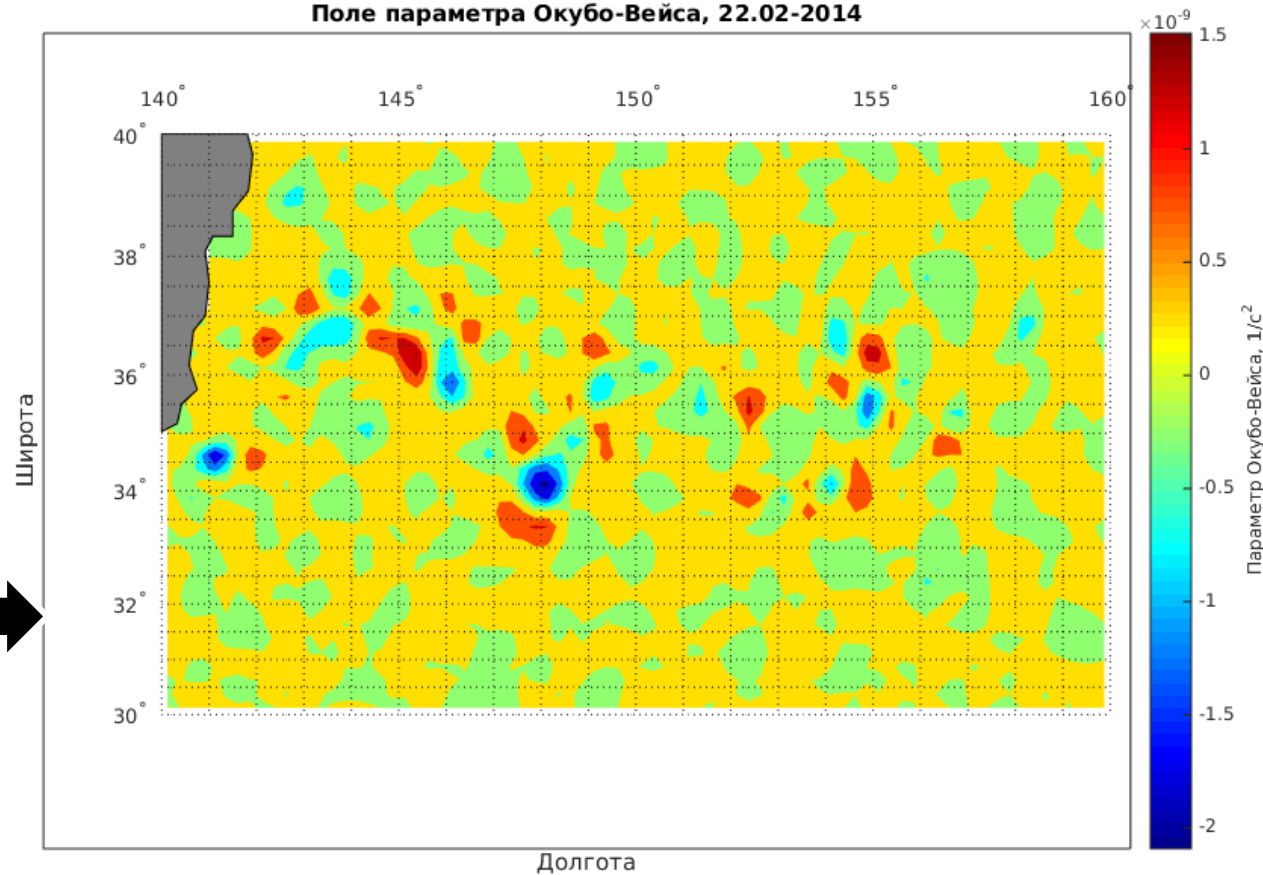
$$S_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

Поле параметра Окубо-Вейса, 22.02-2014



Поле параметра Окубо-Вейса, 22.02-2014



Метод Окубо-Вейса

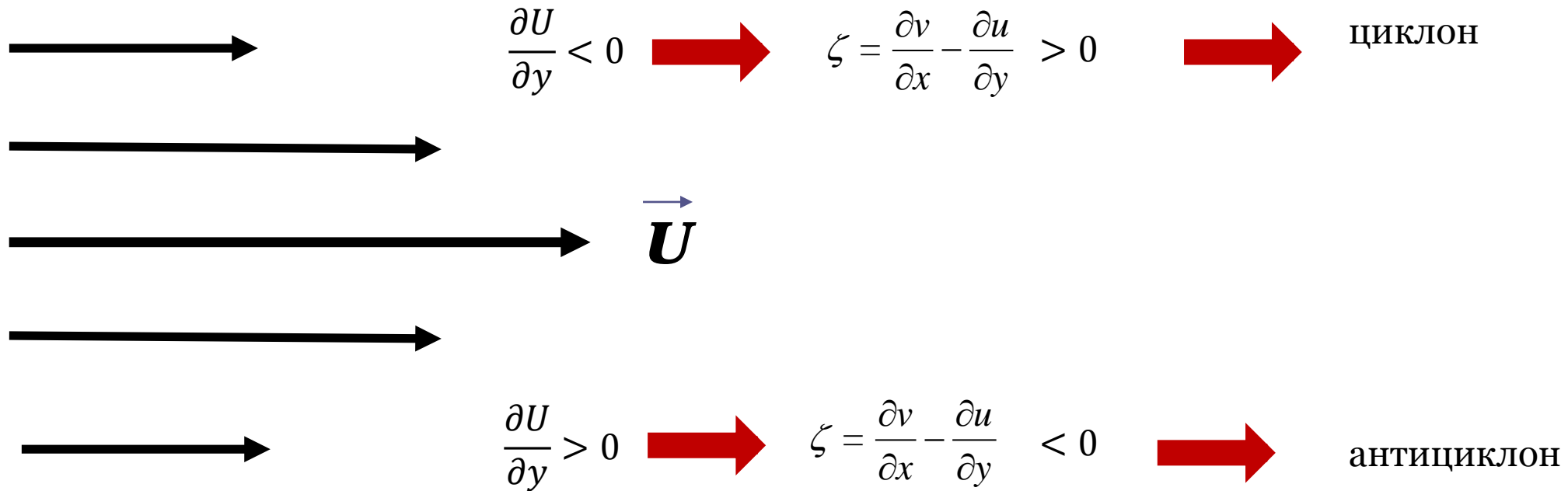
$$W = s_n^2 + s_s^2 - \zeta^2 = 4(u_x^2 + u_y v_x), \text{ где}$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{g}{f} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \text{ — относительная завихренность,}$$

$$s_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{2g}{f} \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \text{ — нормальная компонента напряжения,}$$

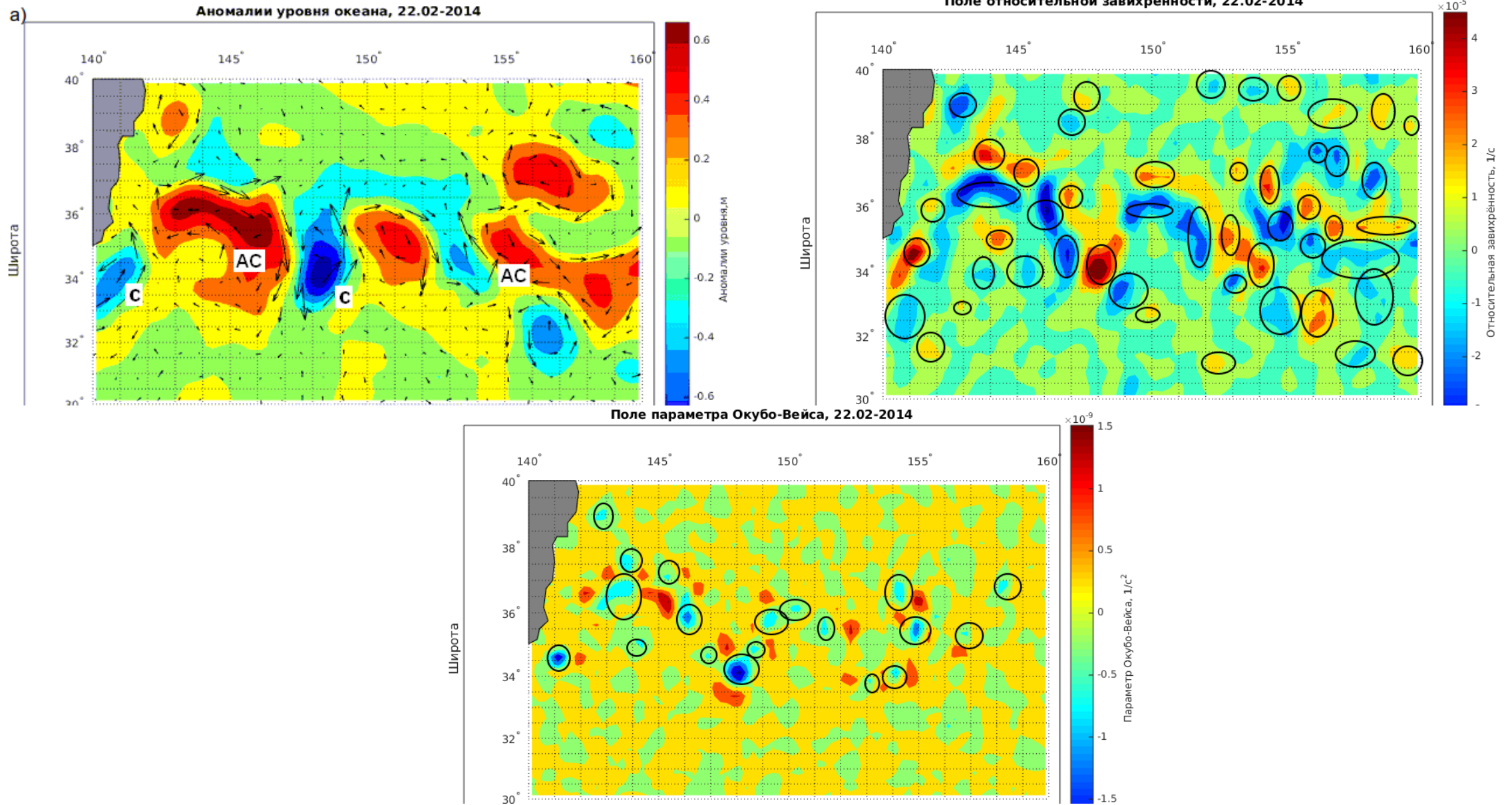
$$s_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{g}{f} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \text{ — сдвиговая компонента напряжения.}$$

Струйное течение $U \rightarrow$ ($V = 0$)



Относительная завихрённость не всегда характеризует вращательные движения в поле течений и присутствие вихря, зависит от градиентов скоростей и показывает, в том числе, сдвиговые различия в поле скоростей

Сравнение трёх методов идентификации вихрей



Параметр нелинейности U/c

Известно, что наблюдающиеся в океане синоптические вихри иногда обнаруживают некоторые черты волн Россби, а именно: распространение с западной составляющей фазовой скорости и неплохое количественное совпадение пространственно-временных масштабов колебаний с дисперсионными соотношениями, описывающими волны Россби. При исследовании синоптических вихрей используется так называемый параметр нелинейности (η) вихрей, который определяется как отношение между вращательной скоростью (U) и скоростью распространения или дрейфа (c). Для нелинейных вихрей параметр нелинейности больше единицы ($\eta > 1$), и вращательная скорость превышает скорость распространения. Тем самым утверждается, что вихри могут захватывать в себя воду и переносить её неизменные свойства вдоль своего пути распространения (Chelton et al., 2007, 2011; Samelson, Wiggins, 2006; Charria et al., 2003). По результатам модельных вычислений, в основе которых положен указанный критерий нелинейности, **99% вихрей на поверхности Мирового океана нелинейны.** Те же результаты для системы Калифорнийского течения были получены Chelton et al. (2011): в модельных вычислениях для **84%** циклонов и **75% антициклонов** параметр $\eta \geq 5$

Нелинейные вихри

В подповерхностном слое 97,5% циклонов и 99% антициклонов оказались нелинейными, и 55% циклонов и 56% антициклонов показали высокую нелинейность ($\eta \geq 5$). Таким образом, и поверхностные, и подповерхностные вихри Калифорнийского течения, вне зависимости от полярности, способны захватывать в себя воду и переносить её на расстояния. На широтах выше 25° для **98% вихрей** параметр $U/c > 1$. Степень нелинейности немного меньше в более низких широтах, где скорость распространения больше, однако даже на широтах от 15 до 25 для **95% вихрей** параметр нелинейности $U/c > 1$ (Chelton et al., 2011).

Однако расчеты относительной завихренности и параметра Окубо–Вейса не подтверждают доказательство принадлежности всех рассм. неоднородностей именно к вихрям. Волны Россби, принадлежащие к классу градиентно-вихревых волн, также образуют неоднородности в поле уровня океана. Струйные течения могут давать неоднородности в поле относительной завихренности.

Закон сохранения потенциальной завихрённости q для слоя мелкой воды глубины h может быть записан следующим образом:

$$\frac{d(\zeta + f)}{dt} = F - D,$$

где $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla$, \mathbf{v} – скорость, ∇ – оператор градиента, $\zeta \equiv k \cdot \nabla \times \mathbf{v}$ – вертикальная

компонента относительной завихрённости и f – параметр Кориолиса, F – форсинг, D – диссипация (Pedlosky, 1987). Используя функцию тока ψ ,

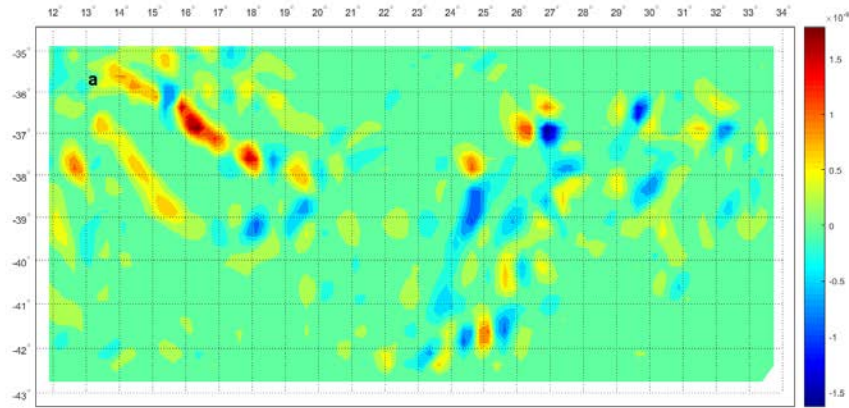
$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

закон сохранения записывается так:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + J(\psi, \zeta) + v\beta = F - D,$$

где u и v – составляющие скоростей течения, x и y – направленные на восток и на север

оси координат, $\beta = \frac{df}{dy}$, J – якобиан: $J(A, B) \equiv \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial x}$.



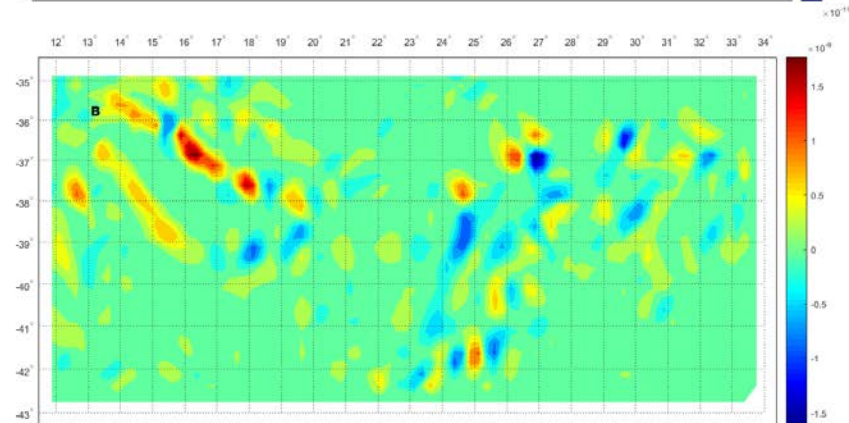
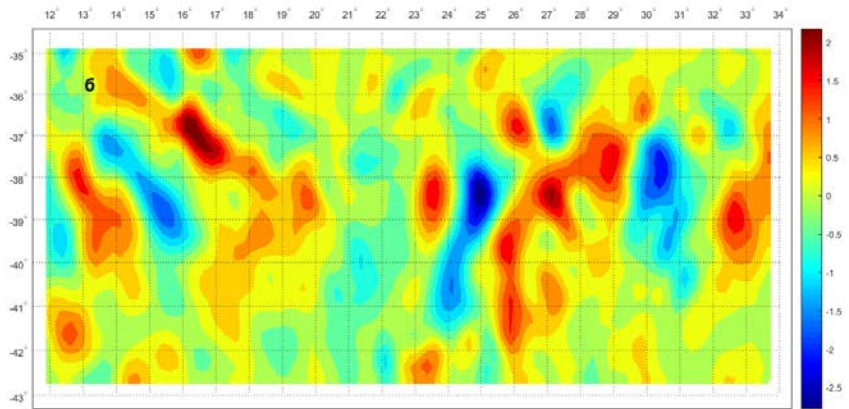
Составляющие уравнения сохранения потенциального вихря в Южном океане на дату 15.12.2007:

$$(a) - J(\psi, \zeta) = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial x} = v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

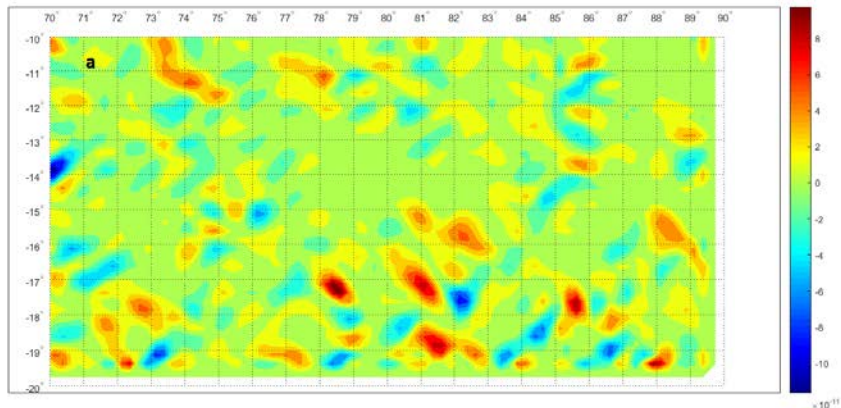
(б) - $v\beta$

(в) - разность (а) - (б)

Шкала: (а) 10^{-9} ; (б) 10^{-11} ; (в) 10^{-9}



Район расположен в средних широтах южнее мыса Агульяс и ограничен **35-43° ю.ш., 12-34° в.д.** Область взаимодействия течения Агульяс и АЦТ принадлежит к одной из самых изменчивых областей Мирового океана, для нее характерны большие амплитуды варьирования параметров океанологических полей на всех пространственно-временных масштабах изменчивости. Сложное сочетание различных динамических процессов предполагает существенную нелинейность мезомасштабных структур.



Составляющие уравнения сохранения потенциального вихря в Южном океане на дату 15.12.2007:

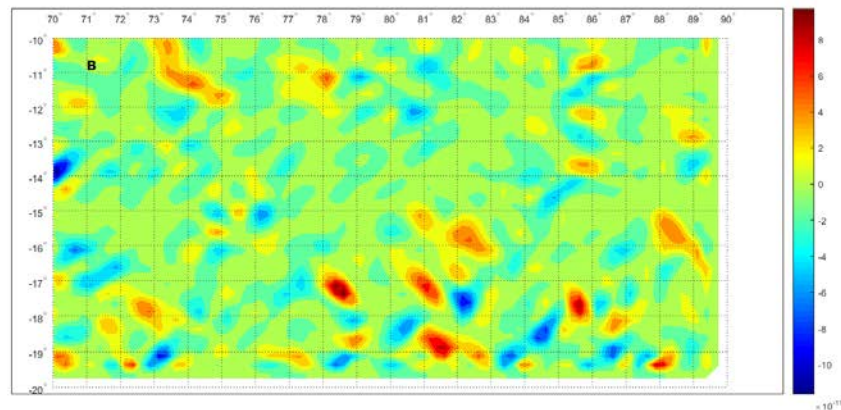
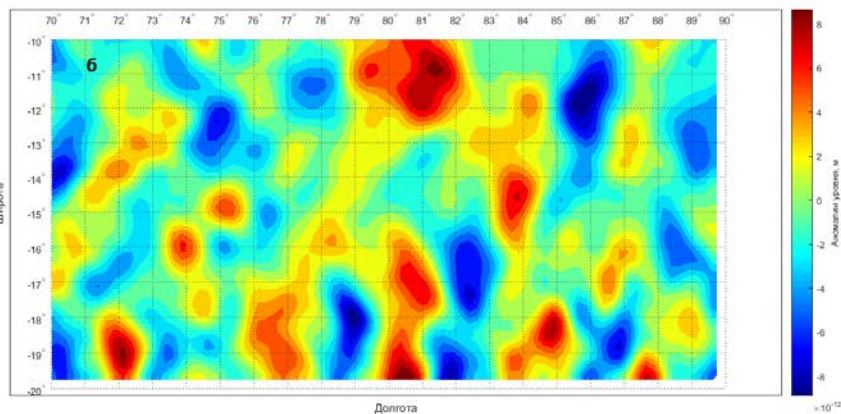
$$(a) - J(\psi, \zeta) = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial x} = v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

$$(б) - v\beta$$

(в) - разность (а) - (б)

Шкала: (а) 10^{-11} ; (б) 10^{-12} ; (в) 10^{-11}

Район расположен в низких широтах Индийского океана, ограничен **10-20° ю.ш., 70-90° в.д.** В низких широтах Индийского океана многие исследователи обнаруживали волны Россби не только по альтиметрическим измерениям уровня, но по спутниковым наблюдениям за температурой поверхности (Cipollini et al., 1997; 2000; Hill et al., 2000), и даже наблюдениях за цветом океана (Cipollini et al., 2001; Белоненко и др., 2001).



Выводы

- Ни расчёты относительной завихрённости, ни поля аномалий уровня океана не могут однозначно свидетельствовать о присутствии в том или ином месте вихрей;
- для более точной идентификации вихрей подходит расчёт параметра Окубо-Вейса, однако он не даёт сведений о направлении вращения вихря;
- возникновение неоднородностей в полях относительной завихрённости, а также в полях аномалий уровня океана могут быть связаны с другими явлениями, в частности, с низкочастотными волнами Россби и их взаимодействием с течениями;
- радиус вихря, определённого в поле параметра Окубо-Вейса, обычно меньше чем тот, что определён в поле аномалий уровня океана.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + J(\psi, \zeta) + v\beta = F - D$$

- Если в уравнении доминирует второй член (якобиан), мы имеем дело с нелинейными движениями и вихревыми структурами;
- если доминирует линейное слагаемое с V , то наблюдаются волны Россби.

- Сравнение оценок линейных и нелинейных слагаемых для двух районов южного полушария показало, что в низких широтах нелинейные эффекты на порядок превышают линейные, в то время как в средних широтах эти характеристики отличаются на два порядка.
- Установлено, что в более ранних исследованиях, посвященных анализу низкочастотной изменчивости по спутниковым альтиметрическим данным, вклад волн Россби в низких широтах Индийского океана значительно преувеличен.

Спасибо за внимание!