



*Т.В. Белоненко,
А.А. Кубряков*



Нелинейные механизмы переноса температурных свойств и пассивной примеси в Северо-западной части Тихого океана

**Пятая Международная школа-семинар «Спутниковые
методы и системы исследования Земли»
Таруса, ИКИ РАН, 25 февраля – 3 марта 2014 г.**

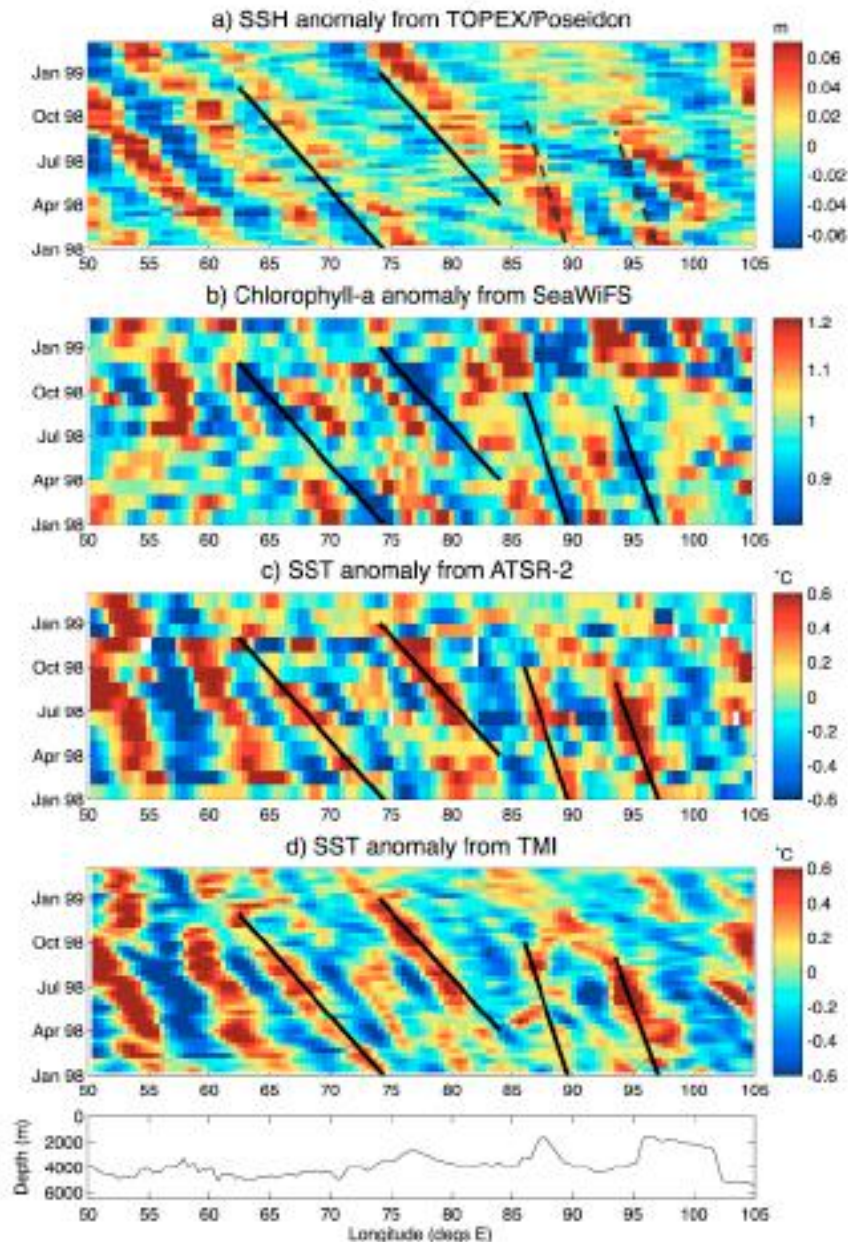
Структура доклада

1. Закономерности изменчивости океанологических полей в изоплетах

2. Основная гипотеза и вывод уравнений

3. Волны Россби в Тихом океане

INDIAN OCEAN, 32°S, bandpass-filtered



•1. Закономерности изменчивости океанологических полей в изоплетах

Волны Россби, идентифицируемые по различным типам спутниковых данных вдоль 32° ю.ш.:

a) Аномалии SSH (T/P)

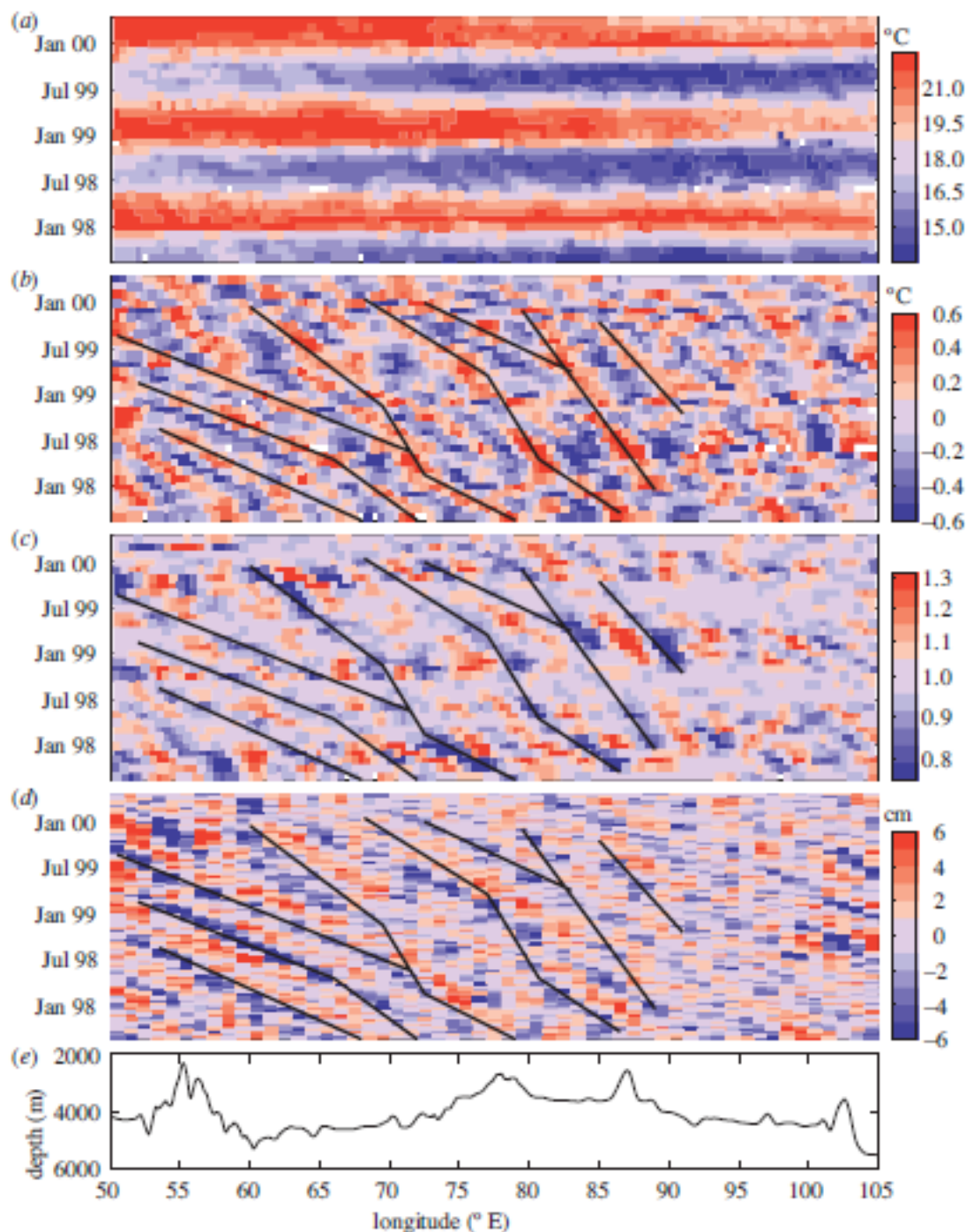
b) Аномалии концентрации хлорофилла-а Chl (SeaWiFS)

c) Аномалии SST (ATSR-2)

d) Аномалии SST (TMI)

Внизу: соответствующий батиметрический профиль вдоль 32° ю.ш.

[Challenor et al., 2004]



**Волны Россби,
идентифицируемы
е по различным
типам
спутниковых
данных, изоплеты
вдоль 34° ю.ш.:**

a) SST (T/P)

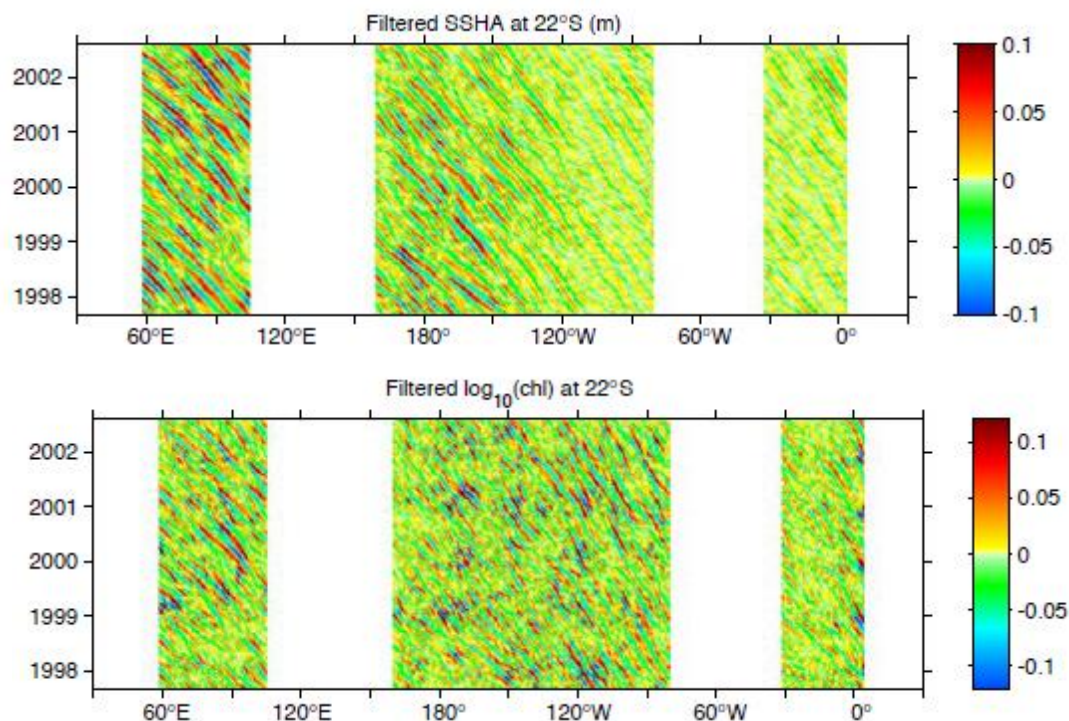
b) Аномалии SST

c) Аномалии Chl

d) Аномалии SSH

**Внизу:
соответствующий
батиметрический
профиль вдоль
34° ю.ш.**

[Quartly et al., 2003]



**Зональные изоплеты
полей хлорофилла**

**(а) и аномалий
уровня океана**

(b) вдоль 22 ° ю.ш.

[Killworth et al., 2004].

Анализ спутниковых данных, полученных с использованием различных сенсоров, показывает, что низкочастотная изменчивость различных океанологических полей имеет общие черты, проявляющиеся, в частности, на зональных пространственно-временных разрезах спутниковых измерений уровня океана, температуры поверхности воды и концентрации хлорофилла. Судя по всему, в их низкочастотной изменчивости присутствует общий механизм, определяющий указанное сходство, и этот механизм проявляется через волны Россби.

Уравнение распространения тепла в океане, проинтегрированное для верхнего квазиоднородного слоя:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = A \Delta \theta + \frac{q}{h}$$

θ - температуры воды

$$u(t, x, y) = \bar{u}(t, x, y) + u'(t, x, y),$$

$$v(t, x, y) = \bar{v}(t, x, y) + v'(t, x, y),$$

$$\theta(t, x, y) = \bar{\theta}(t, x, y) + \theta'(t, x, y)$$

u, v – соответственно проекции скоростей течения на координатные оси

A – коэффициент горизонтальной турбулентной теплопроводности;

q – поток тепла через поверхность океана;

h – толщина верхнего квазиоднородного слоя.

Предположение:
адвекция является
доминирующим
фактором
изменчивости

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + u' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + u' \frac{\partial \theta'}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y} + v' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + v' \frac{\partial \theta'}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + u' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y} + v' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = 0$$

Для распространяющихся на запад волн
Россби на зональном потоке, можно
принять:

$$u'(t, x, y) = 0, v'(t, x, y) = A(y) \cdot e^{i(\sigma t - k x)}$$

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} = -A(y) \cdot e^{i(\sigma t - k x)} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y}$$

$$\theta(t, x, y) = \begin{cases} -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} e^{i(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k \neq 0, \\ -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} t e^{i(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k = 0 \end{cases}$$

$$\text{Re } \theta(t, x, y) = \begin{cases} -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} \sin(\sigma t - kx) + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k \neq 0, \\ -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} t \cos(\sigma t - kx) + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k = 0 \end{cases}$$

$$\sigma - \bar{u} k = 0 \longrightarrow \bar{u} = c$$

При $t = 0, x = 0$

функция $\Phi(0) = \theta(0, 0, y) = \theta_0(y)$ задает начальное поле температуры, изменяющееся в меридиональном направлении.

Таким образом, при поставленных нами условиях показано, что частоты, волновые числа и, соответственно, фазовые скорости волн в поле ТПО (концентрации хлорофилла) совпадают с соответствующими значениями частот, волновых чисел и фазовых скоростей в поле меридиональной составляющей скорости течения

$$v'(t, x, y)$$

Оценим связь волновых возмущений в поле температуры с волновыми возмущениями уровня океана, непосредственно регистрируемые спутниковыми альтиметрами.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + H \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} + H \frac{\partial v'}{\partial y} = 0$$

Для волн Россби, распространяющихся в западном направлении и проявляющихся в течениях (перпендикулярно направлению распространения), можно принять

$$v' = A(y) \cdot e^{i(\sigma t - k x)}$$

$$\xi(t, x, y) = - \int H(x, y) \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot e^{i(\sigma t - k x)} dt = - \frac{H(x, y)}{i\sigma} \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot e^{i(\sigma t - k x)}$$

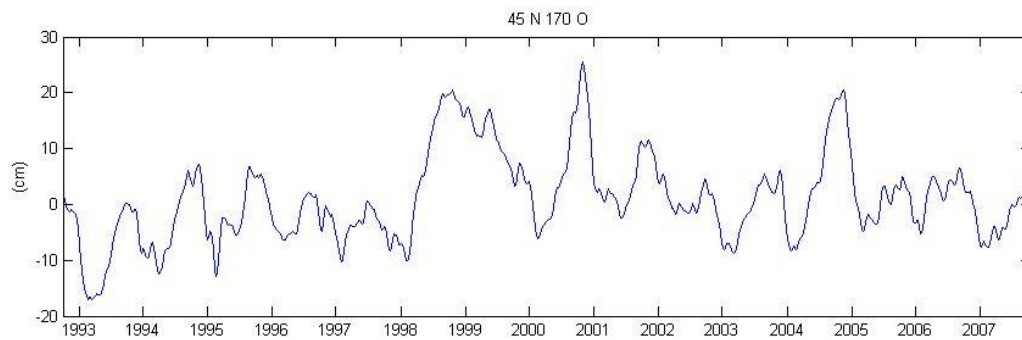
$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0$$

то есть зональная составляющая скорости изменяется только в меридиональном направлении

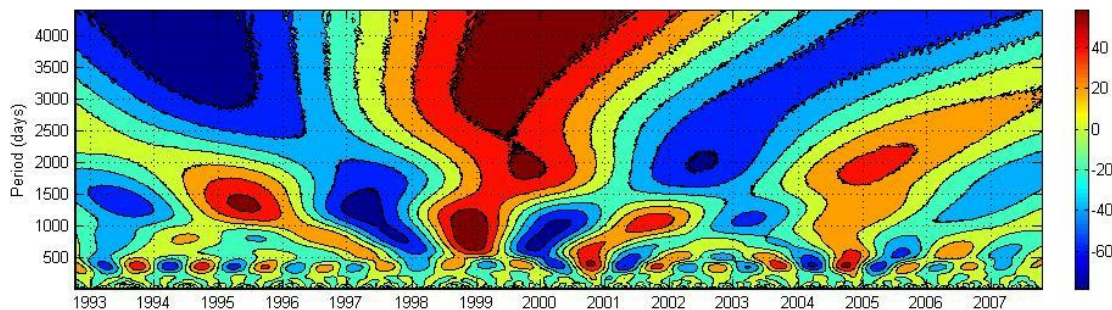
$$\operatorname{Re} \xi(t, x, y) = -\frac{H(x, y)}{\sigma} \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot \sin(\sigma t - k x)$$



Регистрируемое альтиметрами периодическое изменение уровня происходит с теми же частотой и волновым числом, как и изменение меридиональной составляющей скорости. Следовательно, характеристики перемещающихся волн Россби являются и характеристиками меридиональной составляющей скорости течения и, как показано выше, характеристиками волновых возмущений в поле температуры.



Выделяются
квази-
двухлетние,
квази-3,6 и 10
летние циклы



Временной ход уровня океана (SLA) и его вейвлет-коэффициенты для пункта с координатами 45° с.ш., 170° в.д.

Промежуточные выводы

- 1) Характеристики волн Россби, которые можно оценить на основе спутниковых альтиметрических наблюдений за уровнем океана, например, из анализа изоплет, в низкочастотном диапазоне изменчивости могут служить оценками временных масштабов для температурных полей.
- 2) В низкочастотной изменчивости уровня СЗТО выделены квазидвух-трех-летние, квазишестилетние циклы и 10-летние циклы, которые через адвективный механизм в волнах Россби характеризуют также и низкочастотную изменчивость ТПО (концентрации хлорофилла) воды в акватории.
- 3) Рассматриваемая низкочастотная изменчивость уровня океана существенно нестационарна во времени. На основании сделанных математических выводов можно предполагать, что подобная нестационарность в низкочастотном диапазоне изменчивости имеет место и для температурных процессов.

Математическая модель переноса, диффузии и биотической трансформации концентрации хлорофилла θ

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = A \Delta \theta + a_1 \theta + a_2 \theta^2$$

Здесь A – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии,

u, v – соответственно проекции скоростей течения на координатные оси,

a_1 – коэффициент роста биомассы,

a_2 – коэффициент внутривидовой конкуренции.

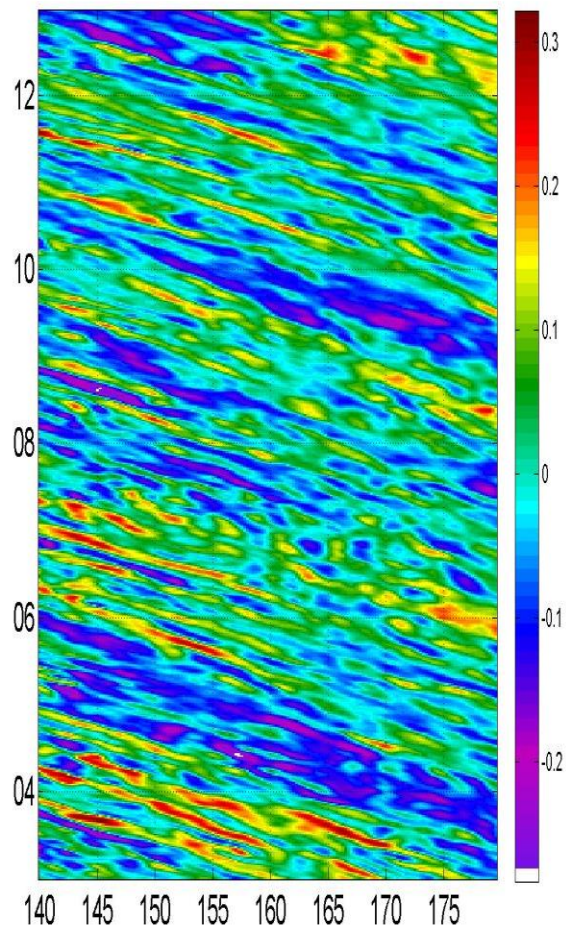
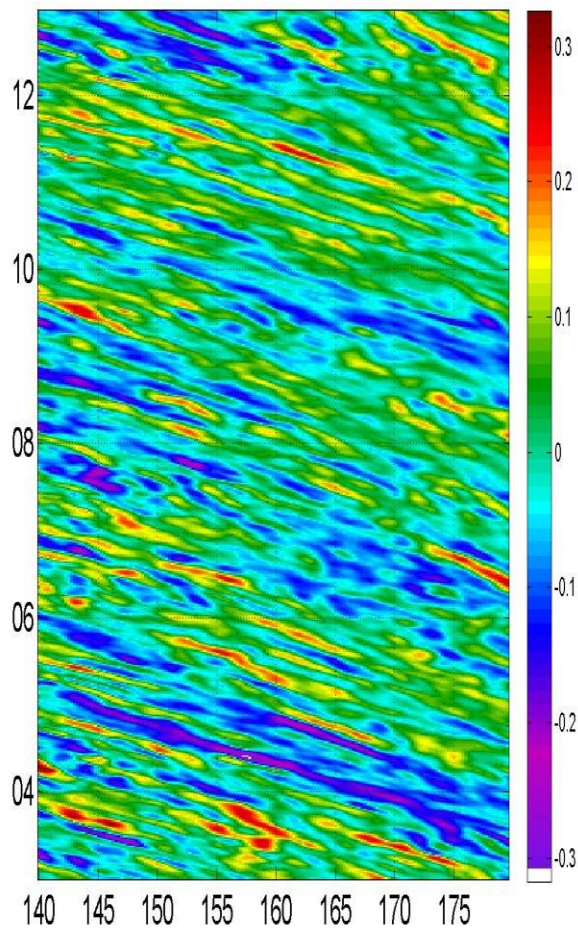
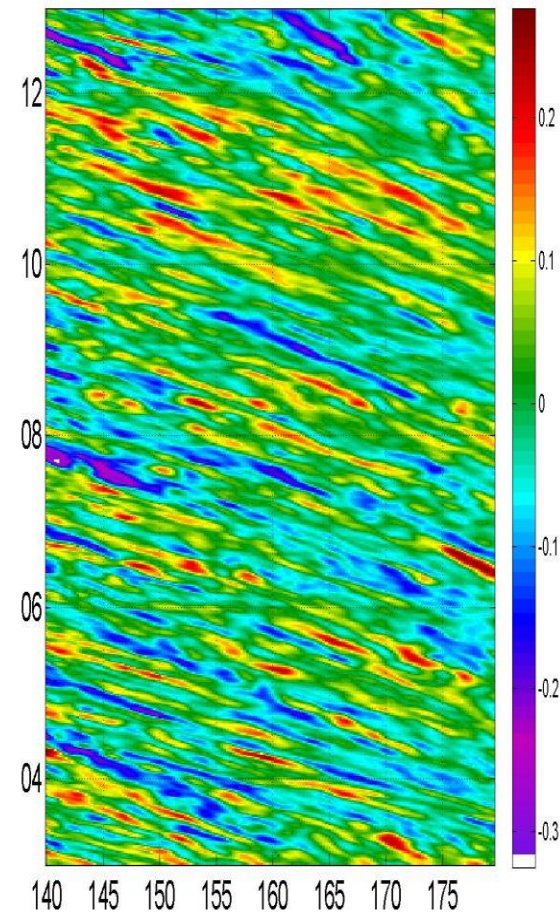
$$\theta(t, x, y) = \begin{cases} -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} e^{i(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k \neq 0, \\ -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} t e^{i(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k = 0 \end{cases}$$

$$\text{Re } \theta(t, x, y) = \begin{cases} -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} \sin(\sigma t - kx) + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k \neq 0, \\ -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} t \cos(\sigma t - kx) + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k = 0 \end{cases}$$

$$\sigma - \bar{u} k = 0 \longrightarrow \bar{u} = c$$

При $t = 0, \quad x = 0$

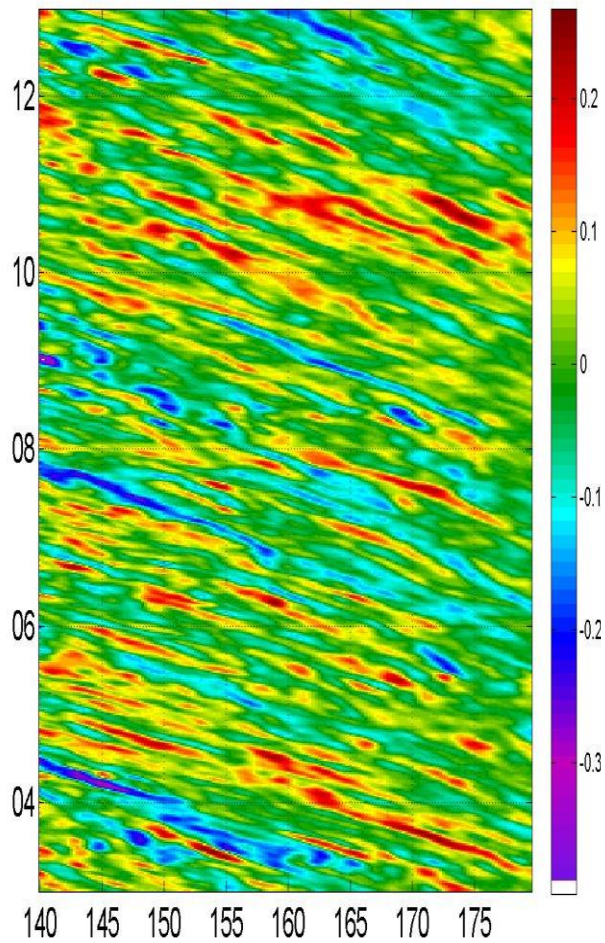
функция $\Phi(0) = \theta(0, 0, y) = \theta_0(y)$ задает начальное поле концентрации хлорофилла, изменяющееся в меридиональном направлении.

ADT Pacific_North_Iltseas. Y(25)ADT Pacific_North_Iltseas. Y(26)ADT Pacific_North_Iltseas. Y(27)

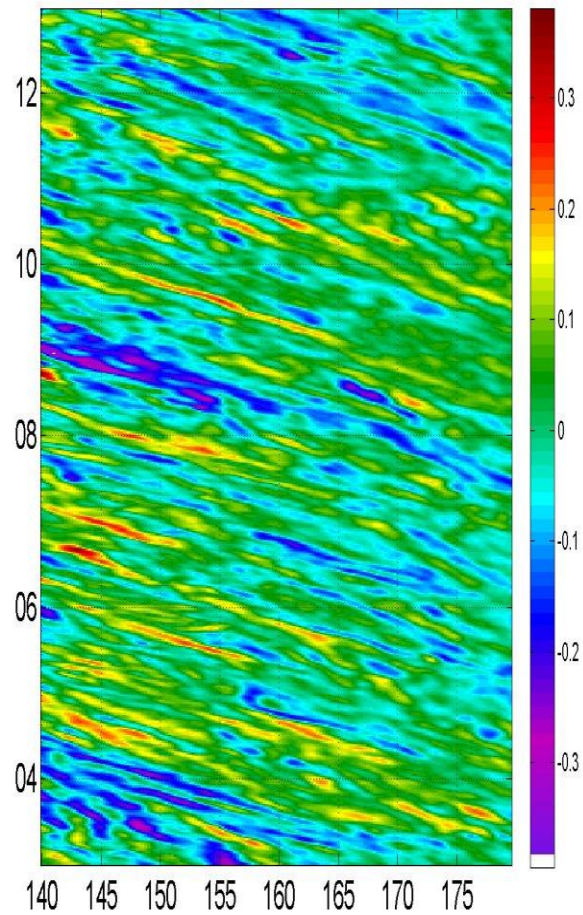
Данные AVISO (ADT), проанализированные здесь за промежуток 2002-2013 гг. с временной дискретностью 7 суток и пространственным разрешением $0.25^\circ * 0.25^\circ$.

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

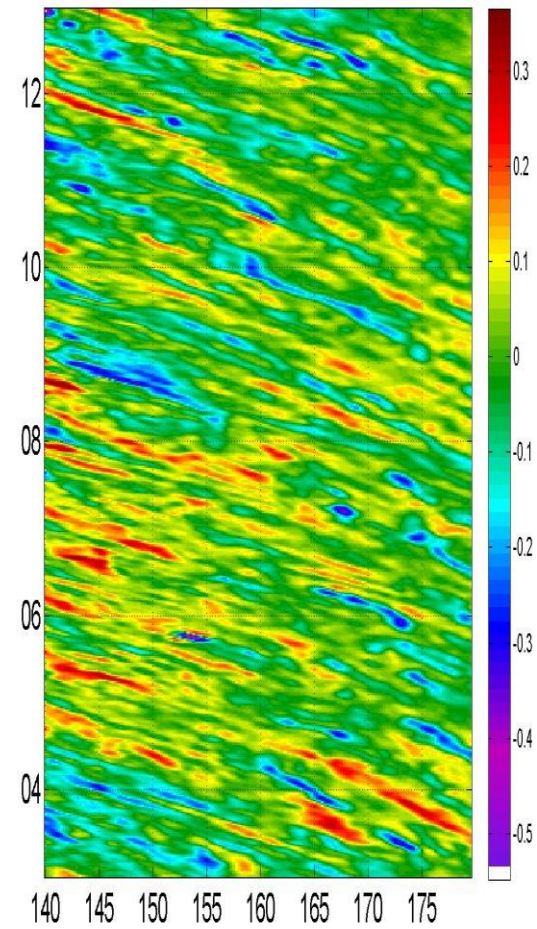
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(28)



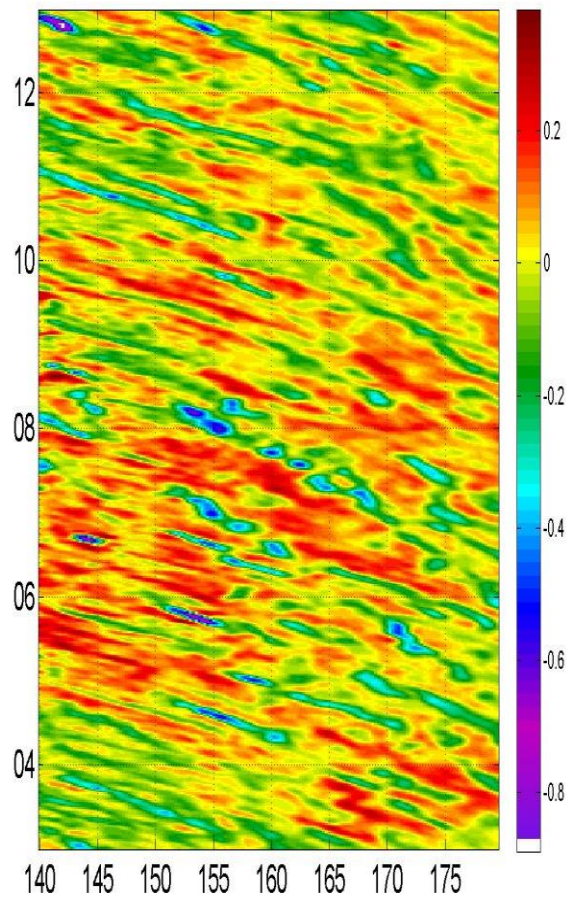
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(29)



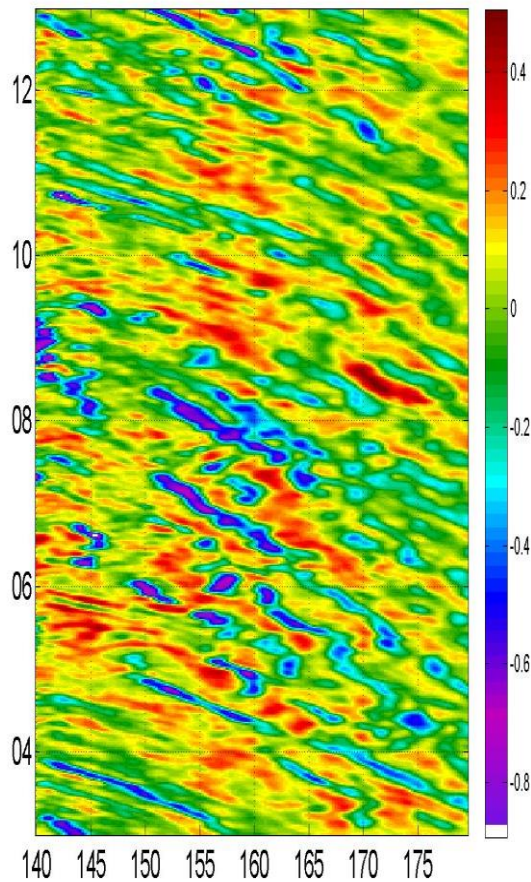
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(30)



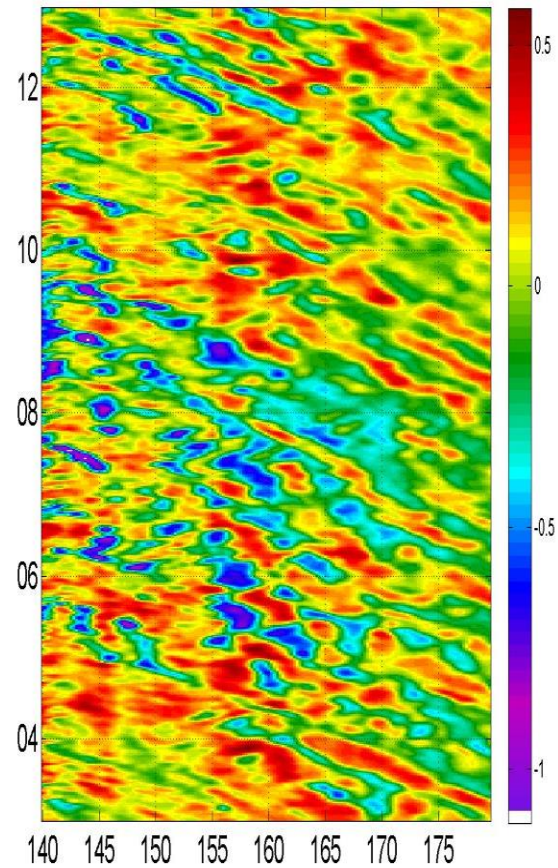
ADT Pacific_North_filtseas. Y(31)



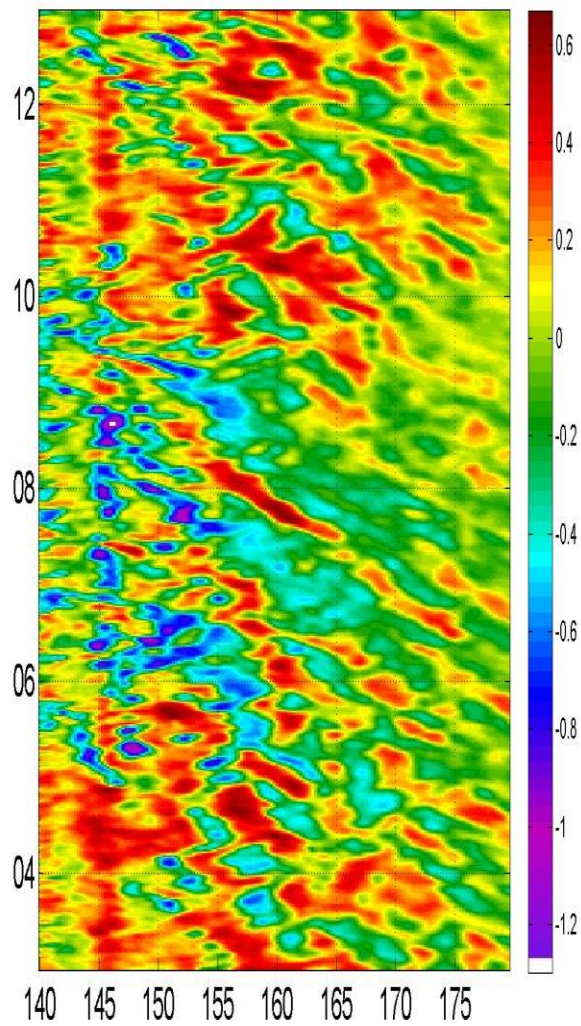
ADT Pacific_North_filtseas. Y(32)



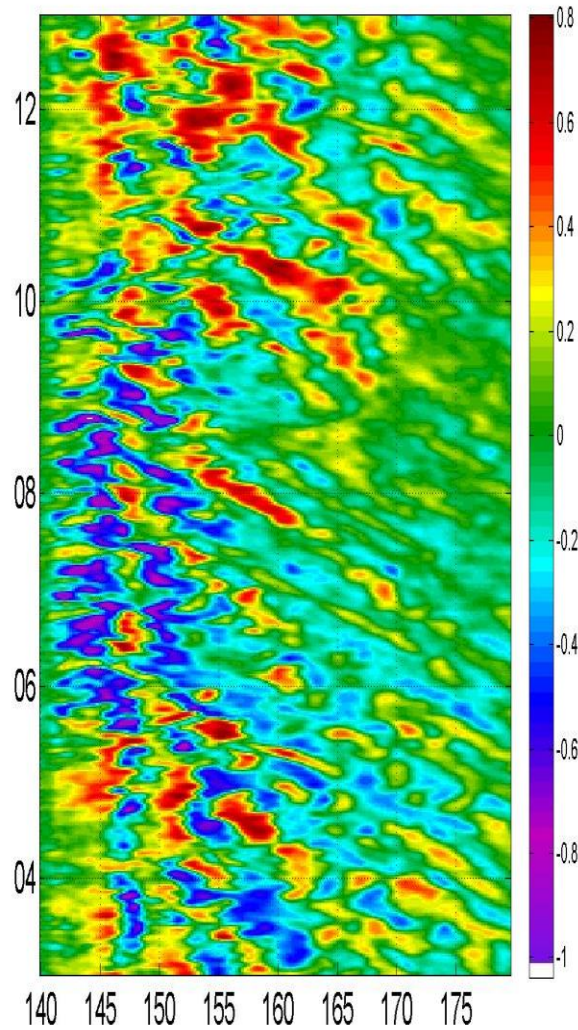
ADT Pacific_North_filtseas. Y(33)



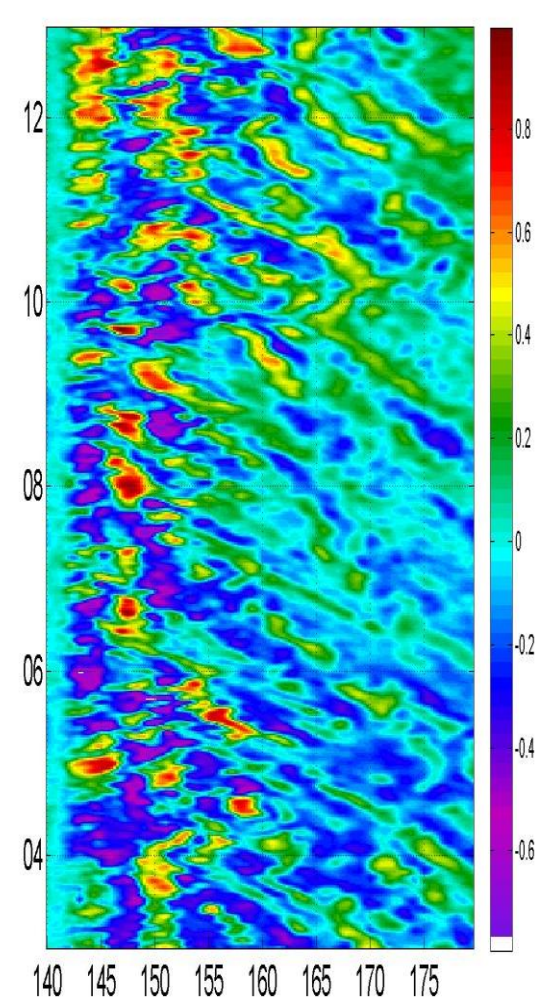
ADT Pacific_North,iltseas. Y(34)



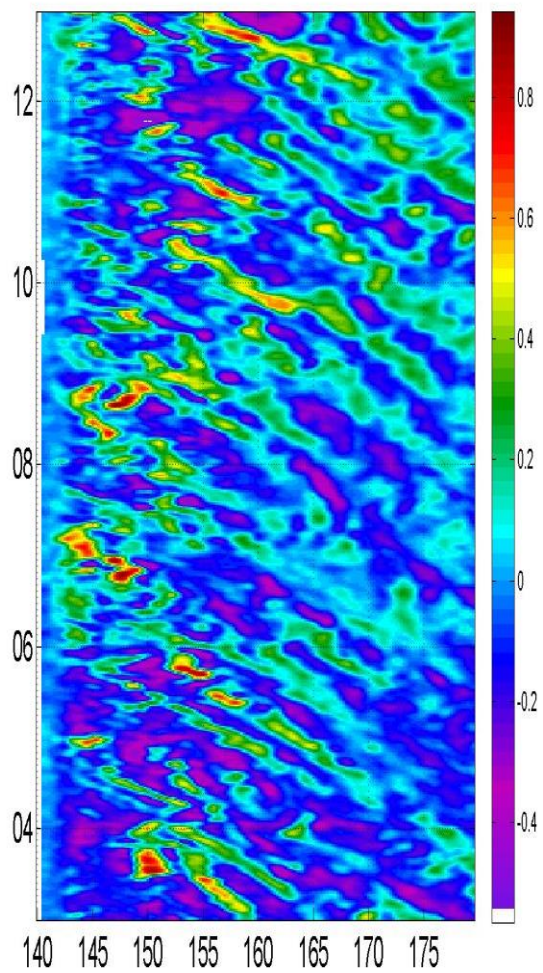
ADT Pacific_North,iltseas. Y(35)



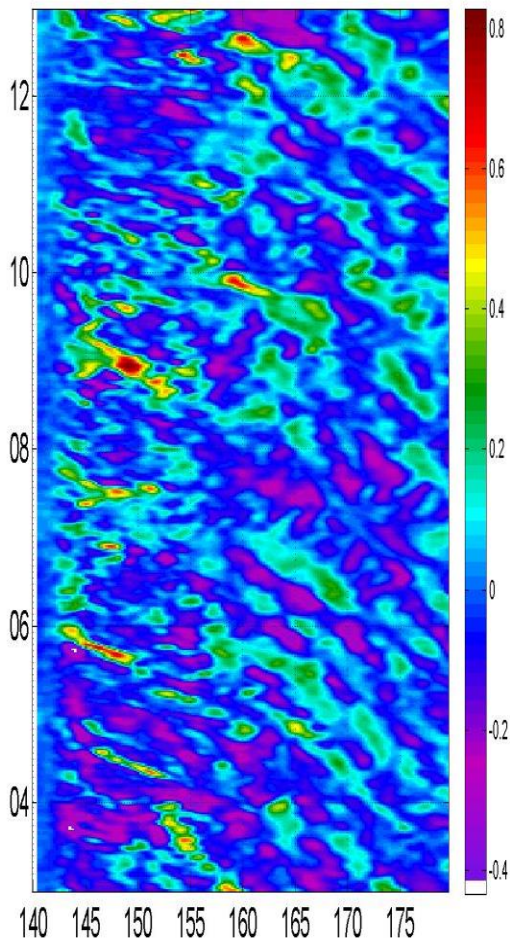
ADT Pacific_North,iltseas. Y(36)



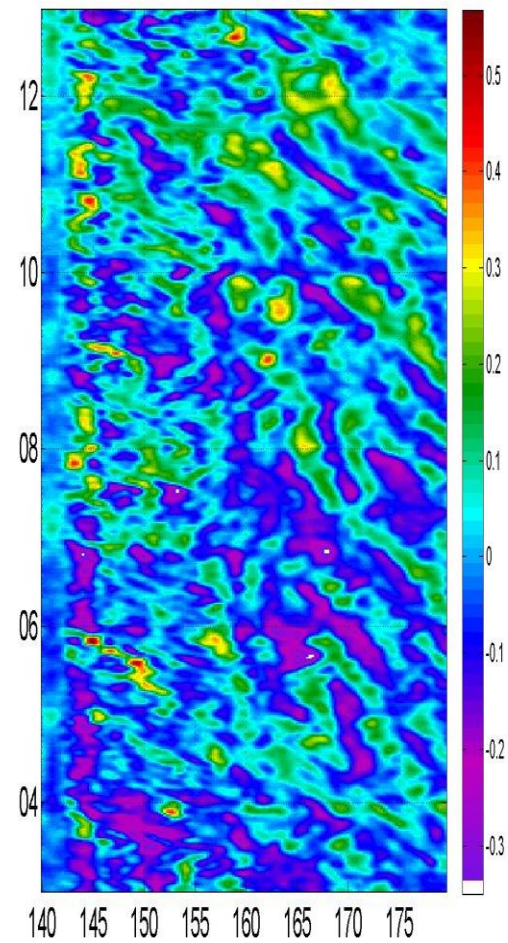
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(37)



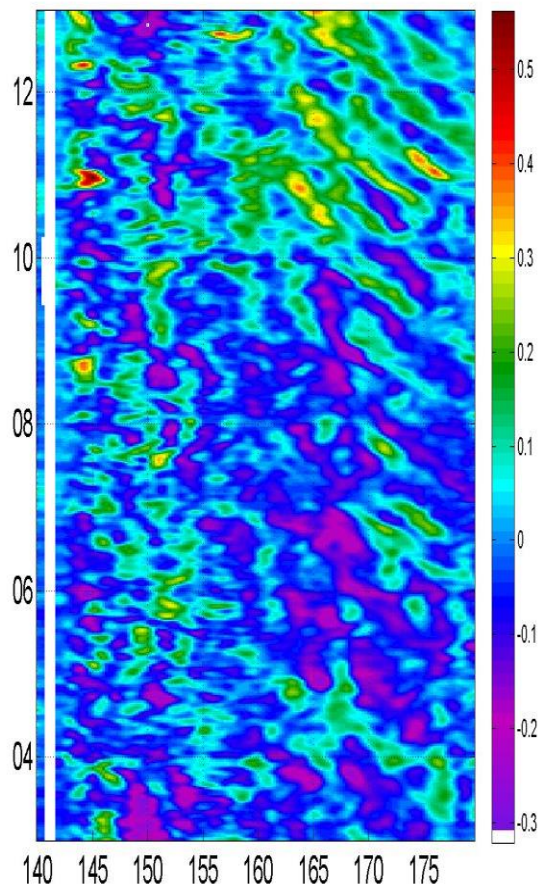
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(38)



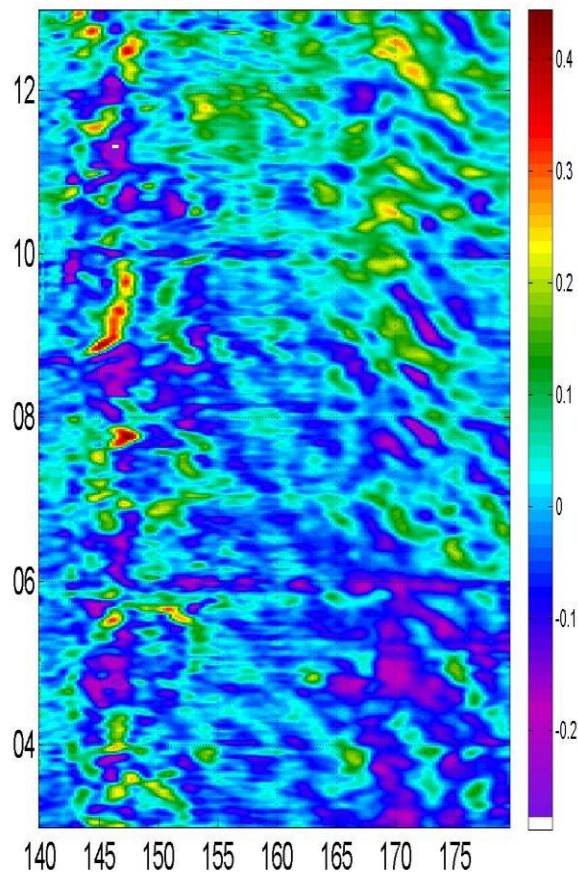
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(39)



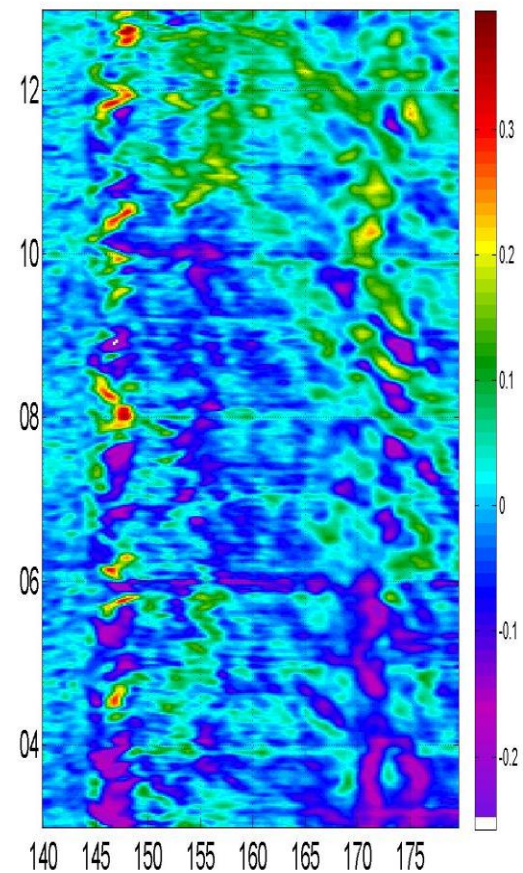
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(40)



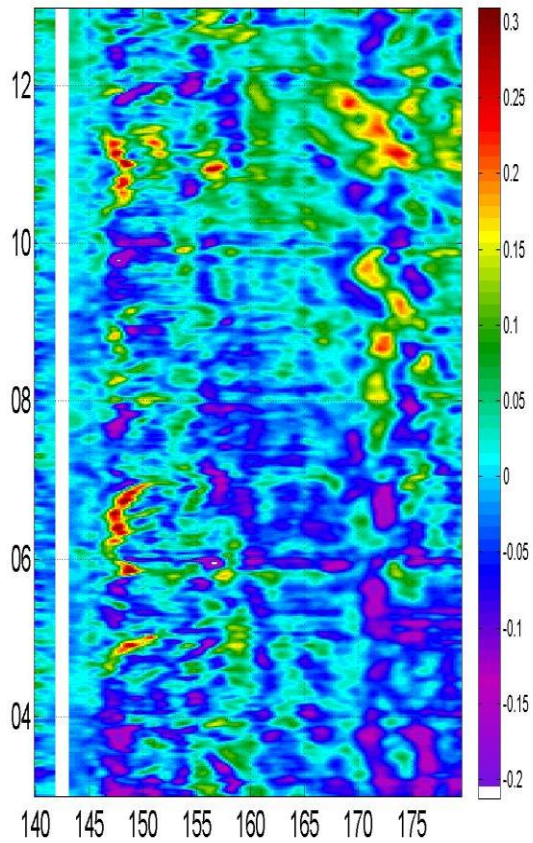
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(41)



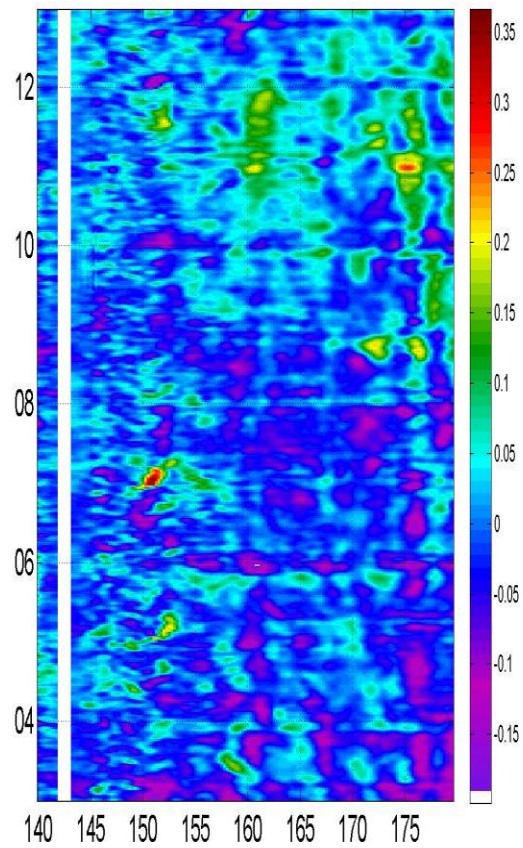
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(42)



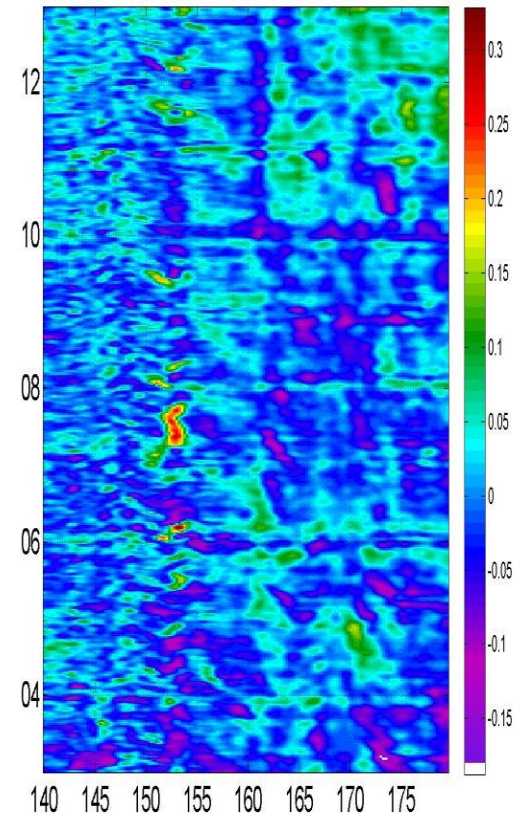
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(43)



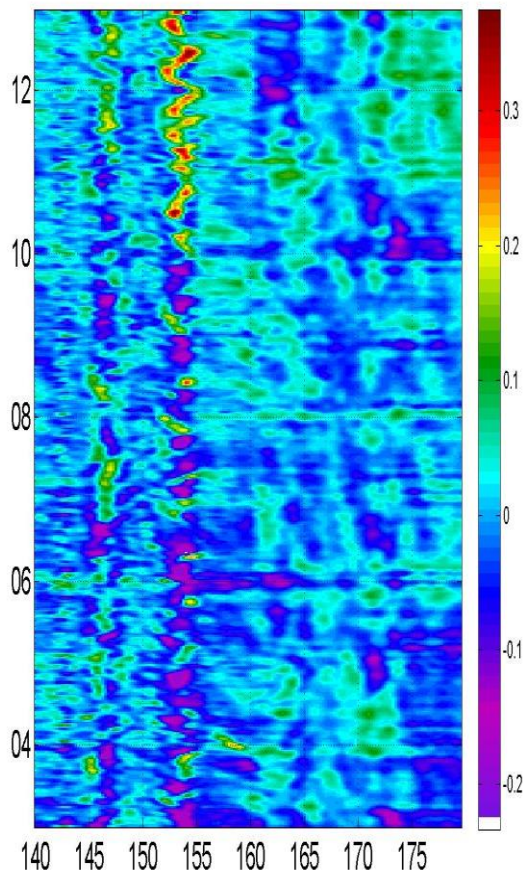
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(44)



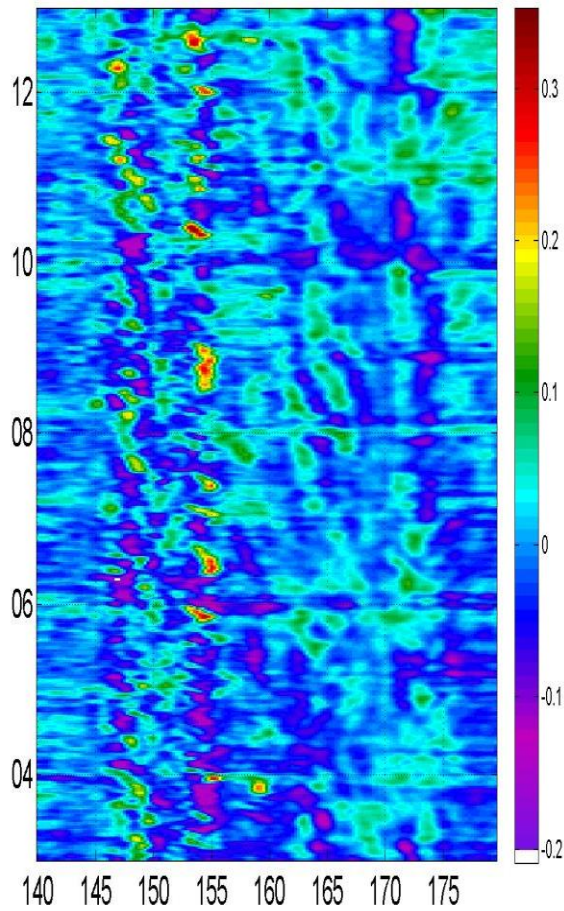
ADT Pacific_North_Iltseas. Y(45)



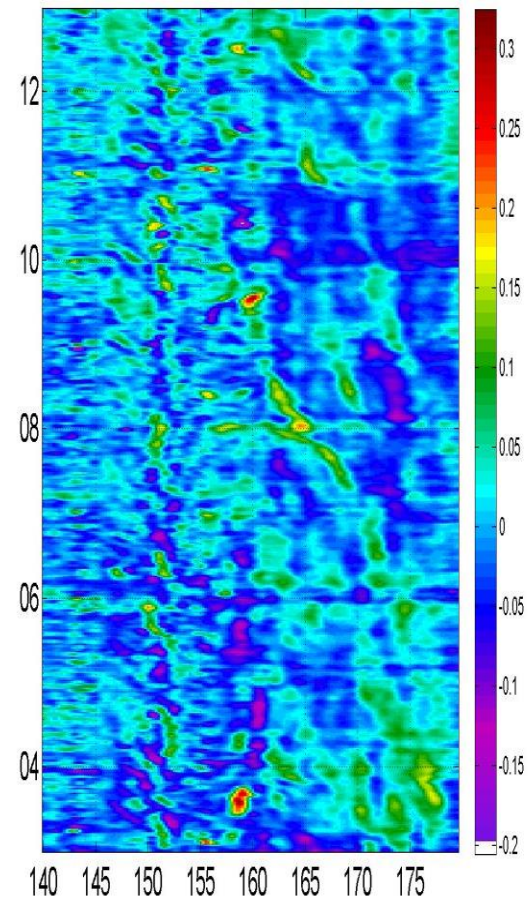
ADT Pacific_North_filtseas. Y(46)



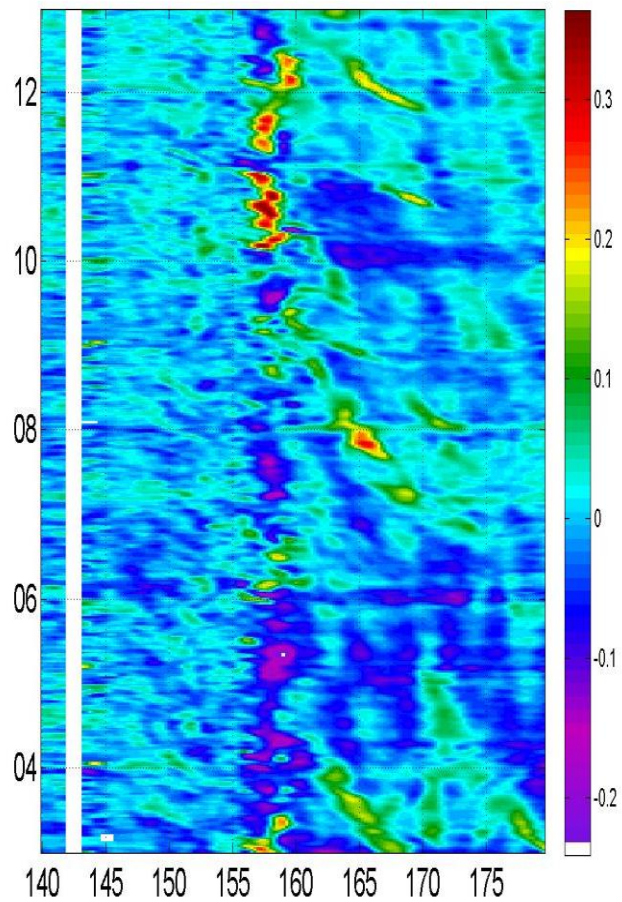
ADT Pacific_North_filtseas. Y(47)



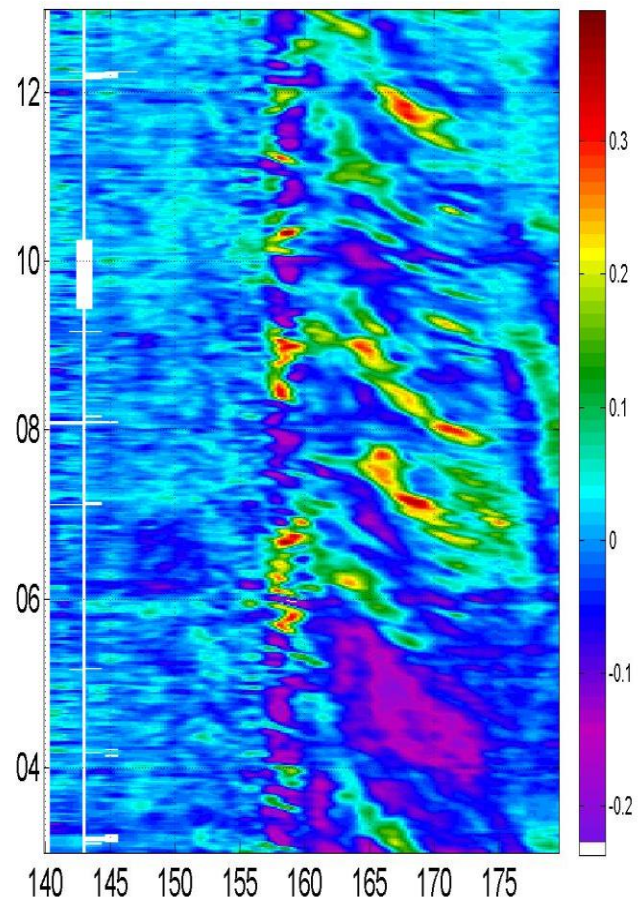
ADT Pacific_North_filtseas. Y(48)



ADT Pacific_North_filtseas. Y(49)

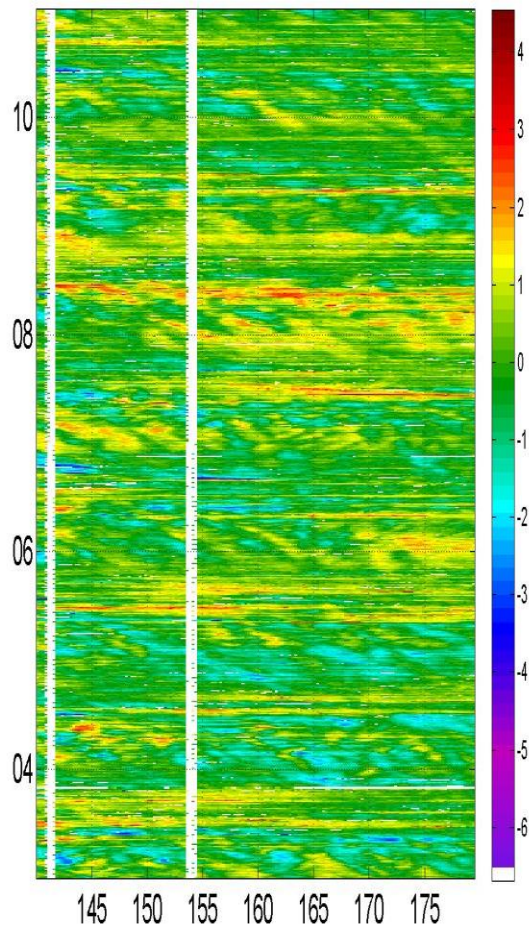


ADT Pacific_North_filtseas. Y(50)

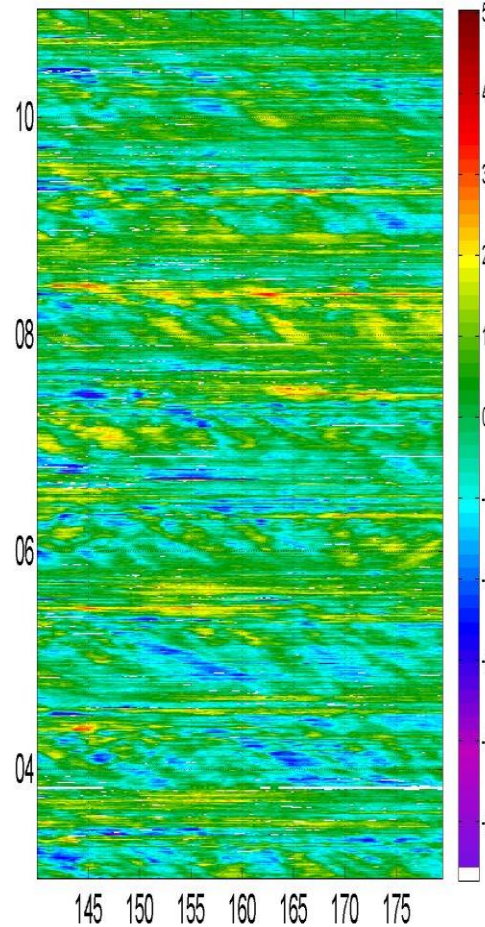


Данные о температуре морской поверхности (SST) загружаются с бесплатного архива спутниковых данных REMSS NASA. Данные представляют собой продукты уровня обработки Level 3 версии 7, полученные по измерениям пассивных микроволновых радиометров AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer). Облачность прозрачна для измерений в микроволновом диапазоне. Данные доступны с 2002 по 2011 года и имеют пространственное разрешение $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ и временное разрешение 1 день. Данные AMSR недоступны в прибрежной зоне (<40 км от берега), поскольку в этой зоне на форму сигнала значительно влияет суша. <http://www.remss.com/>

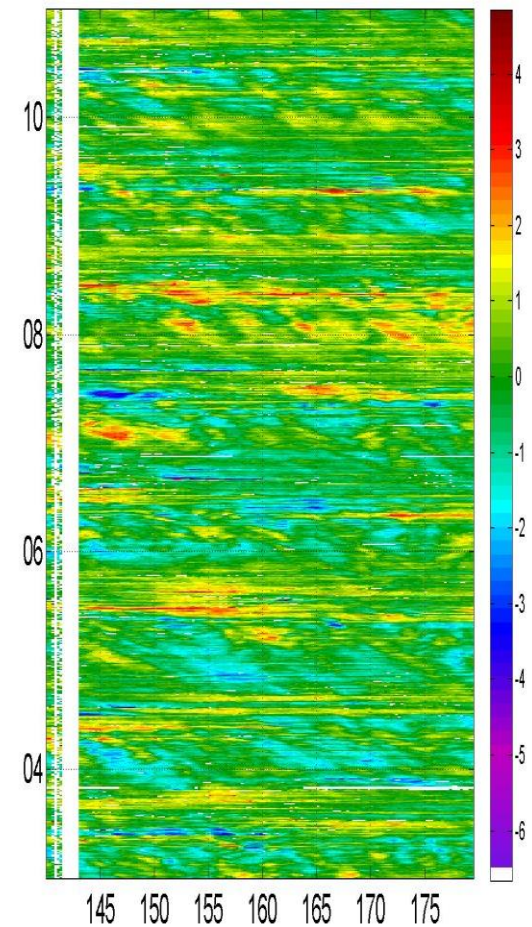
SST AMSRE Pacific_North_Iltseas. Y(25)



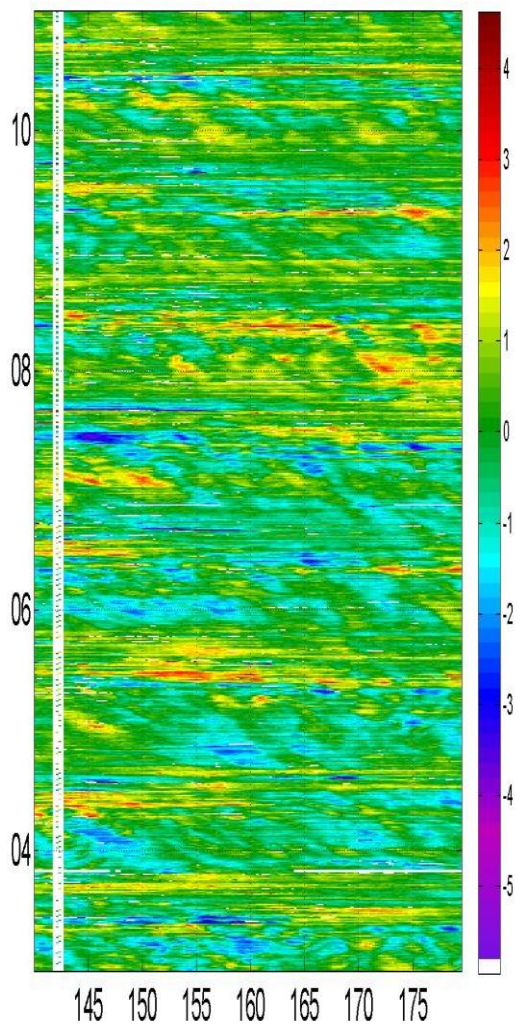
SST AMSRE Pacific_North_Iltseas. Y(26)



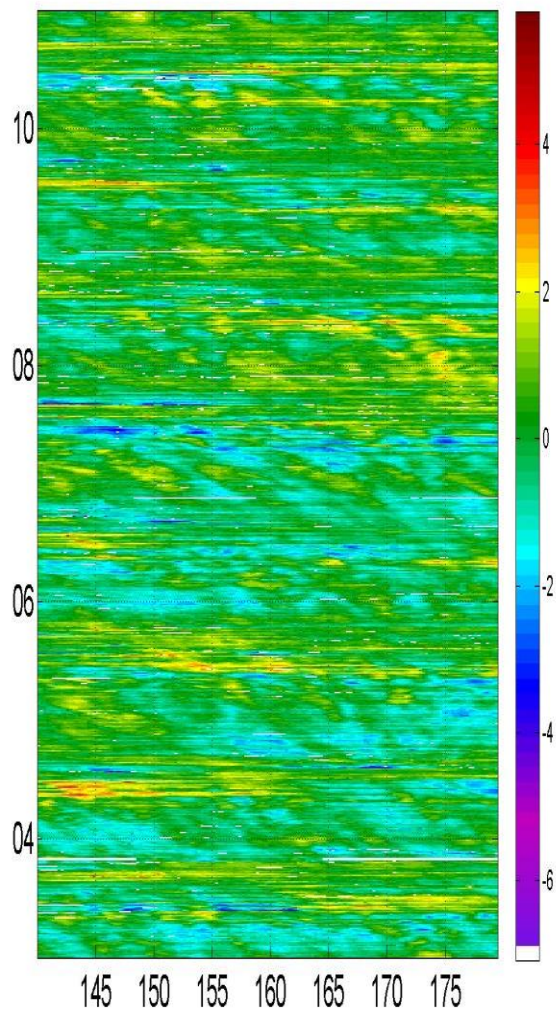
SST AMSRE Pacific_North_Iltseas. Y(27)



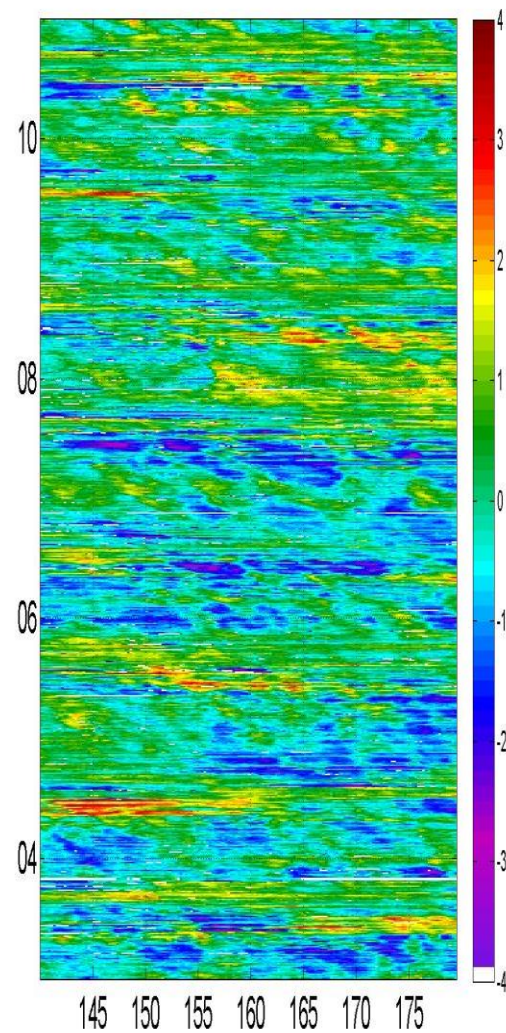
SST AMSRE Pacific_North_Iltseas. Y(28)



SST AMSRE Pacific_North_Iltseas. Y(29)



SST AMSRE Pacific_North_Iltseas. Y(30)



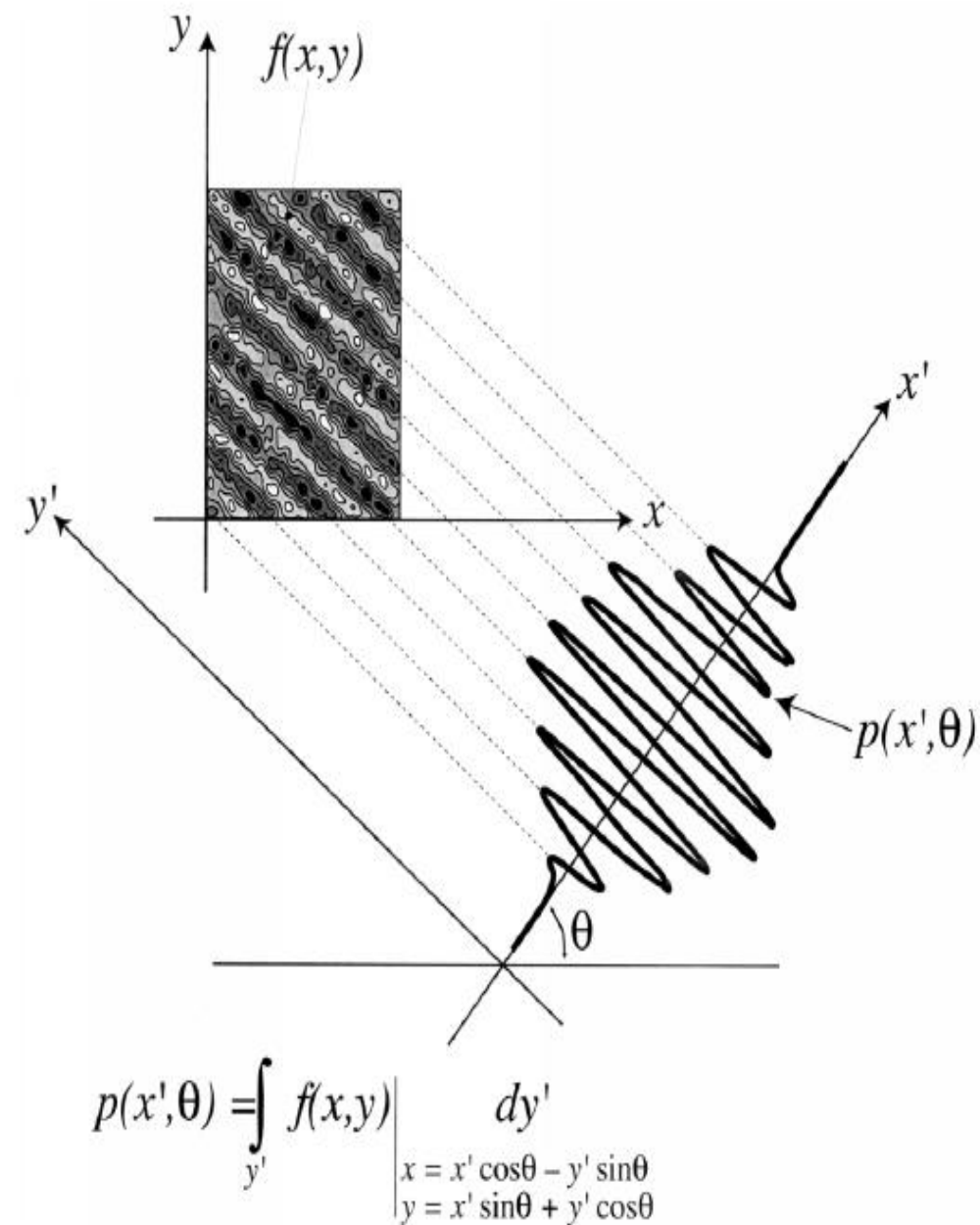


FIG. 1. Schematic of the 2D RT of a longitude–time section (see text for details).

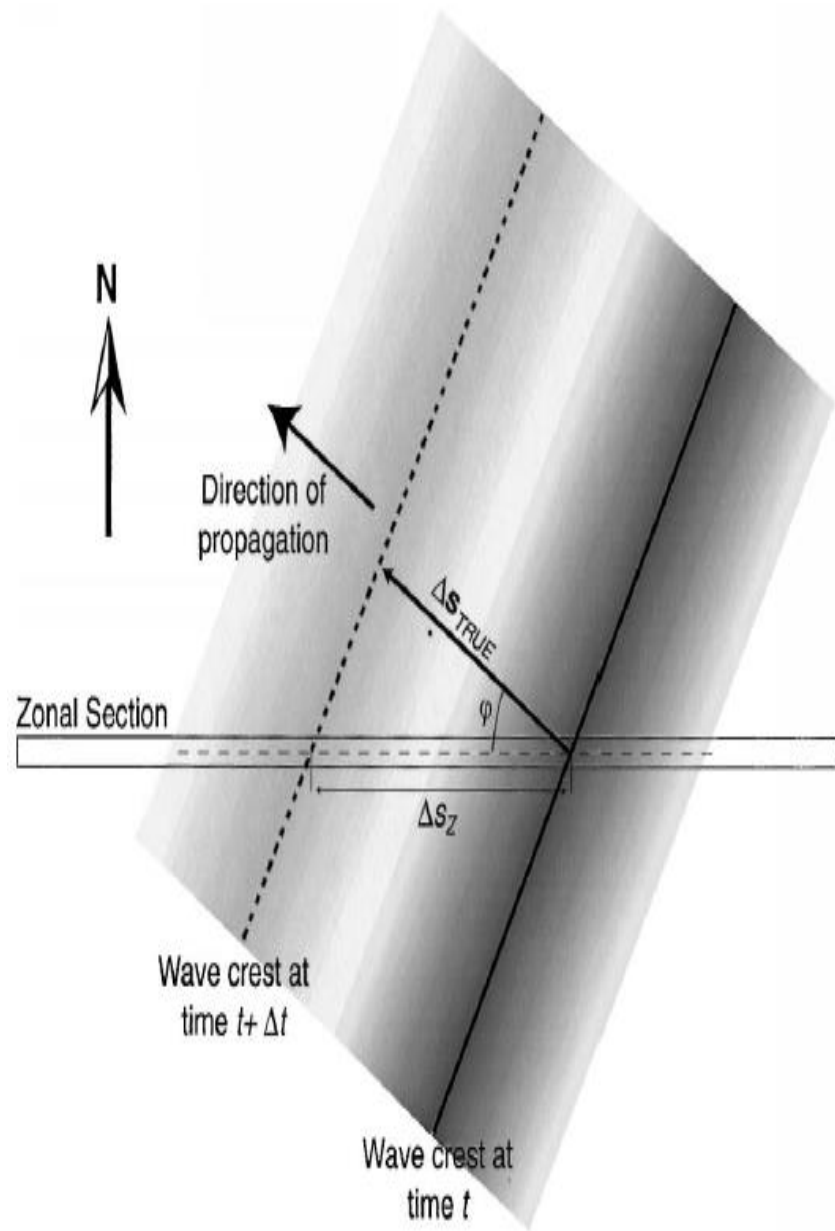


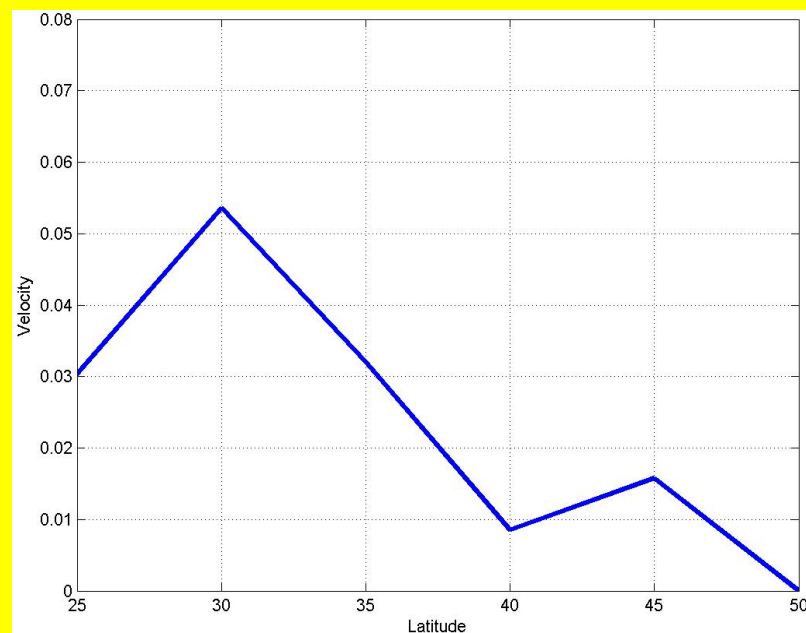
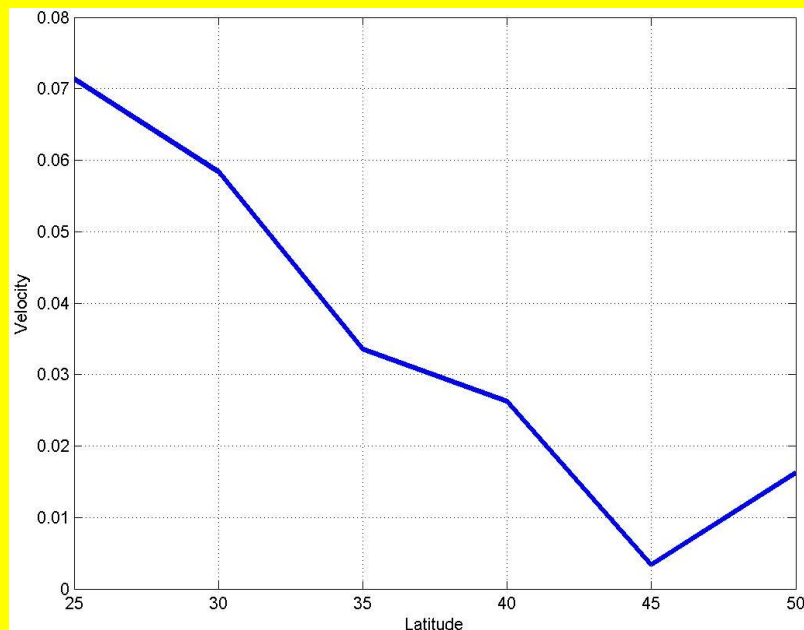
FIG. 2. Example of nonpurely zonal wave propagation. The zonal phase speed is $v_z = \Delta s_Z / \Delta t = 1 / \Delta t (|\Delta s_{\text{TRUE}}| / \cos\varphi)$.

Use of the 3D Radon Transform to Examine the Properties of Oceanic Rossby Waves

PETER G. CHALLENGOR, PAOLO CIPOLLINI, AND DAVID CROMWELL

James Rennell Division for Ocean Circulation and Climate, Southampton Oceanography Centre, Southampton, United Kingdom

(Manuscript received 16 November 1999, in final form 22 January 2001)

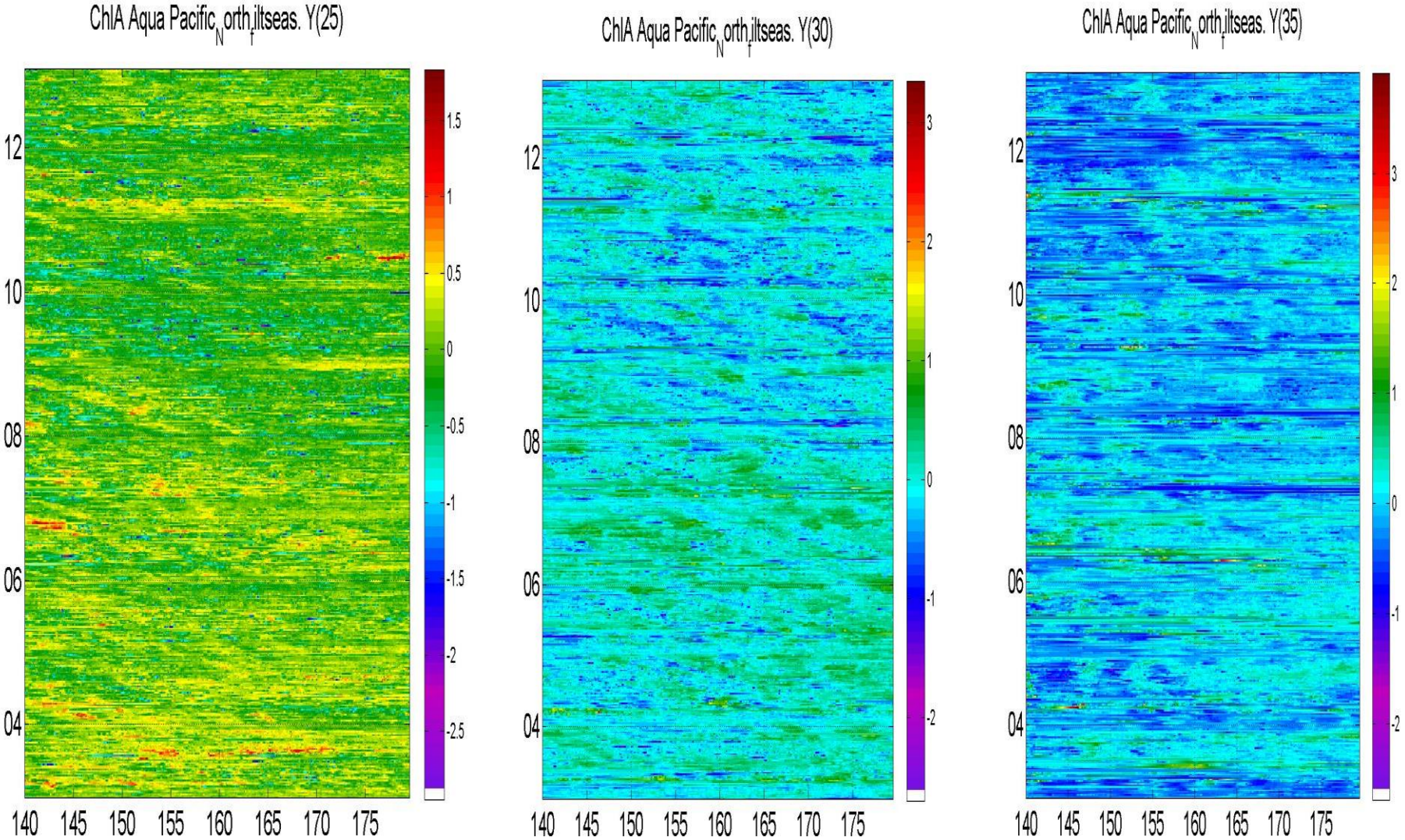


**Фазовые скорости (см/с) волн Россби,
определенные по рядам**

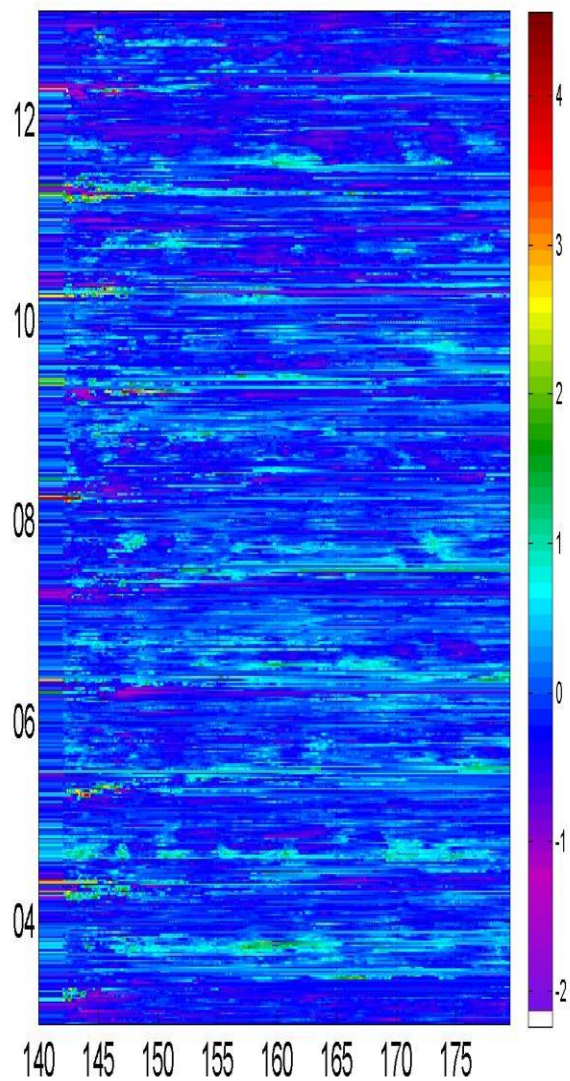
ADT (слева) и SST (справа)

Данные о концентрации хлорофилла-а (Chl-a) загружаются с бесплатного архива спутниковых данных NOAA Oceanscolor. Данные представляют собой продукты уровня обработки Level 3, полученные с помощью стандартных алгоритмов коррекции по измерениям радиометра MODIS-Aqua в оптическом диапазоне. Данные доступны с 2002 по 2013 года и имеют пространственное разрешение 4 км. Временное разрешение 8 дней. Карты с разрешением более одного дня определяются с помощью среднего по всем безоблачным данным, полученным за соответствующий период.

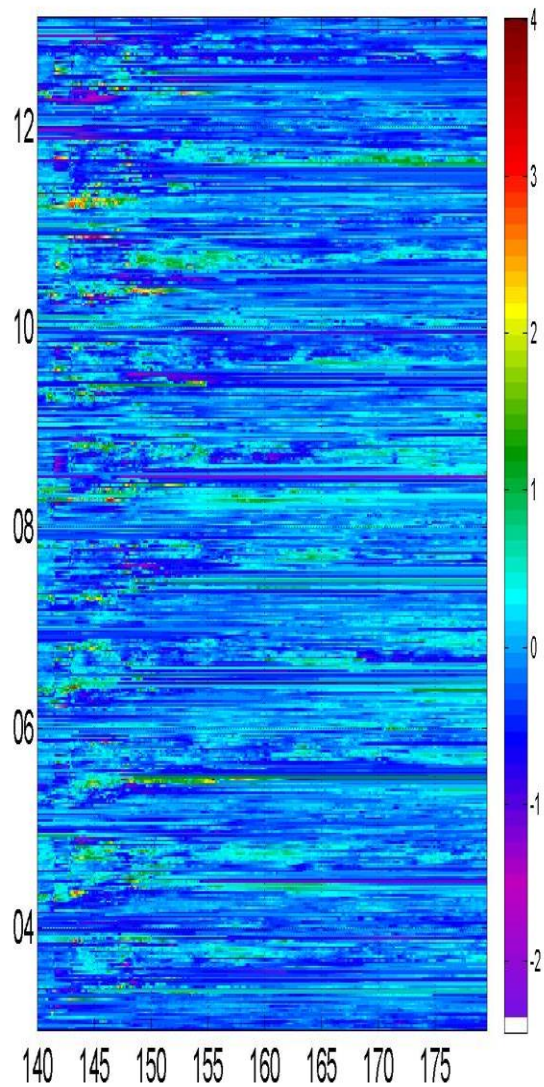
<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>



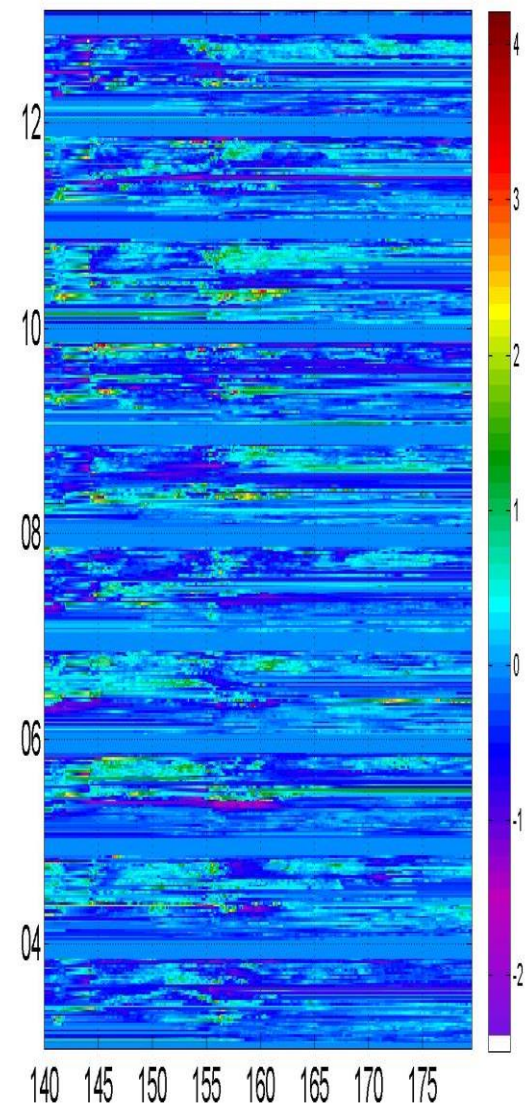
ChlA Aqua Pacific_N orth₁iltseas. Y(40)



ChlA Aqua Pacific_N orth₁iltseas. Y(45)



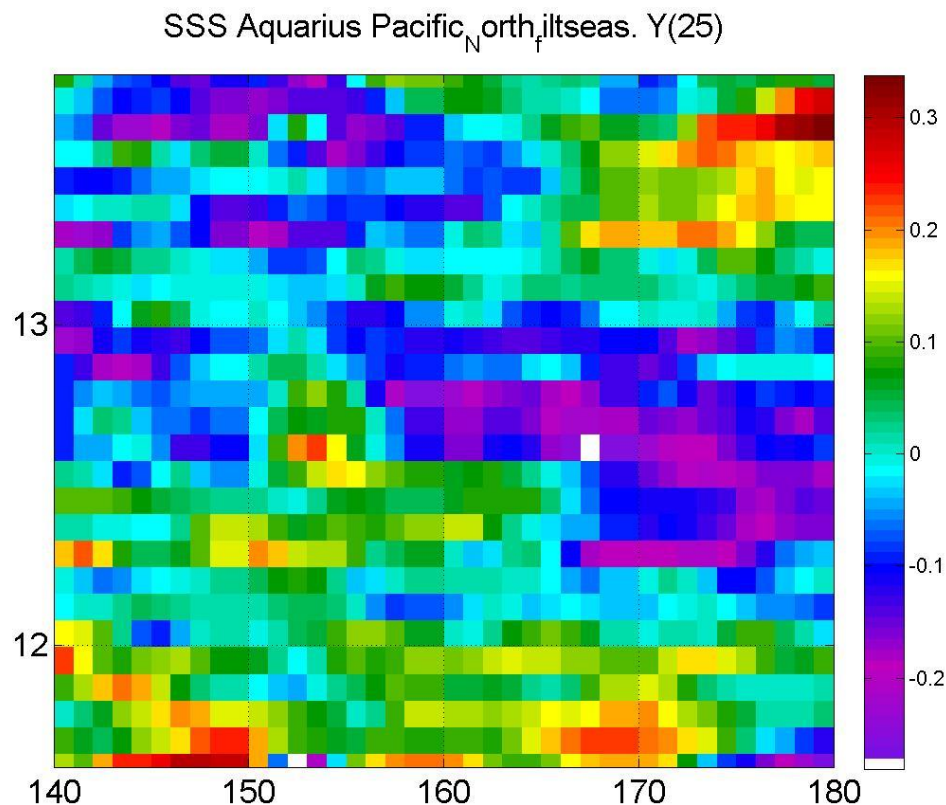
ChlA Aqua Pacific_N orth₁iltseas. Y(50)



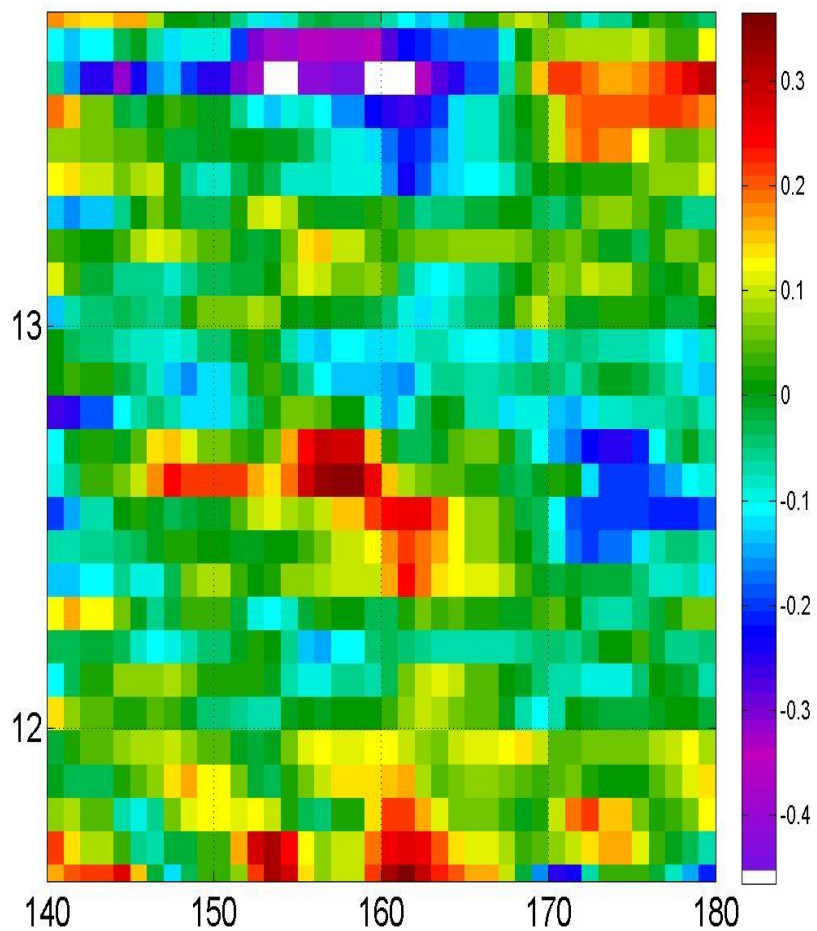
Данные о солёности морской поверхности (SSS) спутника Aquarius^[1] загружаются с бесплатного архива Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology^[2]. Данные за период: август 2011 по сентябрь 2013 представляют собой продукт обработки Level 3 с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и временной дискретностью 7 дней.

[1] QUARIUS/SAC-D satellite, a collaborative effort between NASA and the Argentinian Space Agency Comision Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)

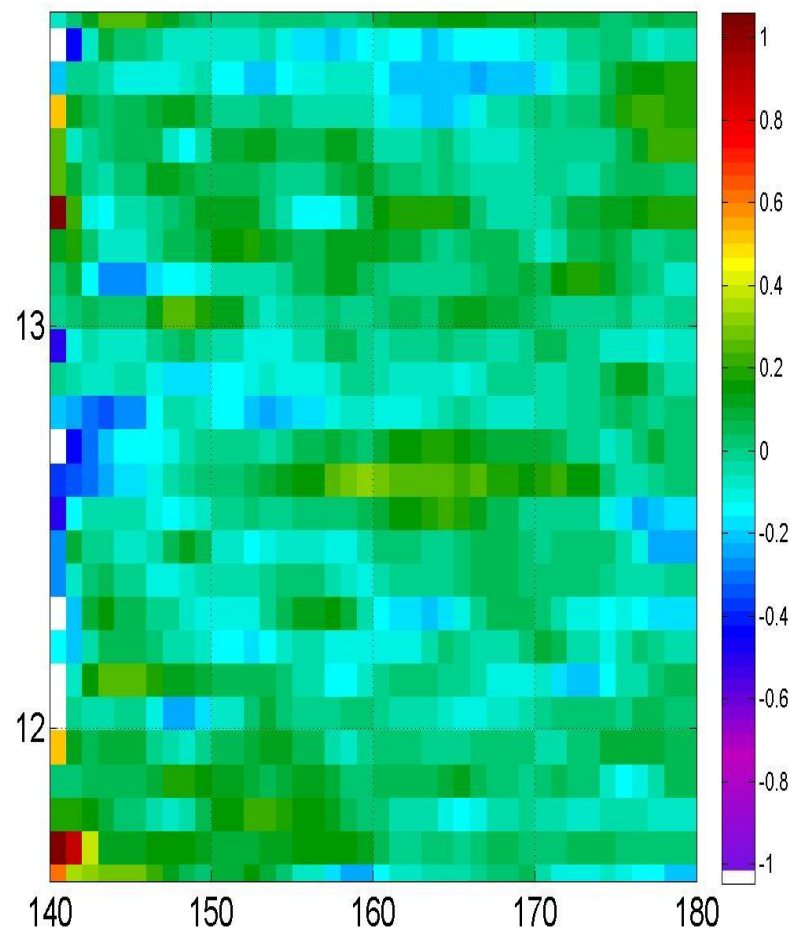
[2] <http://podaac.jpl.nasa.gov/aquarius>



SSS Aquarius Pacific_N orth_filtseas. Y(30)

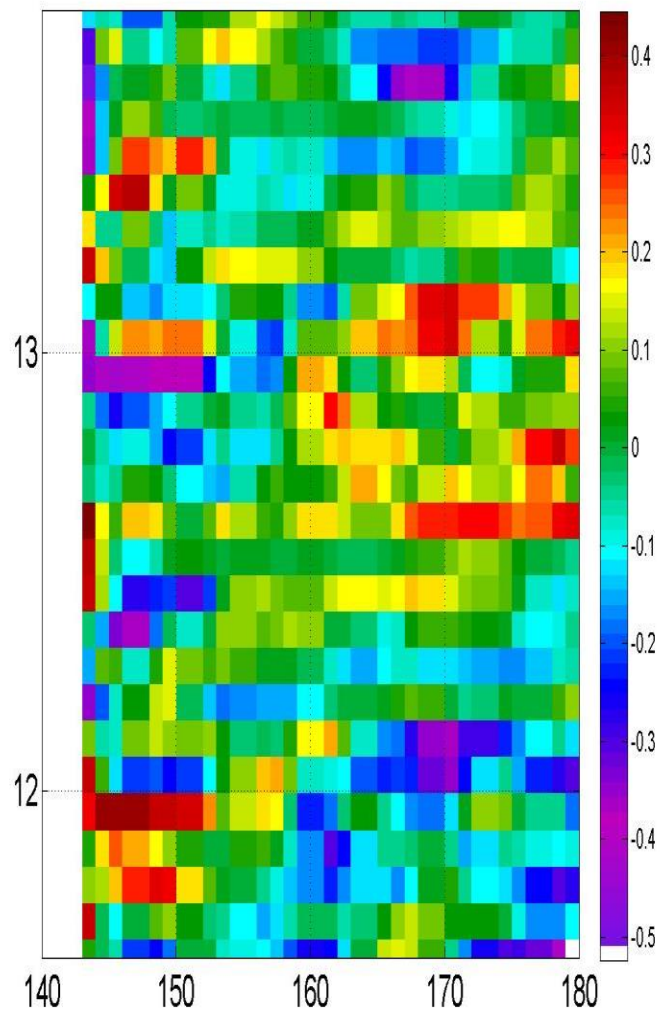


SSS Aquarius Pacific_N orth_filtseas. Y(35)

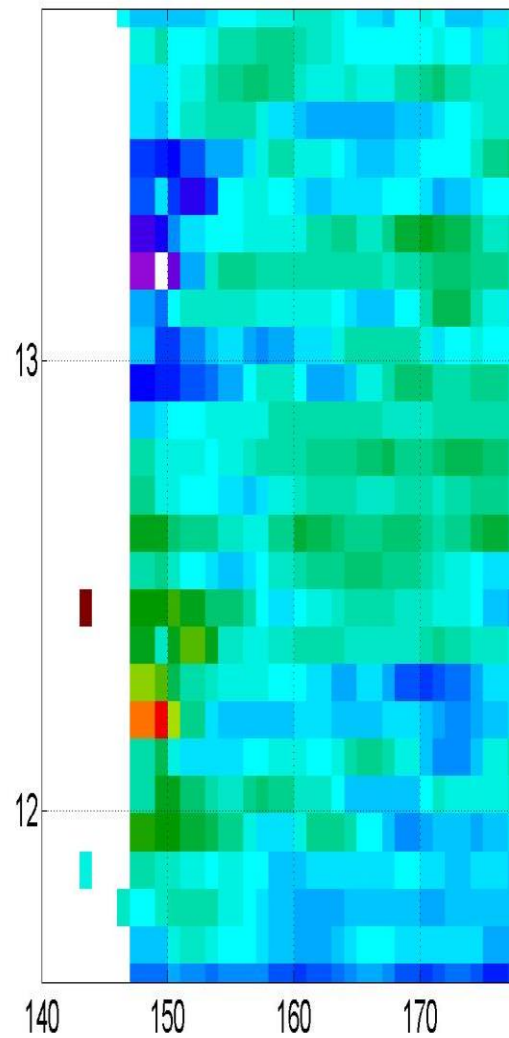


Зональные изоплеты солености морской поверхности (SSS) спутника Aquarius

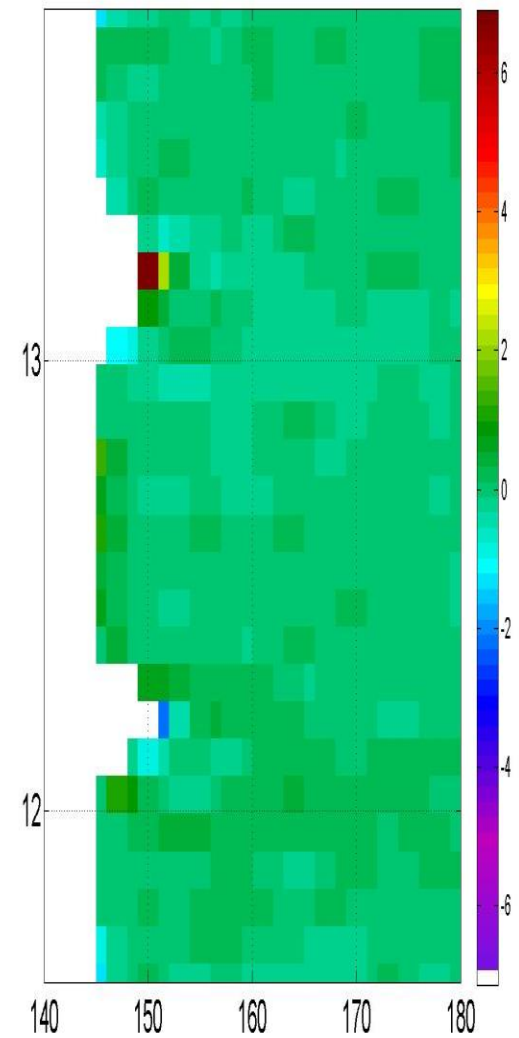
SSS Aquarius Pacific_North,ltseas. Y(40)



SSS Aquarius Pacific_North,ltseas. Y(45)



SSS Aquarius Pacific_North,ltseas. Y(50)



Спасибо за внимание!