

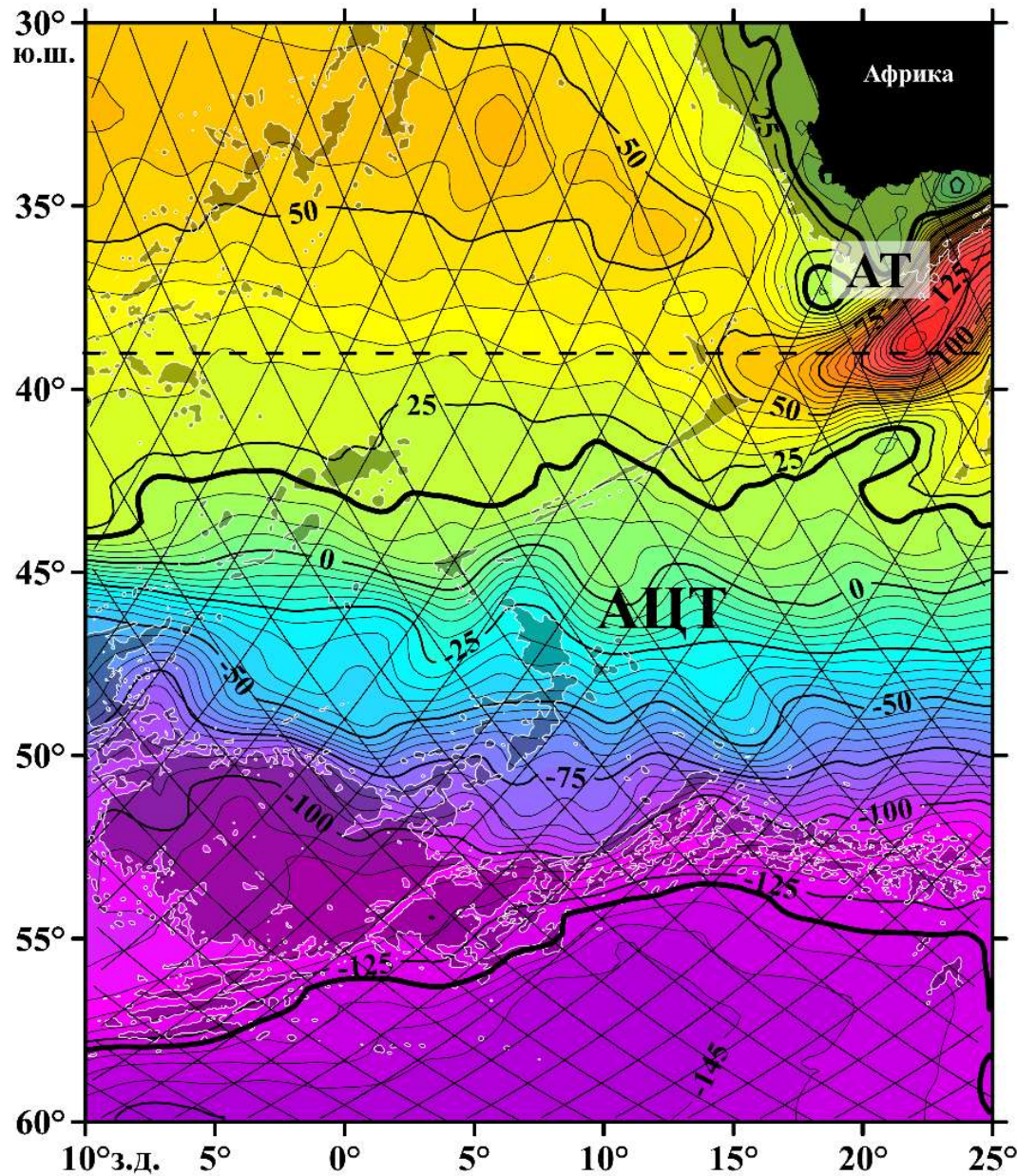
**Колебания струйной структуры
Антарктического циркумполярного
течения к югу от Африки по данным
спутниковой альтиметрии: расчет
временных рядов и средние
характеристики**

Р. Ю. Тараканов (rtarakanov@gmail.com)

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН



Средняя АДТ (см) для сектора Южного океана к югу от Африки (10°з.д.–25°в.д.)



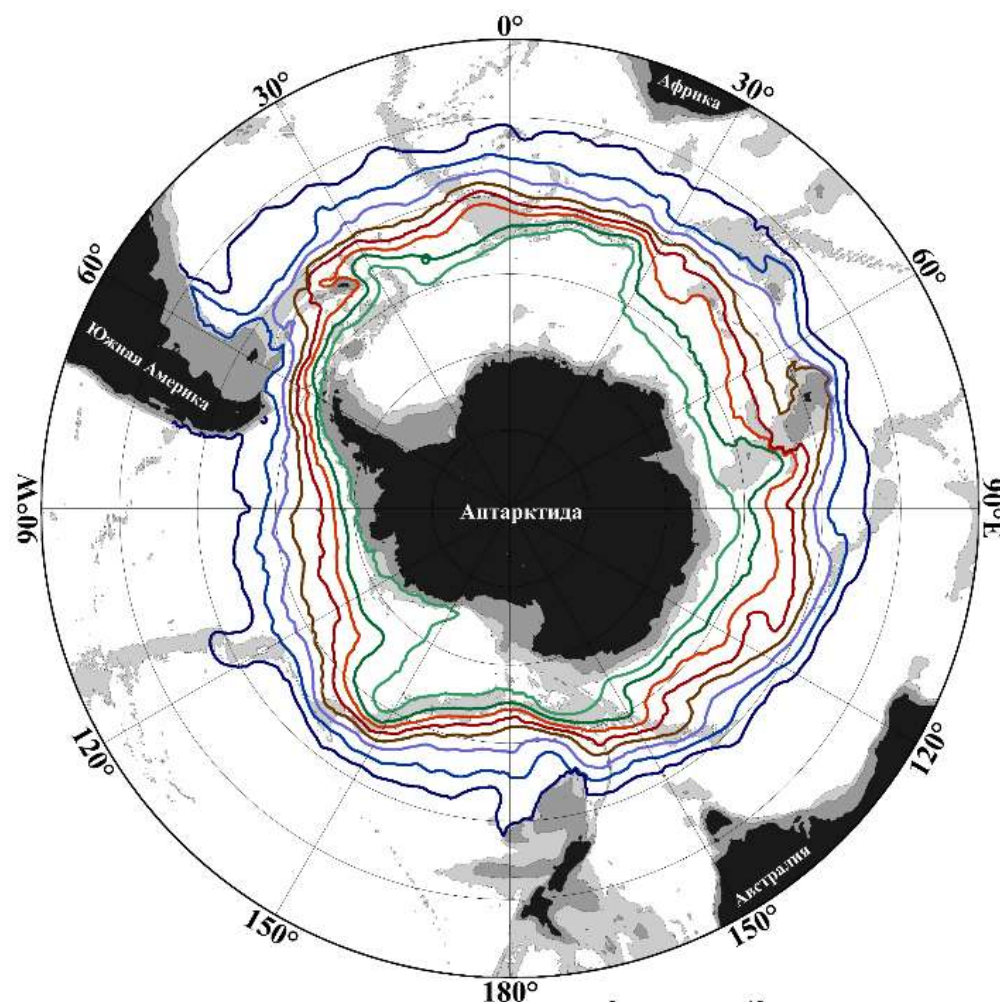
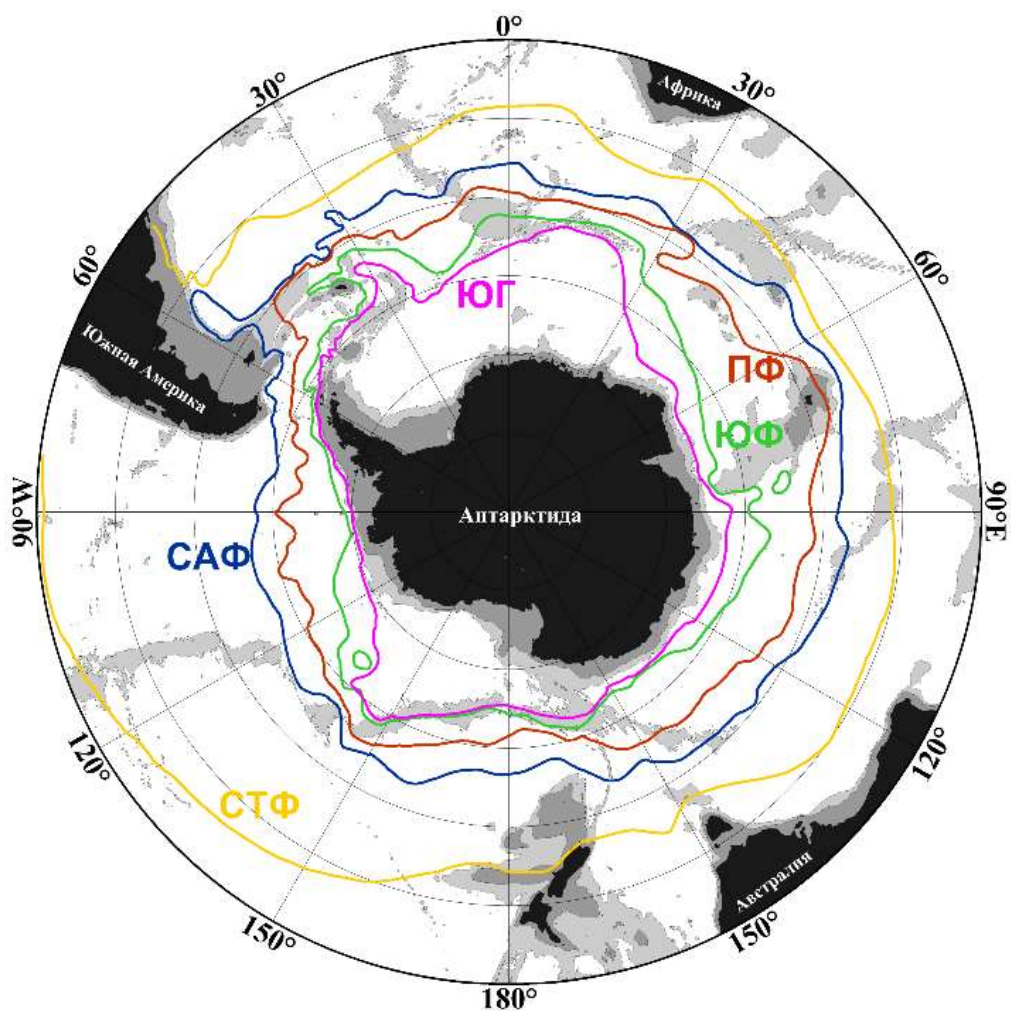
АЦТ – Антарктическое
циркумполярное
течение
АГ – Агульясское течение

Жирные изогипсы – условные границы АЦТ

Косые линии – основные треки спутников с альтиметрами (наклонение орбиты – 66°, период ≈ 10 сут.), штриховая – линия отсечения циклонов АД

Струи АЦТ по [Orsi et al., 1995]

Струи АЦТ по [Sokolov, Rintoul, 2009]



3 струи АЦТ:
САФ – Субантарктический фронт
ПФ – Полярный фронт
ЮФ – Южный фронт АЦТ

8 струй АЦТ:
3 струи САФ
3 струи ПФ
2 струи ЮФ АЦТ

Струи АЦТ во всем циркумполярном круге и во времени привязываются к одним и тем же изогипсам [Sokolov, Rintoul, 2009]. Такой вывод подразумевает стягивание кольца АЦТ к Антарктиде, вследствие роста уровня океана.

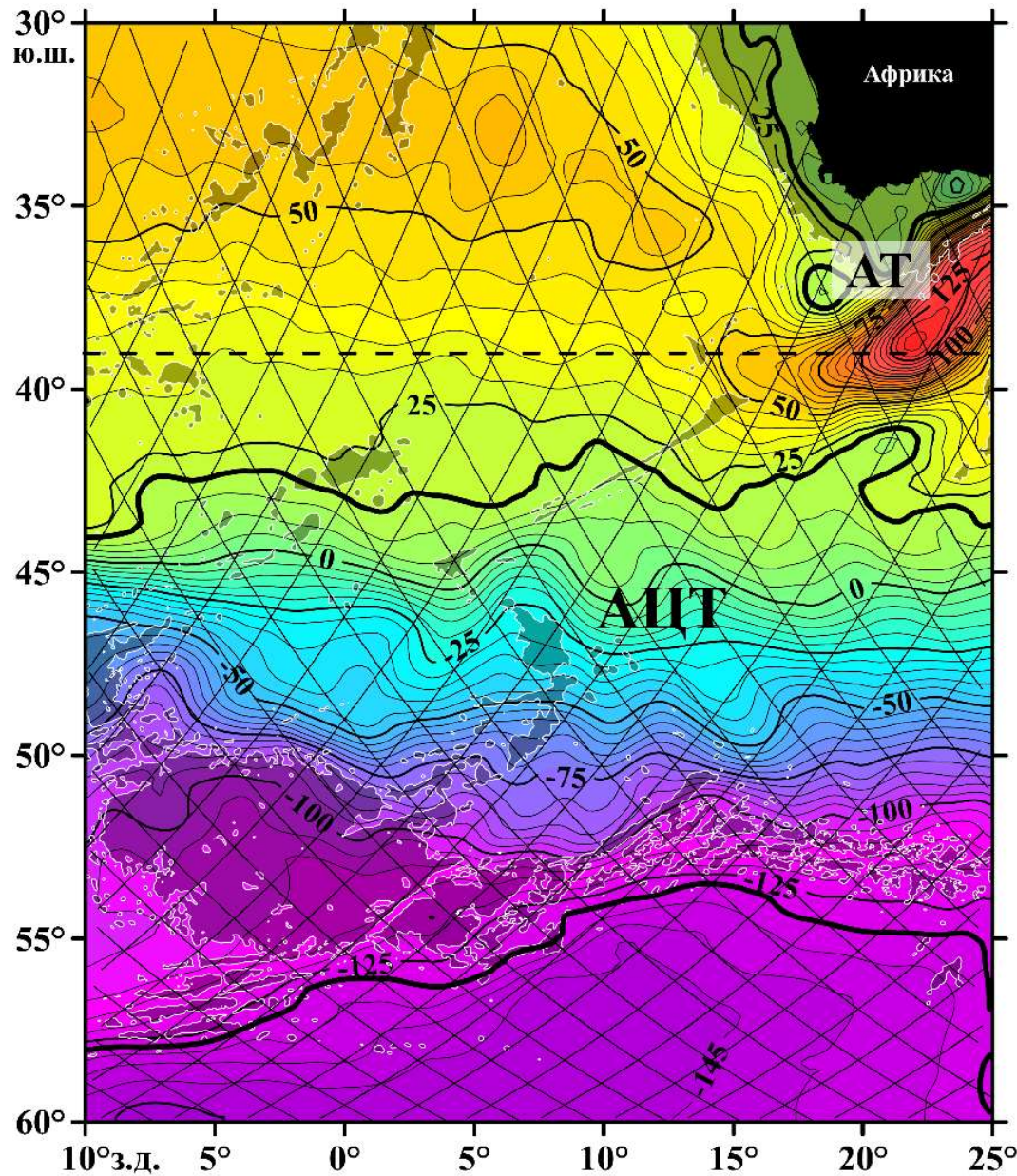
Большая часть современных исследований не обнаруживает систематического долгосрочного меридионального смещения струй АЦТ [Chapman et al., 2020]

Данные

Ежедневные данные по АДТ с сеткой $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ за период 1993–2018 из продукта SEALEVEL_GLO_PHY_L4_REP_OBSERVATIONS_008_047, который производится и распространяется Службой мониторинга морской и окружающей среды Copernicus (CMEMS) (<http://marine.copernicus.eu>).

Данные представляют собой **сумму средней (по времени) АДТ MDT CNES-CLS18 и мгновенной аномалии уровня океана (АУО)**, определяемой на основе измерений спутниковых альтиметров. Средняя АДТ рассчитывается на основе данных измерений температуры и солености в толще океана, измерений скорости течений дрейфующими буями, данных спутниковых альтиметрических наблюдений, модели геоида, построенной по данным спутниковых измерений, модели средней уровенной поверхности моря и данных реанализа ветра, а данные АУО интерполированы с треков спутников, прописываемых на поверхности Земли, на регулярную сетку для каждых суток.

Средняя АДТ (см) для сектора Южного океана к югу от Африки (10°з.д.–25°в.д.)

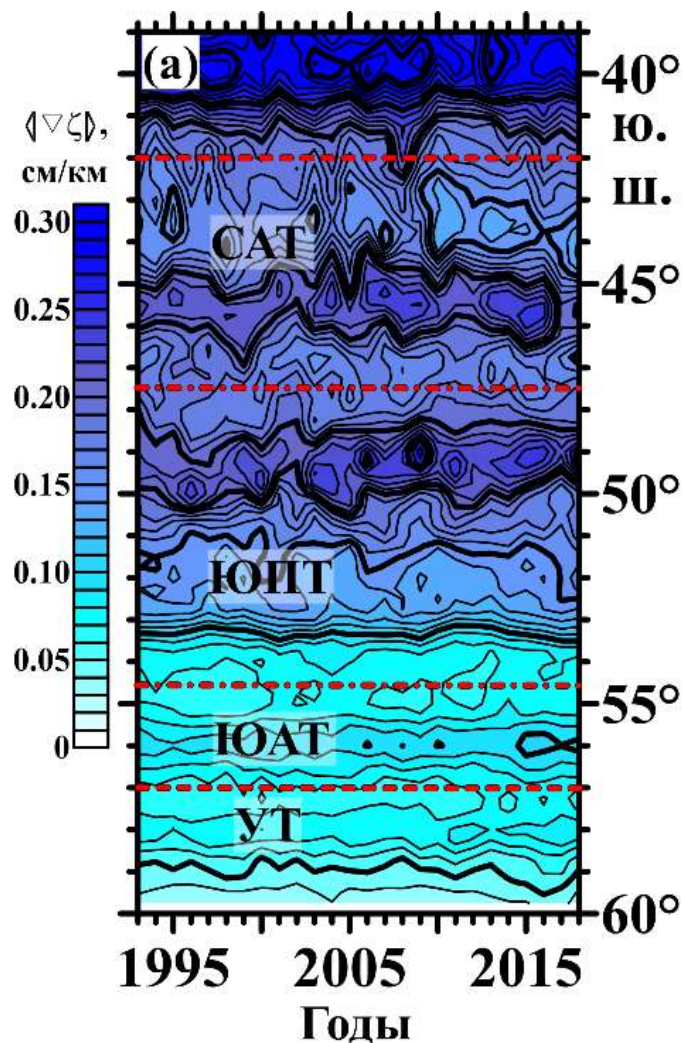


АЦТ – Антарктическое
циркумполярное
течение
АГ – Агульясское течение

Жирные изогипсы – условные границы АЦТ

Косые линии – основные треки спутников с альтиметрами (наклонение орбиты – 66°, период ≈ 10 сут.), штриховая – линия отсечения циклонов АГ

26-летний ряд среднегодовых кривых зависимости модуля градиента АДТ от широты



Условные зоны АЦТ:

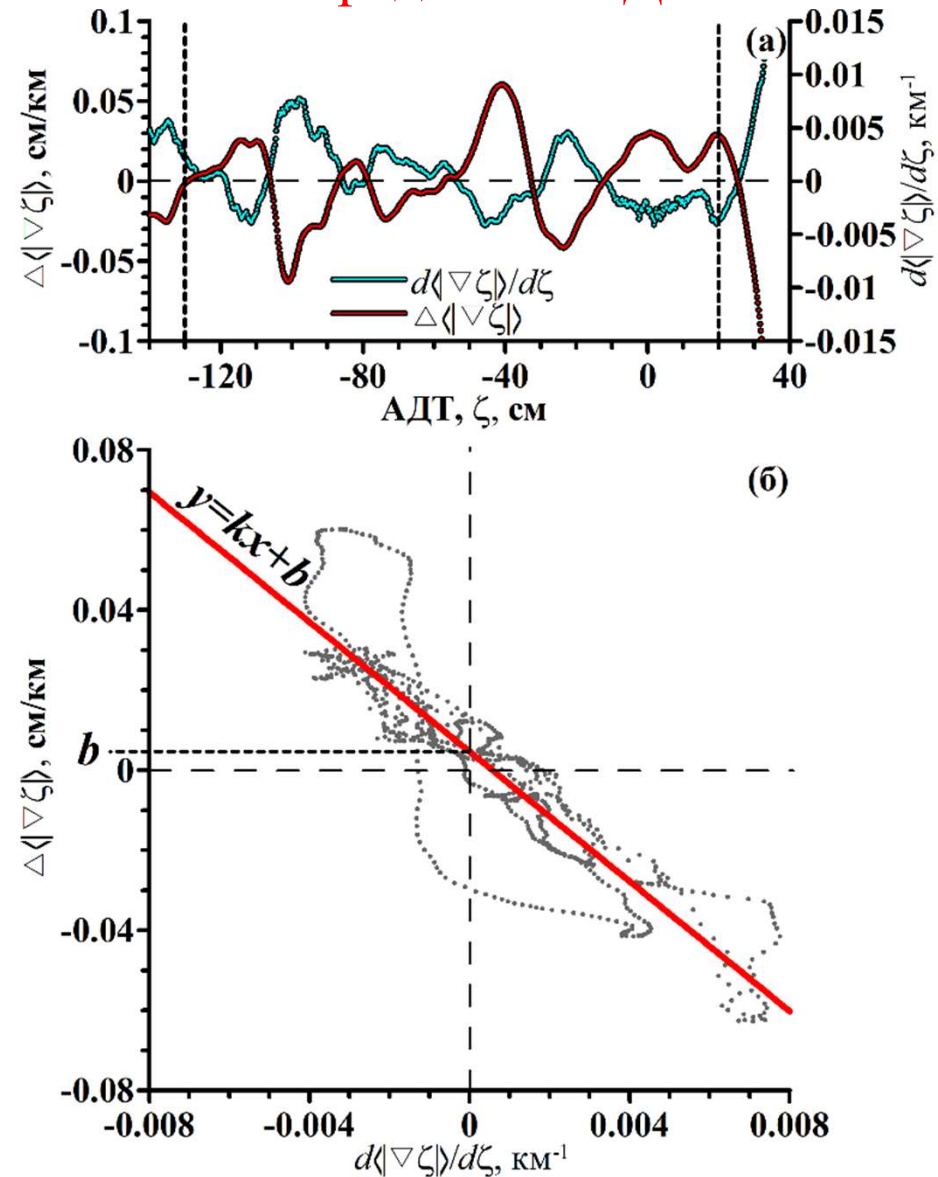
САТ – Субантарктическое течение

ЮПТ – Южное полярное течение

ЮАТ – Южное антарктическое течение

УТ – течение Уэдделла к югу от АЦТ

Кривые приращения модуля градиента АДТ и производной среднего за 26 лет модуля градиента АДТ



Расчет линейной регрессии между приращением модуля градиента АДТ и производной среднего за 26 лет модуля градиента АДТ

$$k(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y})(x_i - \tilde{x}) w_i}{\sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x})^2 w_i}$$

- линейный сдвиг формы кривых модуля градиента АДТ с обратным знаком (**сдвиг струйной структуры**)

$$b(x, y) = \tilde{y} - k(x, y) \tilde{x}.$$

- линейное изменение модуля градиента АДТ (**изменение интенсивности течения**)

В этих формулах:

Производная по широте от среднего градиента АДТ

$$x_i = \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{2\Delta a}, \quad \text{где } X_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L h_{i,l}$$

Изменение модуля градиента АДТ на данной широте

$$y_i = k(t, h_i) = \frac{\sum_{l=1}^L (h_{i,l} - \bar{h}_i)(t_l - \bar{t})}{\sum_{l=1}^L (t_l - \bar{t})^2},$$

$h_{i,l}$ – осредненное за l -й год значение модуля градиента АДТ на i -й широте

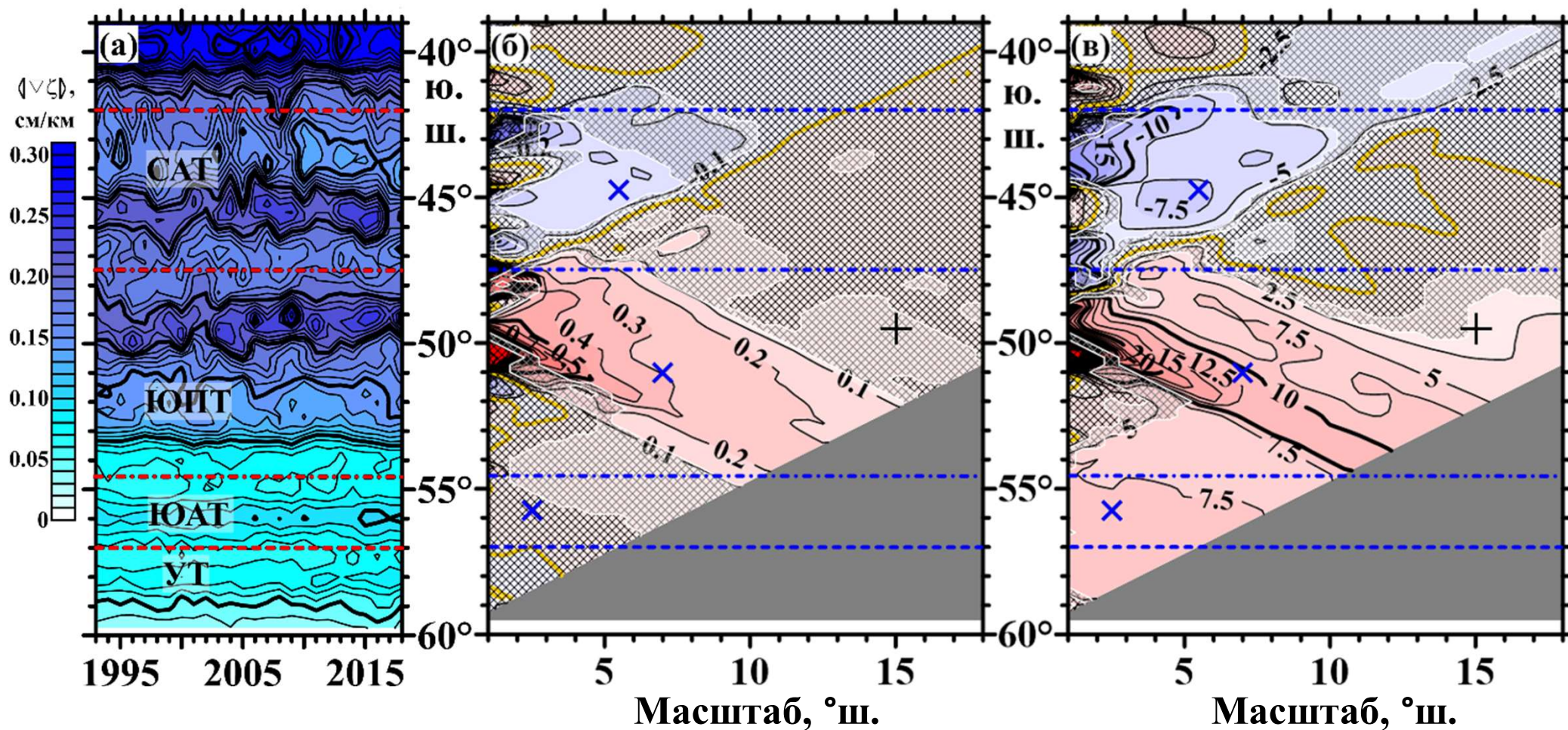
Знак тильда – осреднение по параметру a (широте):

Черта сверху – осреднение по времени за 26 лет

26-летний ряд
Среднегодовых
кривых зависимости
модуля градиента
АДТ от широты

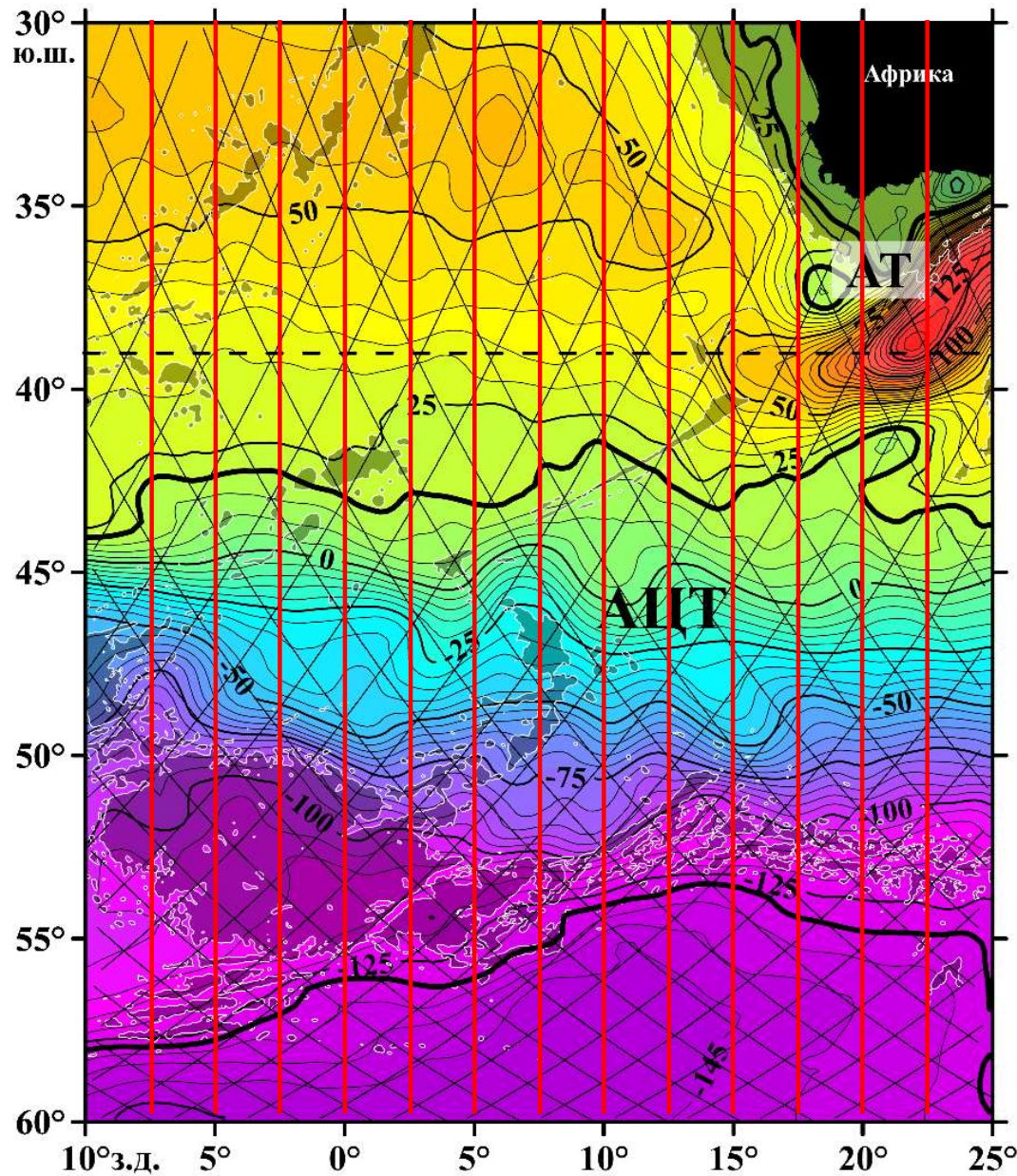
Линейный сдвиг струйной
структуры (формы
среднегодовых кривых
модуля градиента АДТ), °ш.

Линейное изменение
интенсивности течения
(модуля градиента АДТ,
 10^{-3} см/км (≈ 0.1 см/с))



Темная штриховка – величины оценок меньше стандартной
ошибки (67% уровня вероятности),
Светлая штриховка – менее 95% уровня вероятности

Средняя АДТ (см) для сектора Южного океана к югу от Африки (10°з.д.–25°в.д.)



АЦТ – Антарктическое
циркумполярное
течение
АТ – Агульясское течение

Ширина полос 2.5°д.

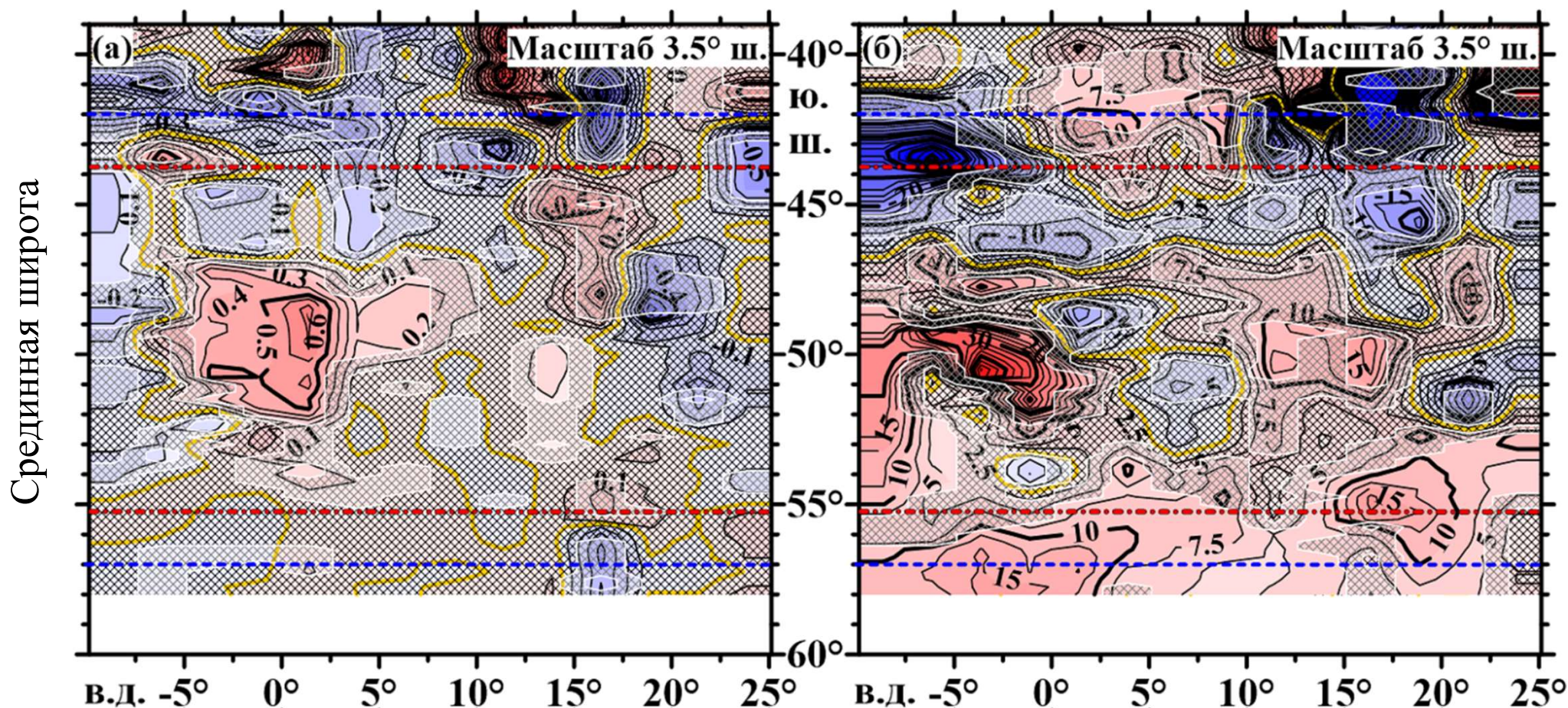
Жирные изогипсы – условные границы АЦТ

Косые линии – основные треки спутников с альтиметрами (наклонение орбиты – 66°, период ≈ 10 сут.), штриховая – линия отсечения циклонов АТ

Зональное распределение сдвига струйной структуры и изменение интенсивности течения на масштабе расчета 3.5° ш. (шаг – 2.5° д.)

Сдвиг, $^\circ$ ш.

Изменение интенсивности течения
(градиента АДТ, 10^{-3} см/км (≈ 0.1 см/с))

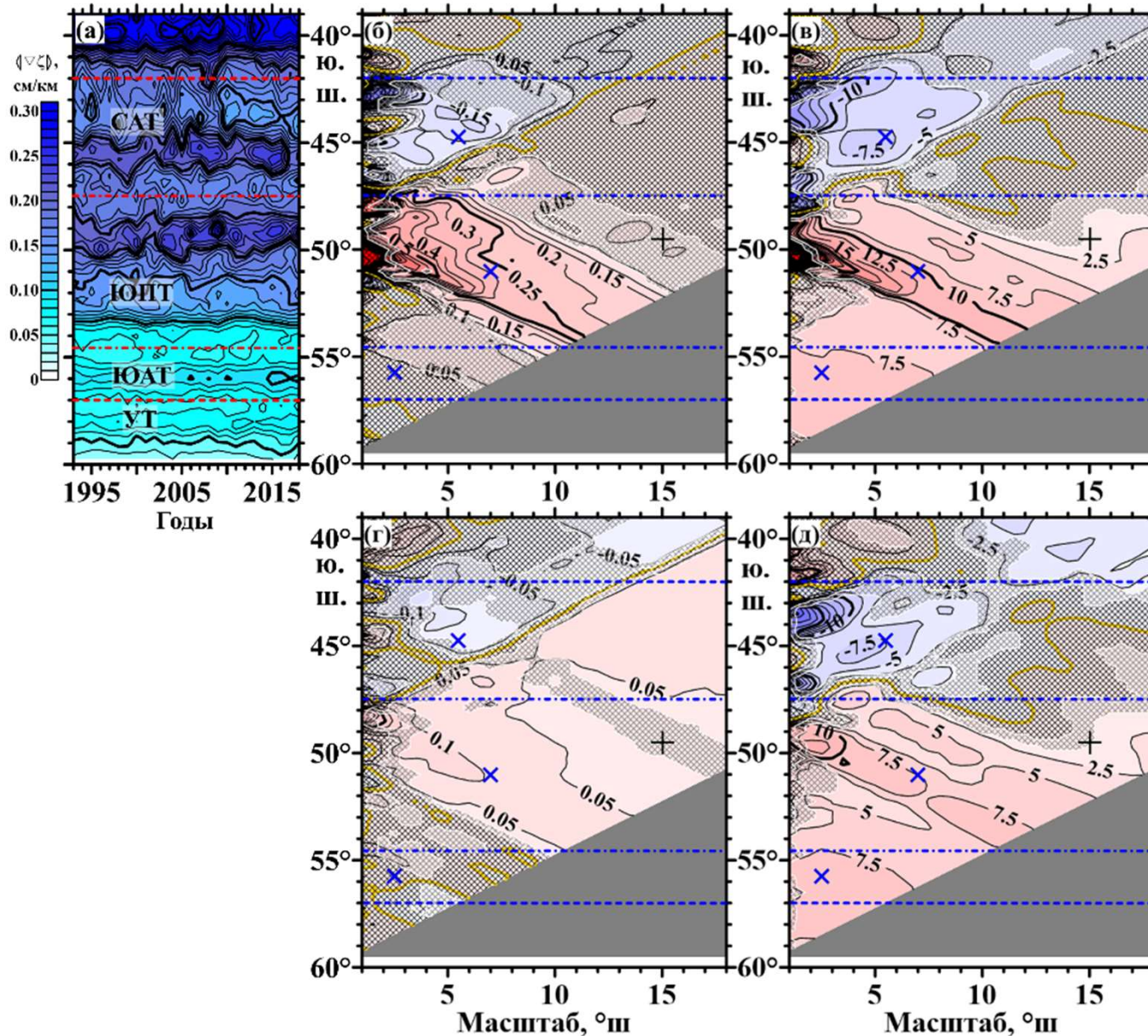


Распределение сдвига и изменения градиента АДТ неоднородно по долготе. Положительный сдвиг соответствует зоне между Срединноокеанским хребтом и цепочкой возвышенностей хребет Агульяс – поднятие Метеор – хребет Шона

Оценки меридионального сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течения без и с разделением на меридиональные полосы

Сдвиг, °ш.

Изменение интенсивности течения
(градиента АДТ, 10^{-3} см/км (≈ 0.1 см/с))



Расчет без
разделения на
меридиональные
полосы

Средняя широта

Расчет с
разделением на
меридиональные
полосы

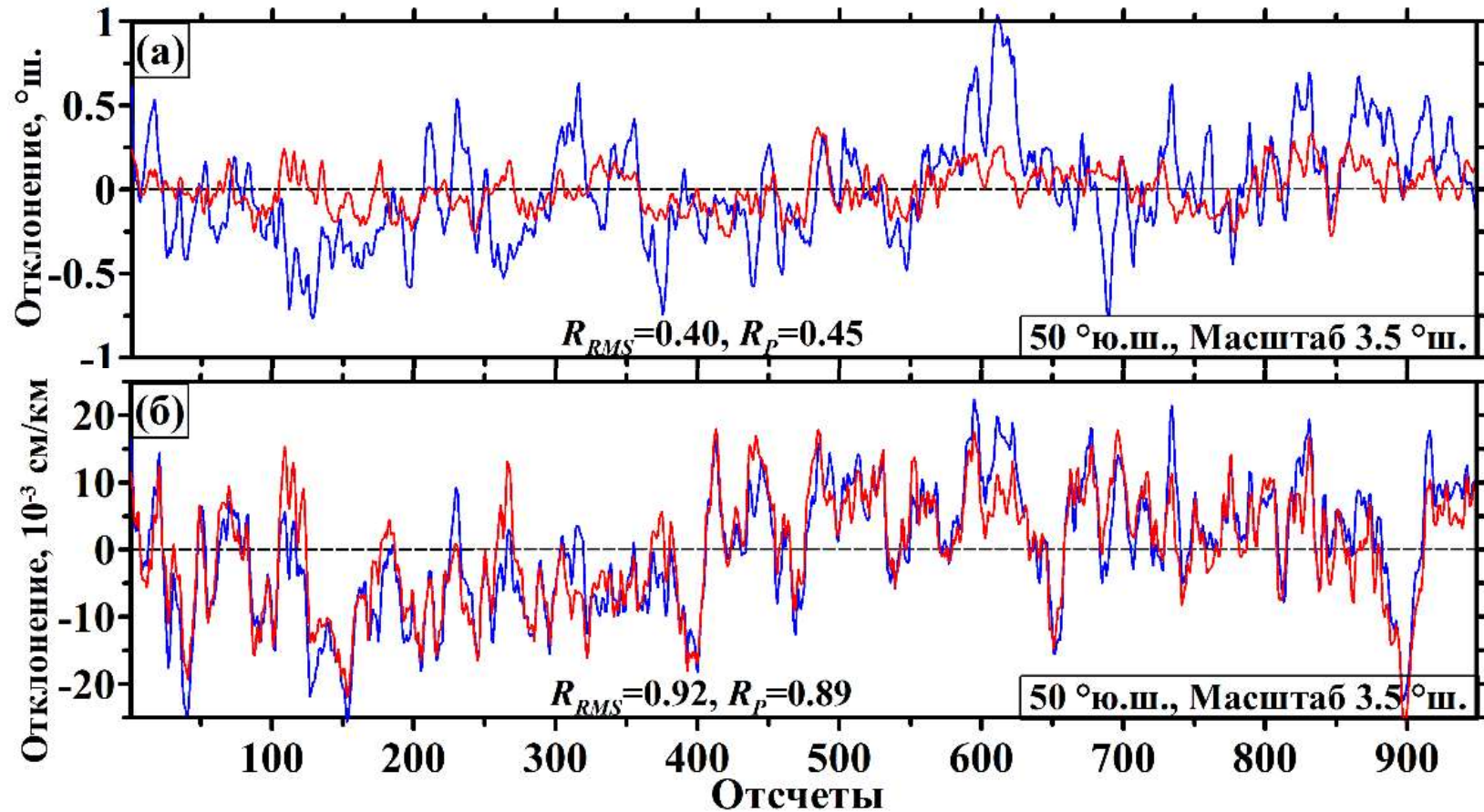
Качественно распределения сдвигов и изменения интенсивности течений совпадают, количественно – существенно различаются

Дальнейшее развитие исследования – выявление колебаний сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течений на разных периодах.

Для достижения этой цели необходимо:

1. Рассчитать соответствующие ряды с более высокой временной дискретностью в 10 суток, которые соответствуют периоду облета основных треков спутников T/P, Jason-1, -2, -3.
2. Провести массовый спектральный анализ этих рядов. Данная задача носит чрезвычайно объемный характер и в качестве предварительного шага требует оценки некоторых средних характеристик рядов.
3. Провести оценку амплитуд и фаз колебаний на конкретных периодах по методике разработанной ранее для оценки сезонных колебаний указанных параметров.

Примеры рядов сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течения в расчетах по всему сектору к югу от Африки без и с разделением на меридиональные полосы



$$R_P = \frac{\text{cov}(c, \bar{c})}{RMS(c)RMS(\bar{c})}$$

$$R_{RMS} = \frac{RMS(\bar{c})}{RMS(c)}$$

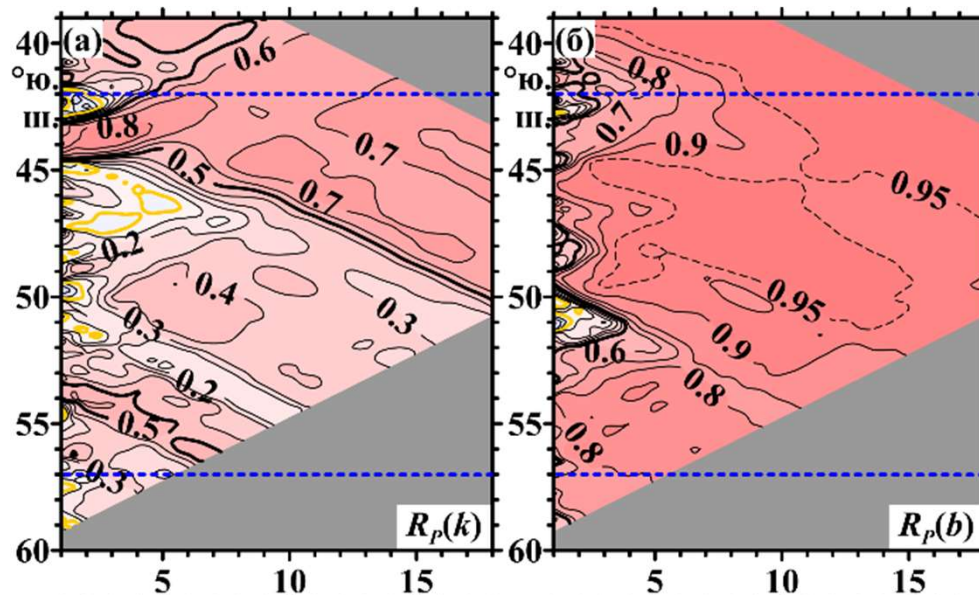
Ряды, построенные для всего сектора целиком в вариантах без разделения на меридиональные полосы и с разделением и последующим осреднением по набору полос, могут как существенно отличаться, так и быть практически идентичными друг другу.

Распределения коэффициентов корреляции Пирсона и отношений СКО рядов, рассчитанных без и с разделением на меридиональные полосы, в зависимости от масштаба расчета и средней широты

Сдвиг струйной структуры Изменение интенсивности течения

Корреляция Пирсона:

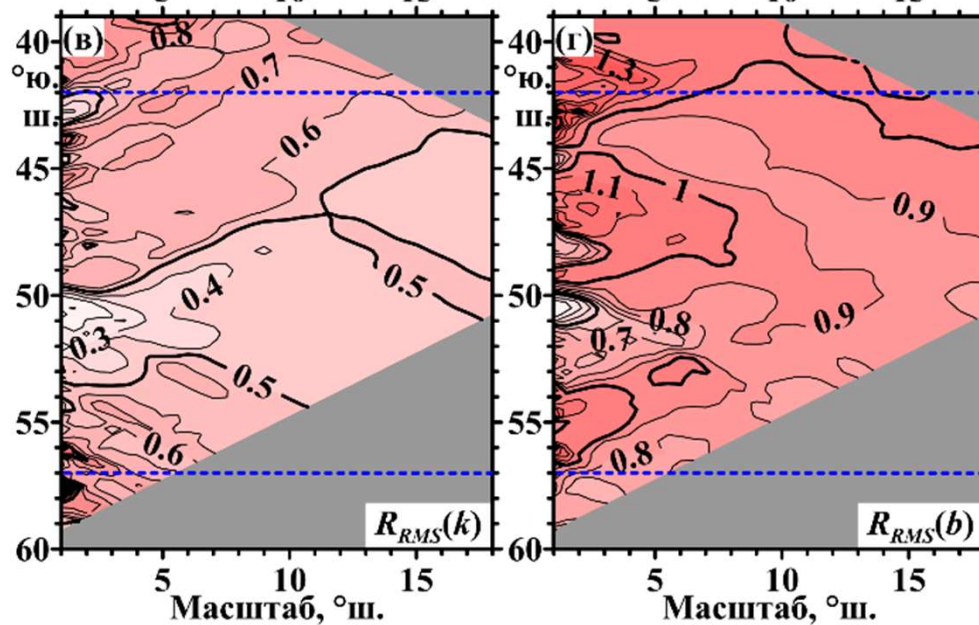
$$R_P = \frac{\text{cov}(c, \bar{c})}{RMS(c)RMS(\bar{c})}$$



Срединная широта

Отношение СКО:

$$R_{RMS} = \frac{RMS(\bar{c})}{RMS(c)}$$

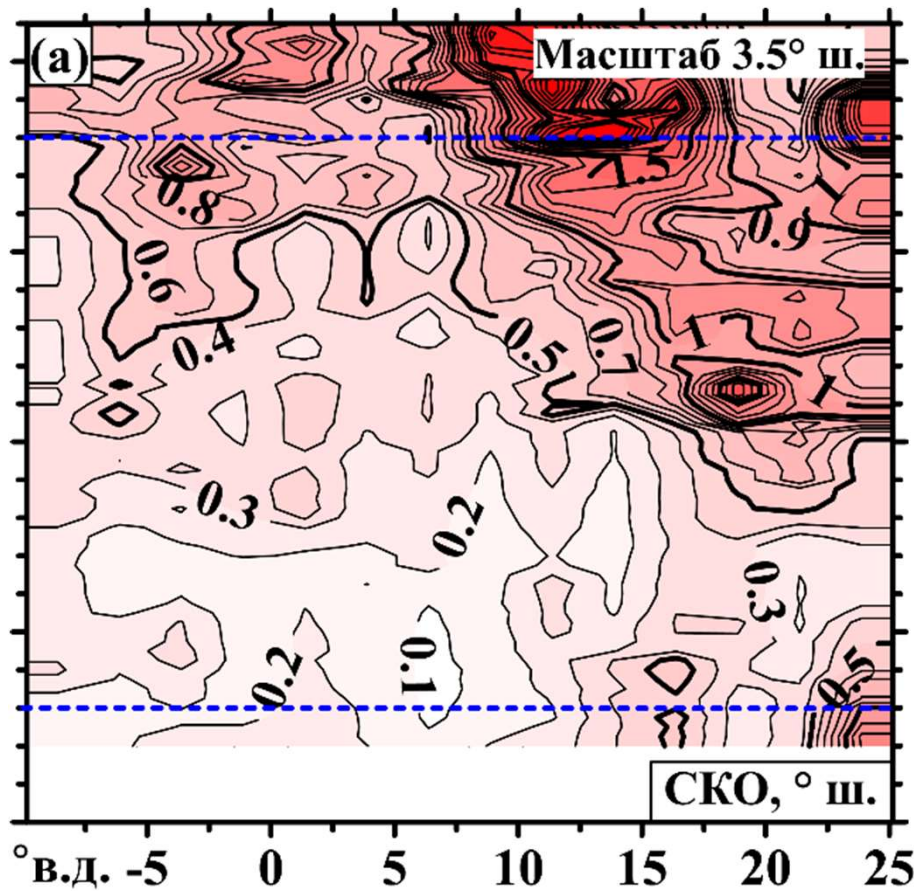


Масштаб, °ш.

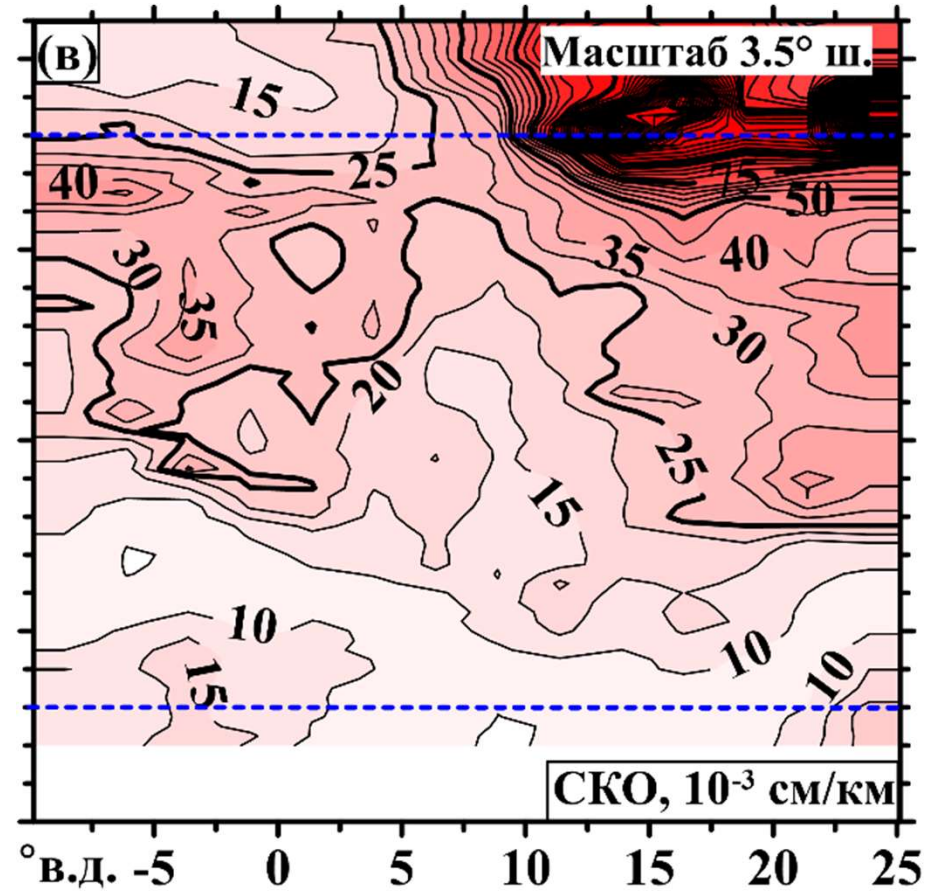
Масштаб, °ш.

Распределения СКО меридионального сдвига струйной структуры ($^{\circ}$ ш.) и изменения интенсивности течения (10^{-3} см/км) для сектора АЦТ к югу от Африки для разных масштабов расчета в зависимости от средней широты

Сдвиг, $^{\circ}$ ш.



Изменение интенсивности течения
(градиента АДТ, 10^{-3} см/км (≈ 0.1 см/с))

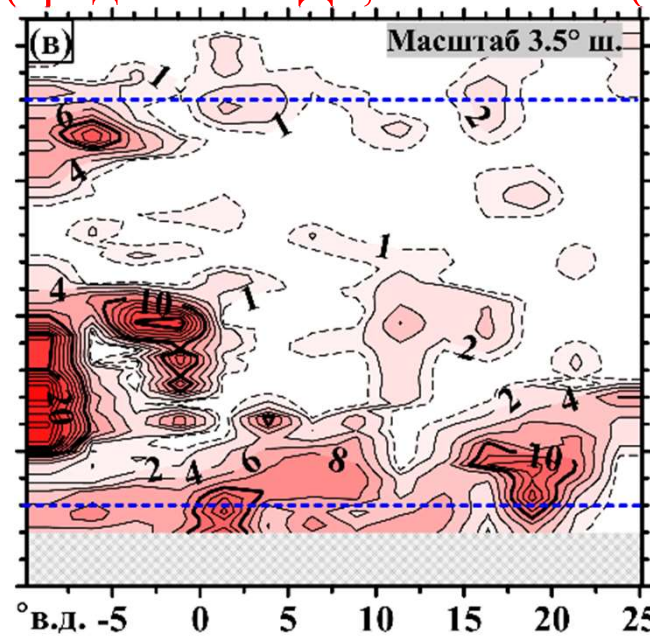
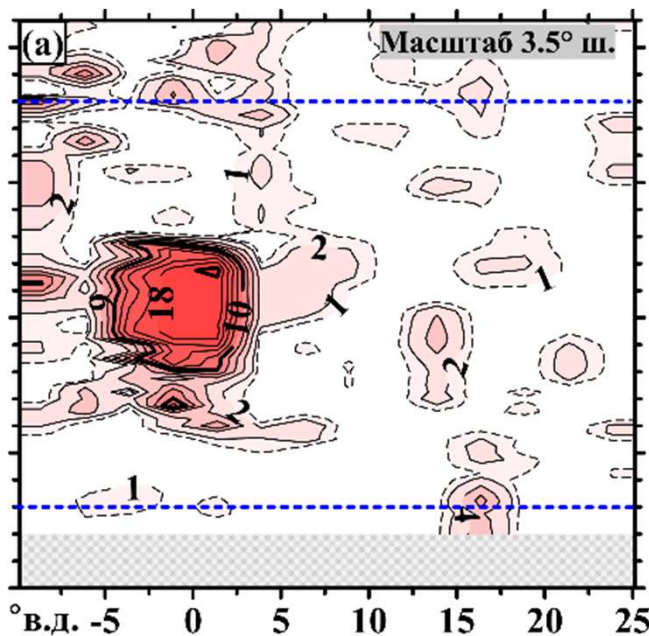


Распределения доли дисперсии колебаний (%), обусловленной долговременным линейным трендом, и линейных изменений меридионального сдвига струйной структуры ($^{\circ}$ ш.) и изменения интенсивности течения (10^{-3} см/км) для сектора АЦТ к югу от Африки

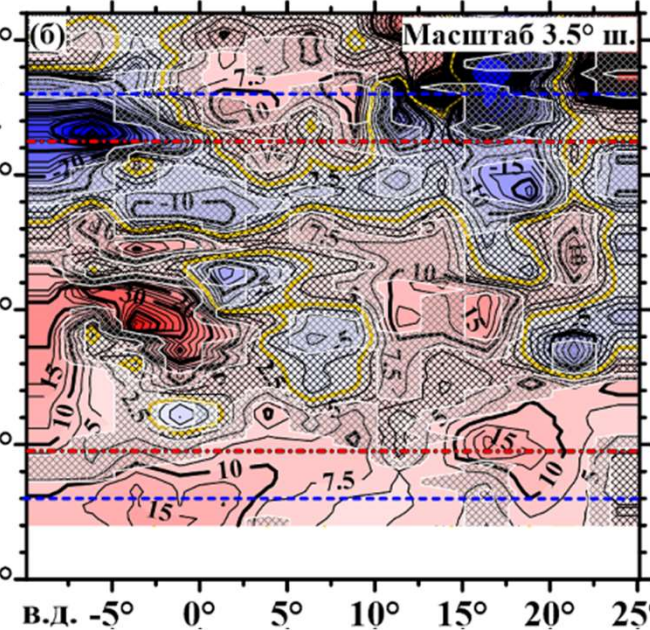
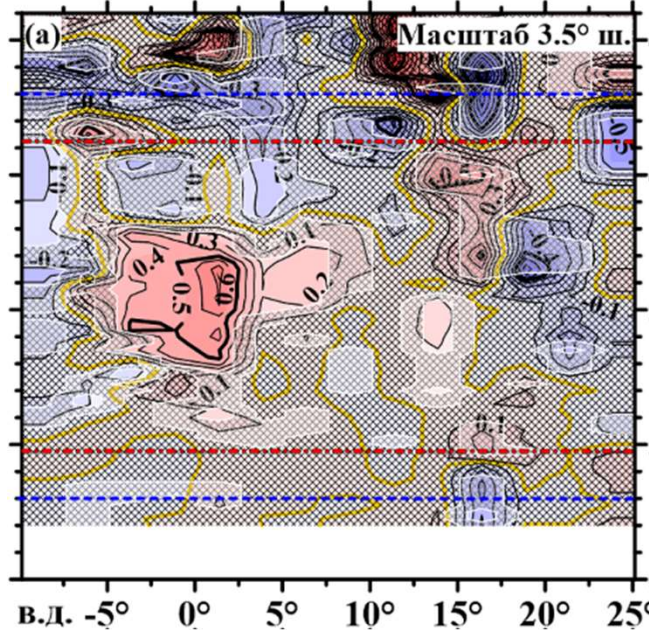
Сдвиг, $^{\circ}$ ш.

Изменение интенсивности течения
(градиента АДТ, 10^{-3} см/км (≈ 0.1 см/с))

Доля дисперсии



Линейное изменение параметров за 26 лет



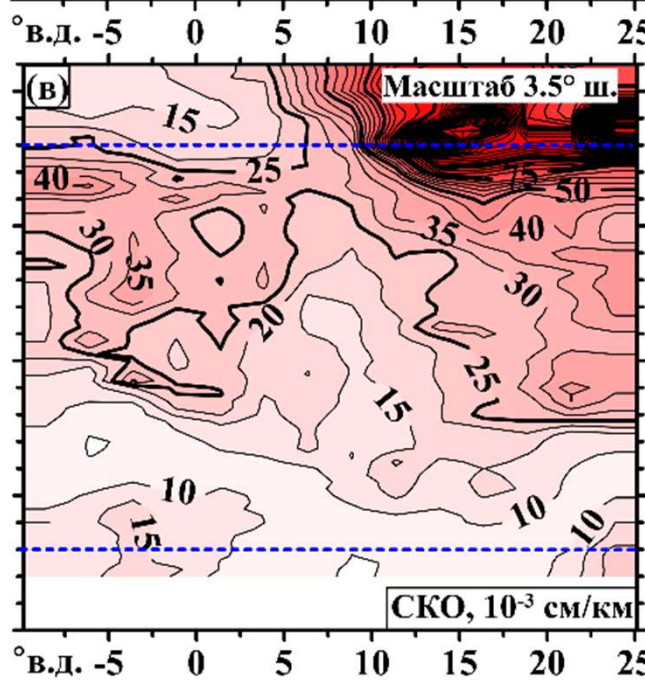
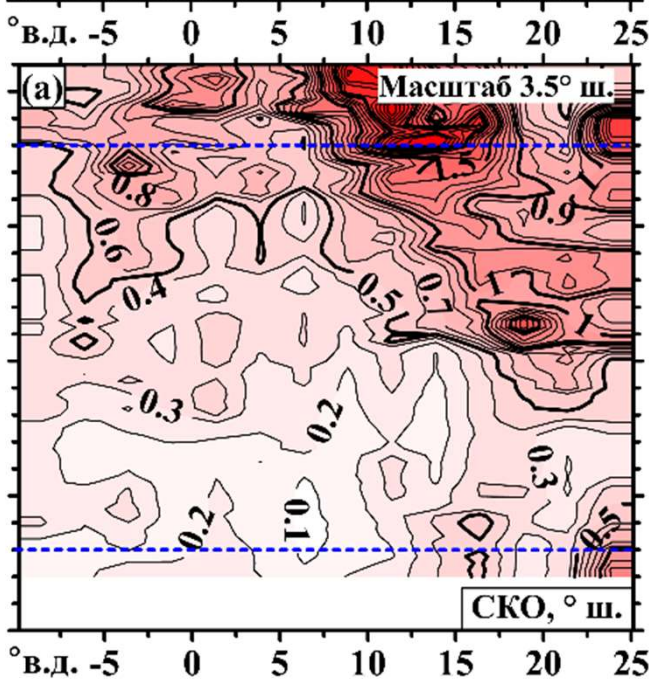
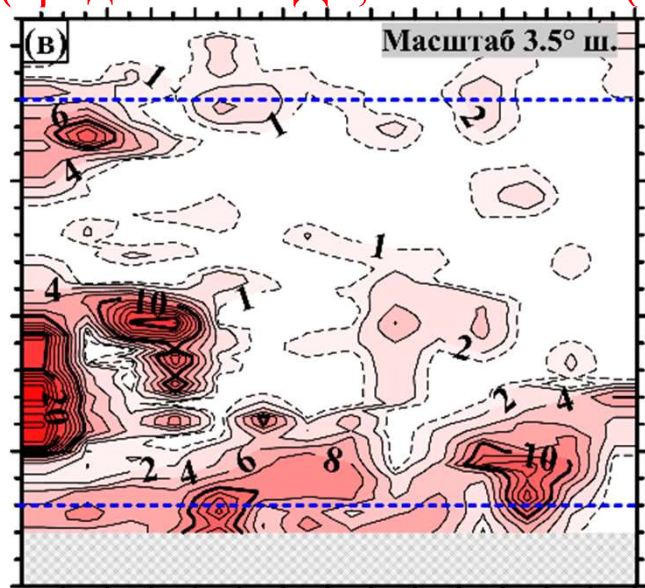
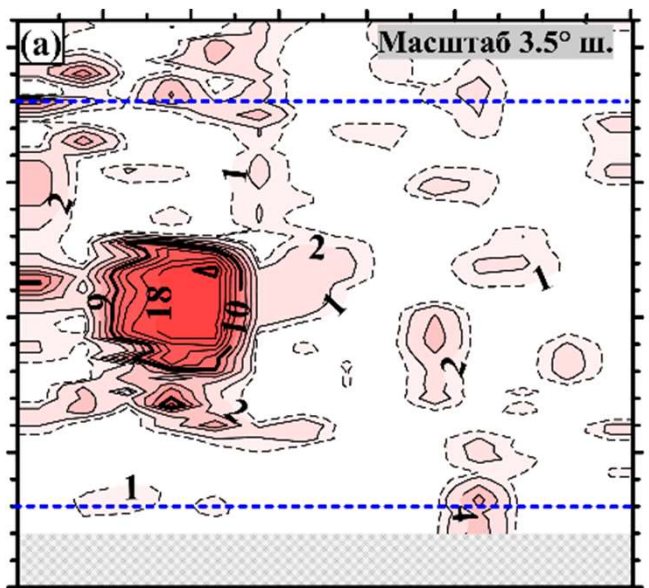
Срединная широта

Распределения доли дисперсии колебаний (%), обусловленной долговременным линейным трендом, и СКО рядов меридионального сдвига струйной структуры ($^{\circ}$ ш.) и изменения интенсивности течения (10^{-3} см/км) для сектора АЦТ к югу от Африки

Сдвиг, $^{\circ}$ ш.

Изменение интенсивности течения
(градиента АДТ, 10^{-3} см/км (≈ 0.1 см/с))

Доля дисперсии

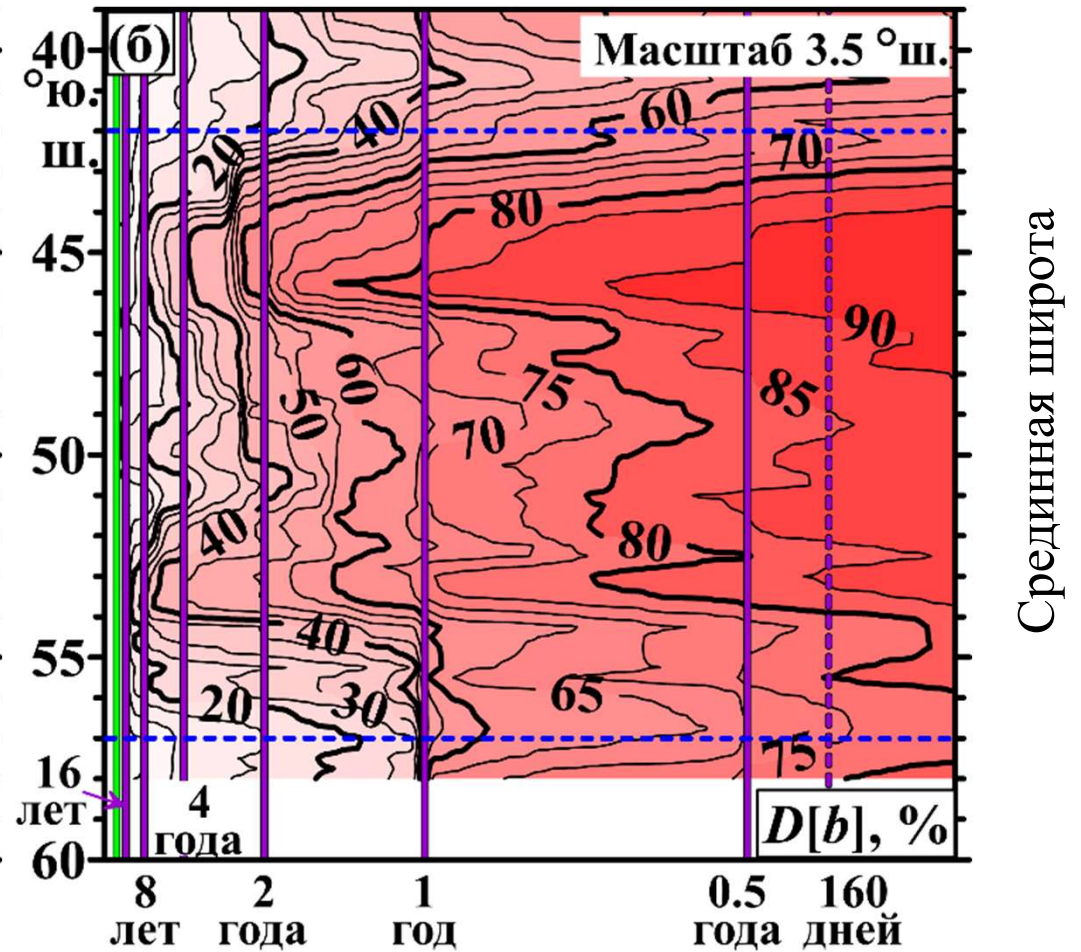
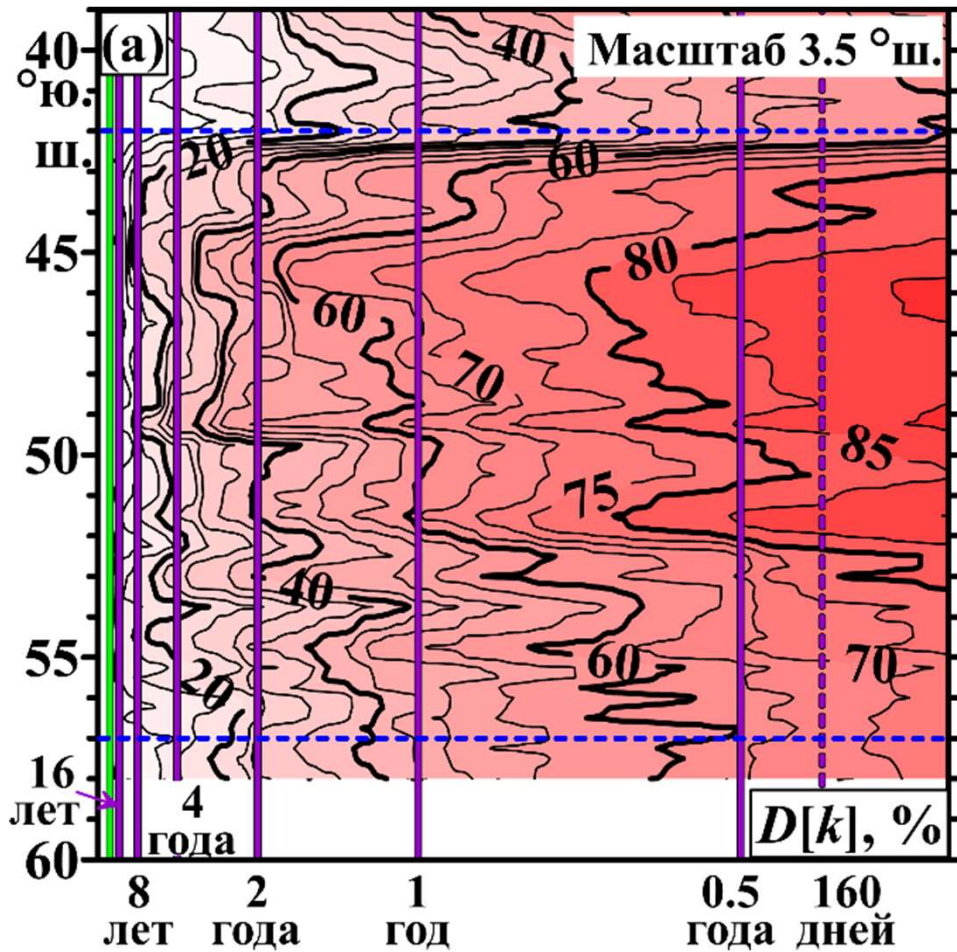


Срединная широта

Кумулятивная доля (%) дисперсии колебаний в зависимости от волновых чисел и средней широты или средних значений АДТ, построенная нарастающим итогом (от низких частот к высоким) для рядов, рассчитанных для всего сектора целиком без разделения на полосы

Сдвиг, °ш.

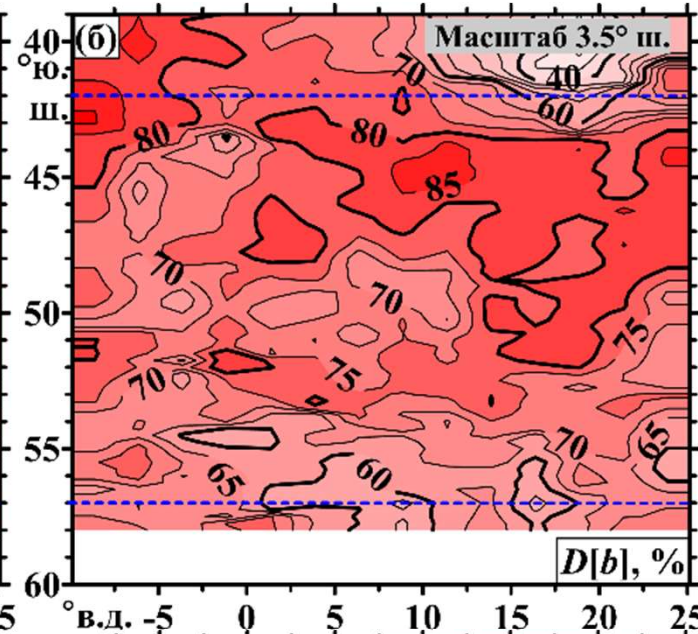
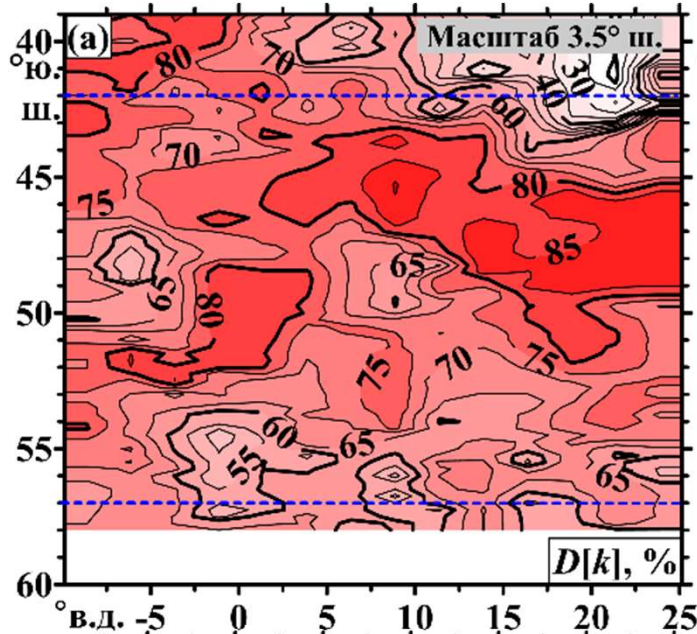
Изменение интенсивности течения
(градиента АДТ, 10^{-3} см/км (≈ 0.1 см/с))



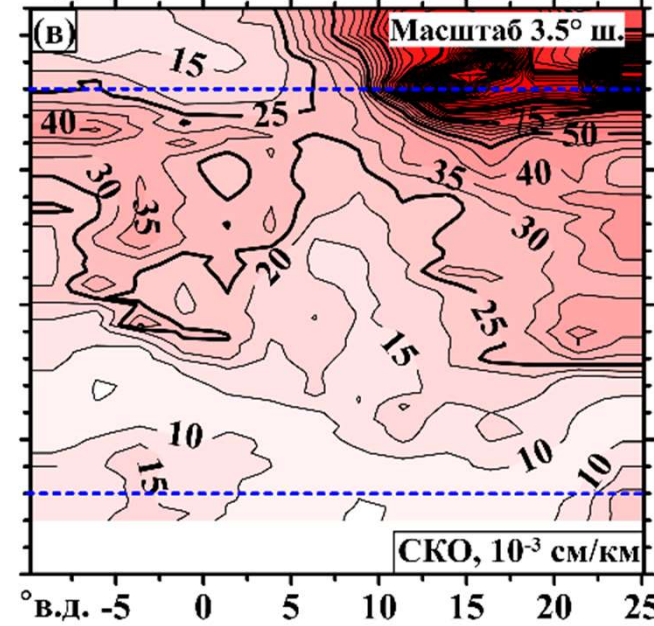
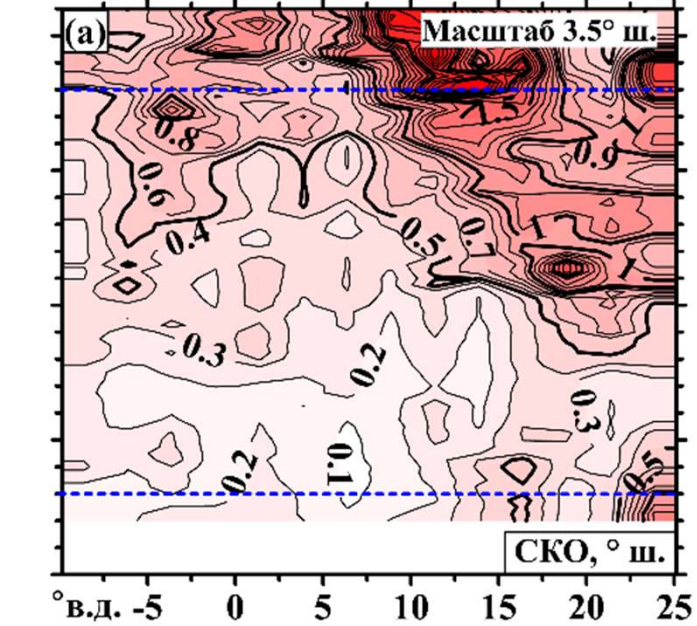
Зональные распределения кумулятивной доли дисперсии рядов сдвига струйной структуры и изменения интенсивности течения, накопленных от низких частот до периода 160 сут.

Сдвиг, °ш.

Изменение интенсивности течения
(градиента АДТ, 10^{-3} см/км (≈ 0.1 см/с))



СКО



Срединная широта

Результаты:

1. Ряды, построенные для всего сектора к югу от Африки целиком в вариантах без деления на меридиональные полосы и с делением и последующим усреднением по набору полос, могут как существенно отличаться, так и быть практически идентичными друг другу.
2. В зональных распределениях значений доли дисперсии, приходящейся на долговременный линейный тренд, и СКО рядов рассматриваемых параметров наблюдается несоответствие друг другу очагов их повышенных значений, т.е. увеличенные значения линейного тренда никак не обусловлены общей высокой амплитудой колебаний соответствующих рядов, и наоборот.
3. В рядах рассматриваемых параметров в зоне АЦТ преобладают долгопериодные колебания. В зональных распределениях СКО и доли долгопериодных колебаний в расчетах относительно широты существует положительная корреляция.

Публикации:

1. *Tarakanov R.Yu.* On the long-term linear meridional shift of the jet structure of the Antarctic Circumpolar Current south of Africa // *Oceanology*, 2021. V. 61. №6., P. 815–829.
2. *Тараканов Р.Ю.* О сезонном меридиональном смещении струйной структуры Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки // *Океанология*. 2023. Т. 63. № 2. С. 182–199.
3. *Tarakanov R.Y.* Comparative analysis of jet detection methods on the basis of satellite altimetry data by example of the Antarctic Circumpolar Current sector to the south of Africa // *Oceanology*. 2023. V.63. Suppl. 1. P. 784-799.
4. *Тараканов Р.Ю.* Многолетний линейный меридиональный сдвиг струйной структуры Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки по данным спутниковой альтиметрии: зональное распределение // *Океанология*. 2024. Т. 64. № 6.
5. *Тараканов Р.Ю.* Колебания струйной структуры Антарктического циркумполярного течения к югу от Африки по данным спутниковой альтиметрии: расчет временных рядов и средние характеристики // *ФАО*. Подана в редакцию.

A dramatic sunset scene over a dark, choppy ocean. The sky is filled with dark, heavy clouds, with bright sunlight breaking through in several places, creating a golden glow. The sun is positioned centrally, just above the horizon line. The overall mood is one of awe and gratitude.

СПАСИБО!