

**Воспроизведение механизма генерации Эль-Ниньо
атмосферными возмущениями внутрисезонного
масштаба в моделях CMIP6 и INM-CM6**

**Simulation of El Nino generation induced by intraseasonal
tropical variability in CMIP6 and INM-CM6 models**

Дарья Гущина, Иван Умеренков, Анна Гвоздева

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

Географический факультет

Кафедра метеорологии и климатологии

**Международная конференция, посвященная 70-летию
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА**

- **Воспроизведение Эль-Ниньо – известный объект для валидации моделей Земной системы**
- Практическая направленность – прогноз Эль-Ниньо
- **Для прогноза Эль-Ниньо необходимо правильное воспроизведение механизма его генерации**
- В предыдущих исследованиях показано, что значительный вклад в инициацию Эль-Ниньо вносит стохастическое воздействие со стороны атмосферы
- Стохастическое воздействие – возмущения внутрисезонного масштаба (десятки дней), тогда как Эль-Ниньо объект межгодового масштаба
- Корректное воспроизведение данного механизма – ключ к прогнозу Эль-Ниньо
- **Оценим данный механизм в моделях CMIP6 и INMCM6-M**

Внутрисезонная тропическая изменчивость (ВТИ)

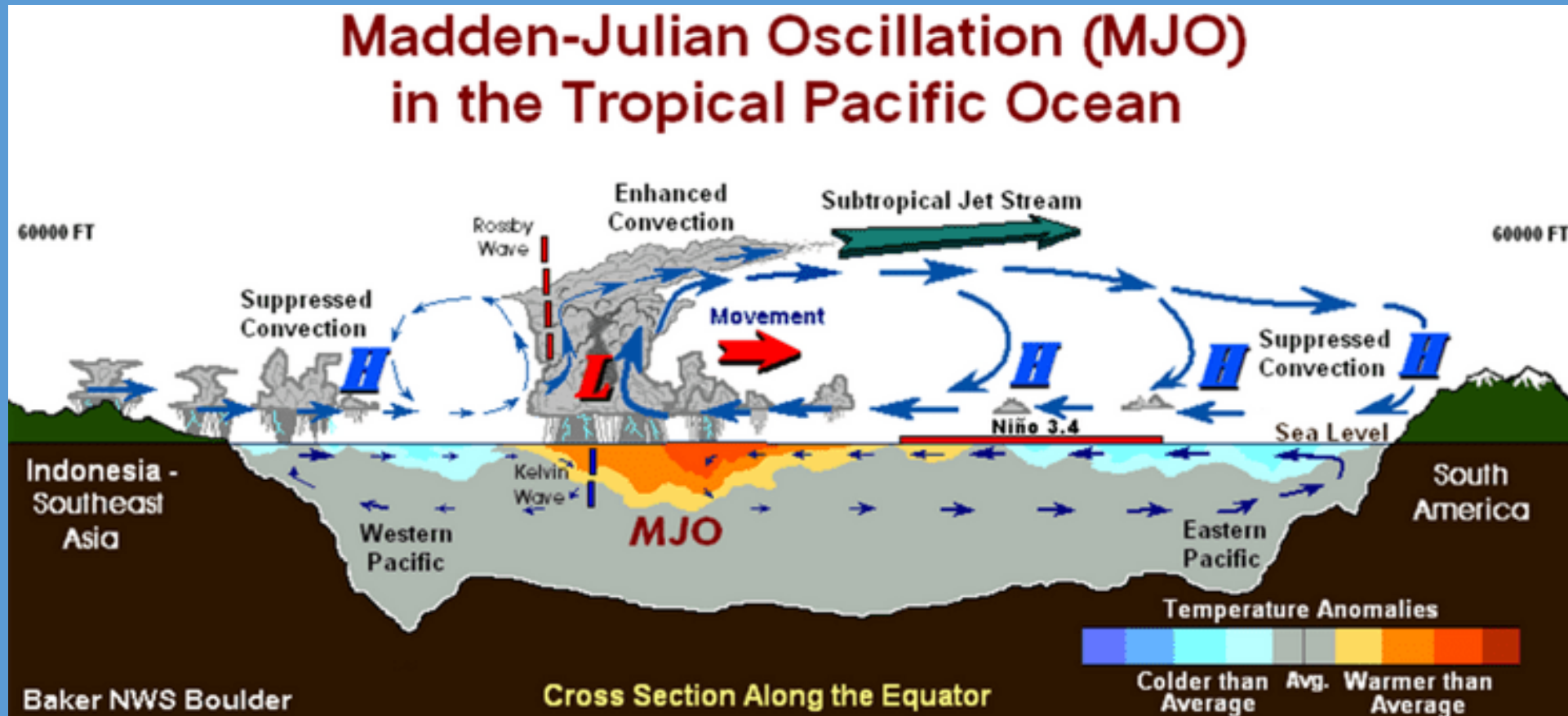
Когерентная мода

- Колебания Маддена-Джулиана (MJO)

Конвективно-связанные экваториальные волны

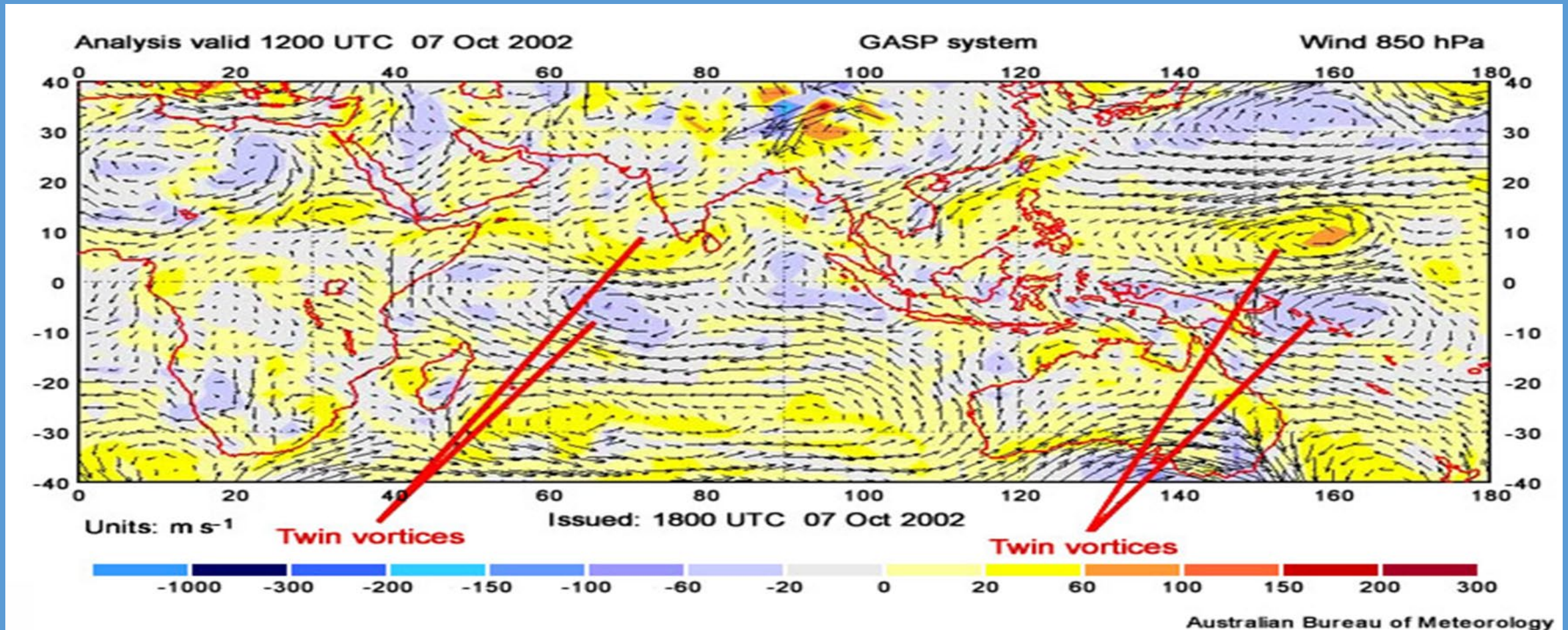
- Волны Кельвина
- Экваториальные волны Россби (ER)
- Смешанные Россби гравитационные волны (MRG)
- Восточные гравитационные волны (EIG)
- Западные гравитационные волны (WIG)
- Тропические депрессии (TD)

Осцилляция Маддена-Джулиана (МЮ)



- Период 30-60 дней
- Возмущения в поле конвекции и циркуляции, амплитуда 10 Вт/м^2 для УДР и 1 м/с для зонального ветра на 850 гПа
- Распространяются на восток со средней скоростью $\sim 5 \text{ м/с}$ (430 км/сутки),
- Наблюдаются над Индийским и Западным Тихим океанами

Конвективно-связанные экваториальные волны Россби



- Проявляются в конвекции и циркуляции
- Максимум на 10° широты
- Зональный масштаб 10 000 км

Данные

- ERA5 и NCEP/NCAR reanalysis 1950-2014
- CMIP6 historical experiment 1950-2014
SSP5-8.5 2015-2100

Ежедневные данные:

- U850

2 версии модели INM:

- INM-CM5-0 (CMIP6)
- INM-CM6-M

Модели CMIP6 :

- | | |
|-----------------|-----------------|
| • ACCESS-ESM1-5 | • GFDL-CM4 |
| • CanESM5 | • IPSL-CM6A-LR |
| • CESM2 | • MIROC6 |
| • CMCC-CM2-HR4 | • MPI-ESM1-2-HR |
| • CMCC-CM2-SR5 | • MPI-ESM1-2-LR |
| • CNRM-CM6-1 | • MRI-ESM2-0 |
| • EC-Earth3 | • NorESM2-MM |

Выделение ВТИ (Wheeler and Kiladis, 1999)

- Разложение поля на симметричную и асимметричную относительно экватора компоненты
- Двумерное Фурье-разложение (в пространстве зональное волновое число-частота) в 5-летнем скользящем окне
- Нормализация полного спектра на средний
- Выделение областей, соответствующих МЮ и экваториальным волнам
- Обратное Фурье-преобразование с сохранением коэффициентов только в выделенной области, соответствующей определенной осцилляции

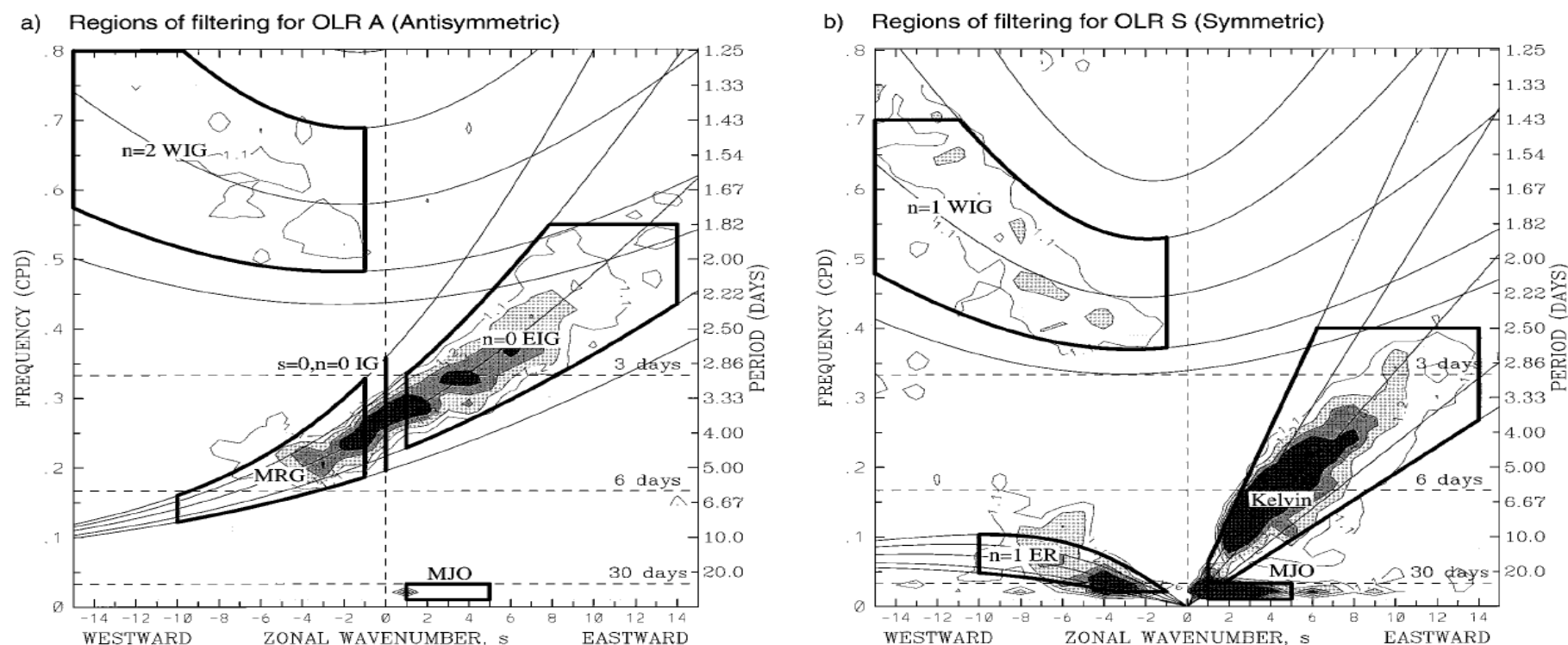


FIG. 6. As in Fig. 3 excluding contours less than 1.1 and greater than 1.4. Thick boxes indicate the regions of the wavenumber-frequency domain used for filtering of the OLR dataset to retrieve the longitude-time information of the convectively coupled tropical waves for the (a) antisymmetric component and (b) symmetric component of the OLR. The thin lines are the various equatorial wave dispersion curves for the five different equivalent depths of $h = 8, 12, 25, 50$, and 90 m.

Интенсивность волн (Hendon et al., 2007)

- СКО MJO и волн Россби, отфильтрованных в поле зонального ветра на 850 гПа, рассчитанное по скользящему окну:
90 дней для MJO
48 дней ER
- Месячное осреднение
- Осреднение вдоль экватора (5S-5N), Индо-Тихоокеанского региона (50E-90W)
- Вычитание сезонного хода

Для исследования способности моделей CMIP6 воспроизводить явление Эль-Ниньо применен метод, основанный на разложении месячных АТПО (ASST) в пределах 20°ю.ш. – 20°с.ш. и 120°в.д. – 90°з.д. по естественным ортогональным функциям (EOF):

$$ASST(lon, lat, t) = \sum_{i=1}^I PC_i(t) \cdot EOF_i(lon, lat)$$

Первая мода EOF - структура АТПО при ВТ Эль-Ниньо, вторая мода EOF – структура АТПО при ЦТ Эль-Ниньо.

ВТ Эль-Ниньо хорошо описывается индексом E, а ЦТ Эль-Ниньо – индексом C:

$$E = \frac{PC_1 - PC_2}{\sqrt{2}} \quad C = \frac{PC_1 + PC_2}{\sqrt{2}}$$

Соответствующая структура АТПО описывается E и C паттернами:

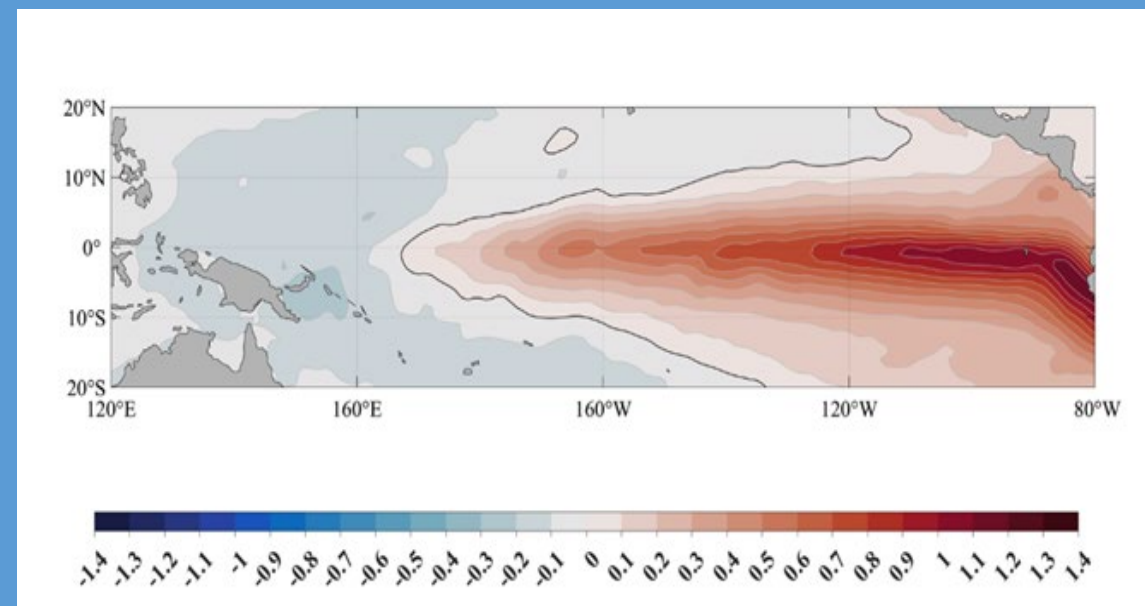
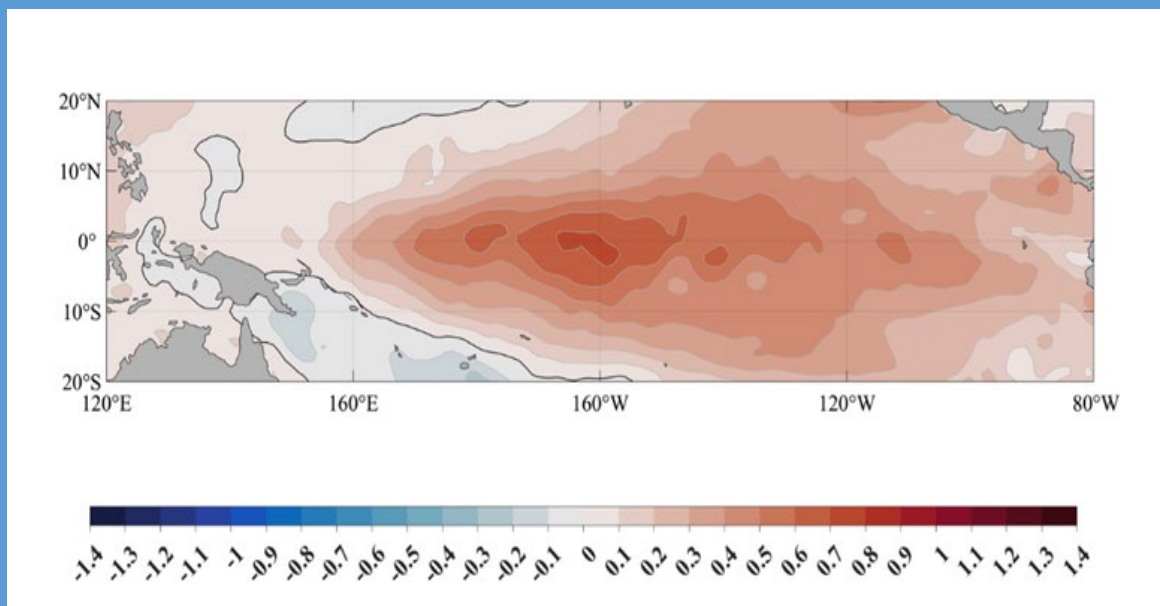
$$ASST(lon, lat, t) = E(t) \cdot E_{patt}(lon, lat) + C(t) \cdot C_{patt}(lon, lat) + \dots$$

Первая мода EOF - структура АТПО при ВТ Эль-Ниньо, вторая мода EOF – структура АТПО при ЦТ Эль-Ниньо.

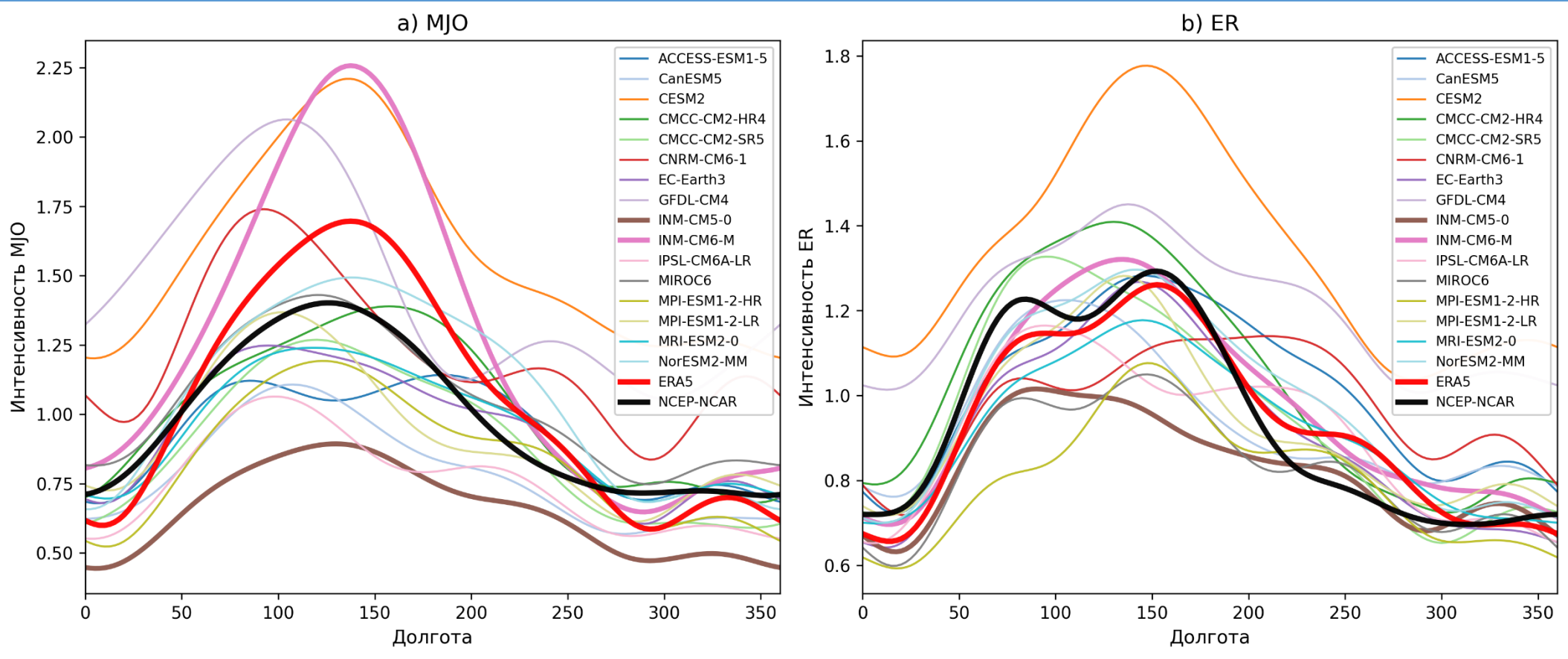
PC1 – временной коэффициент при первой моде, PC2 – при второй

$$C = \frac{PC_1 + PC_2}{\sqrt{2}}$$

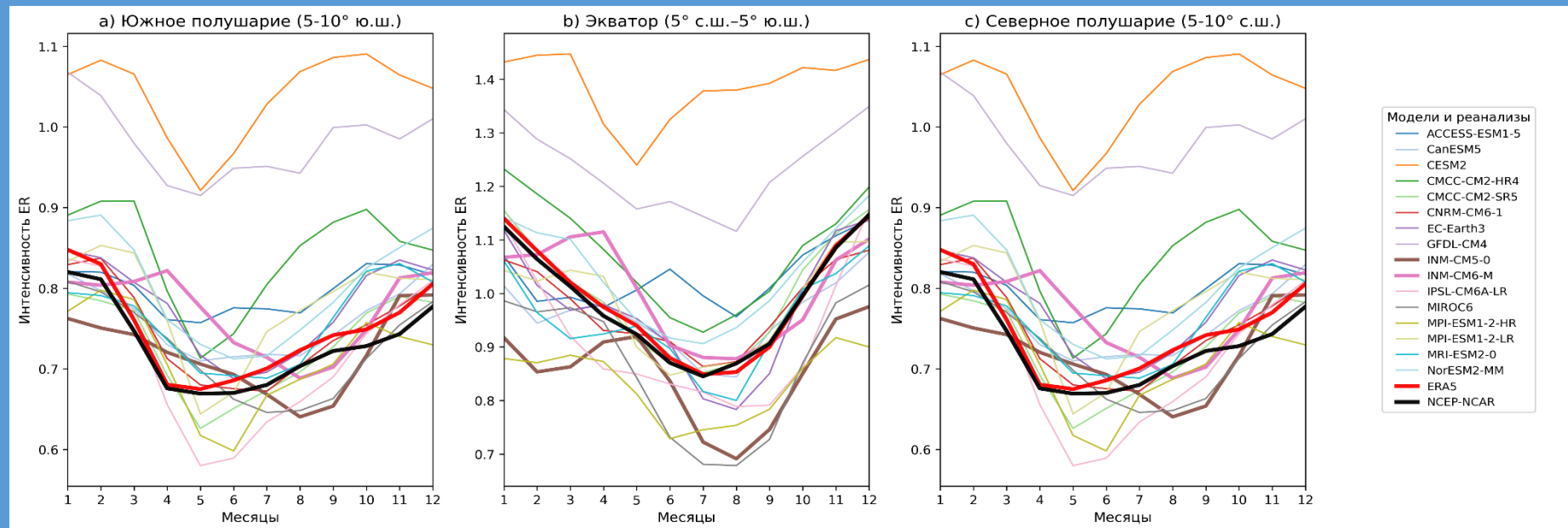
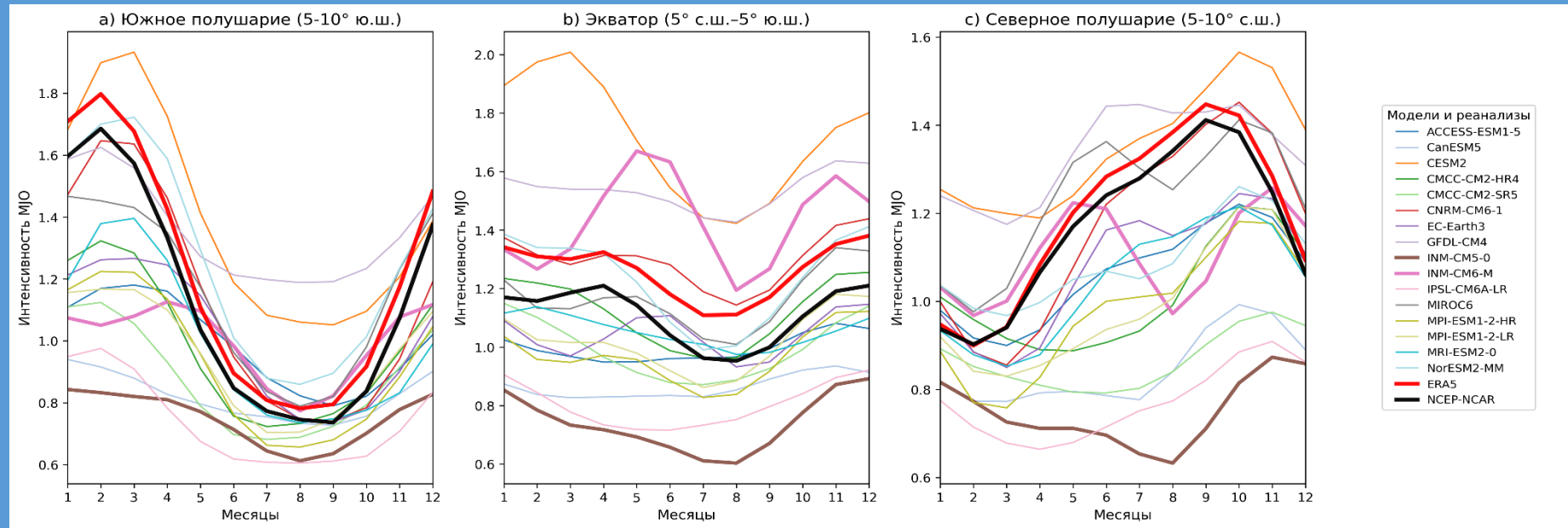
$$E = \frac{PC_1 - PC_2}{\sqrt{2}}$$

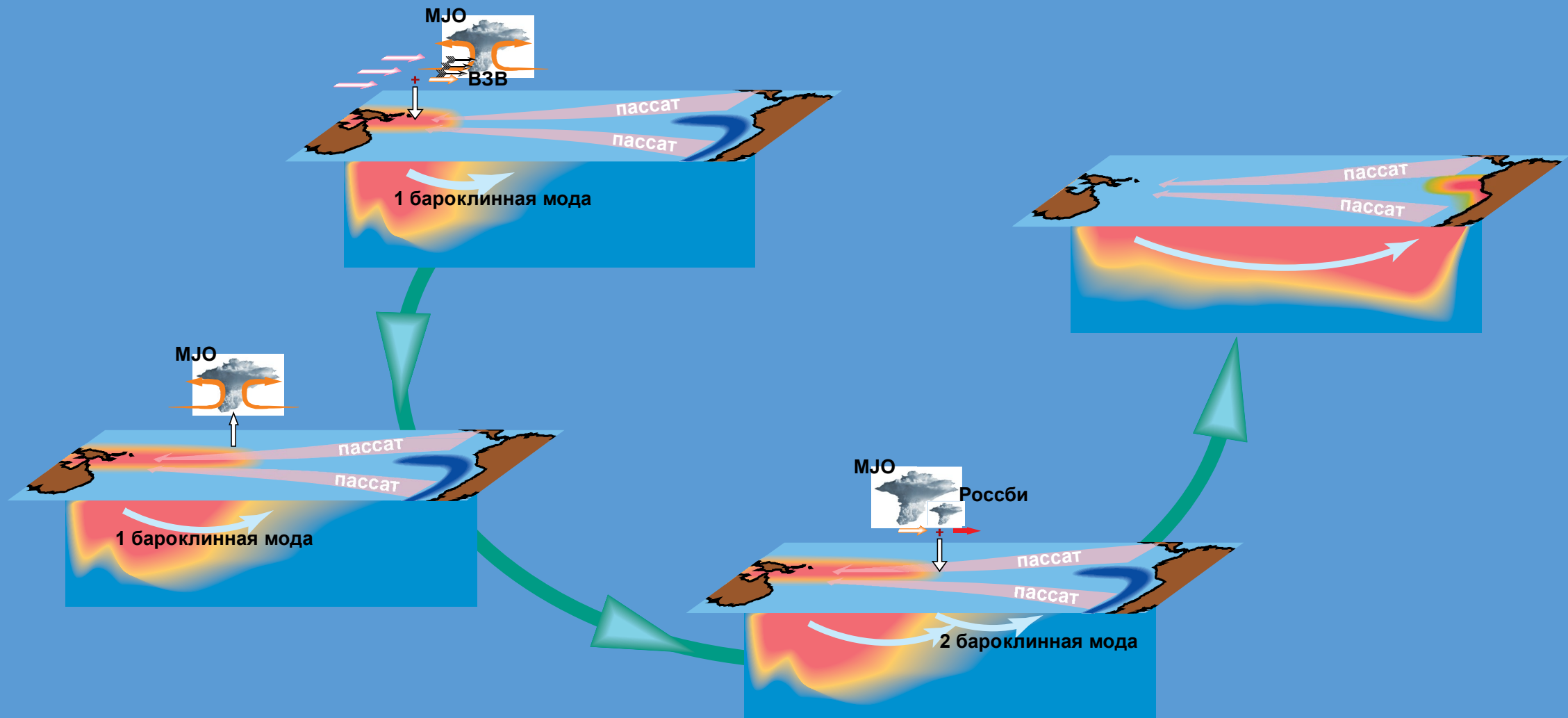


Распределение интенсивности МЖО и ЕР вдоль экватора



Сезонный ход интенсивности MJO и ER вдоль экватора



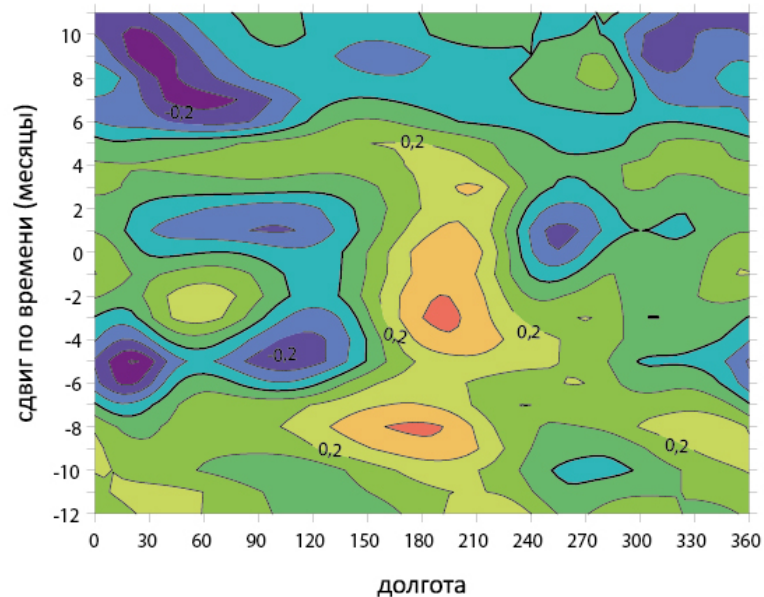


Колебания Маддена-Джулиана и конвективно связанные экваториальные волны Россби играют ключевую роль в инициации явления Эль-Ниньо

Для успешного прогнозирования Эль-Ниньо модели должны корректно воспроизводить эти атмосферные возмущения

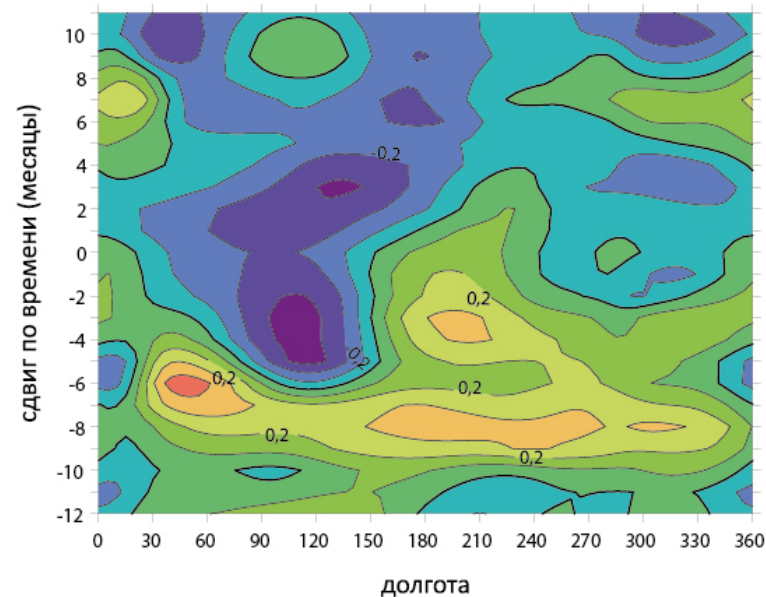
Индекс С

Reanalysis ERA5

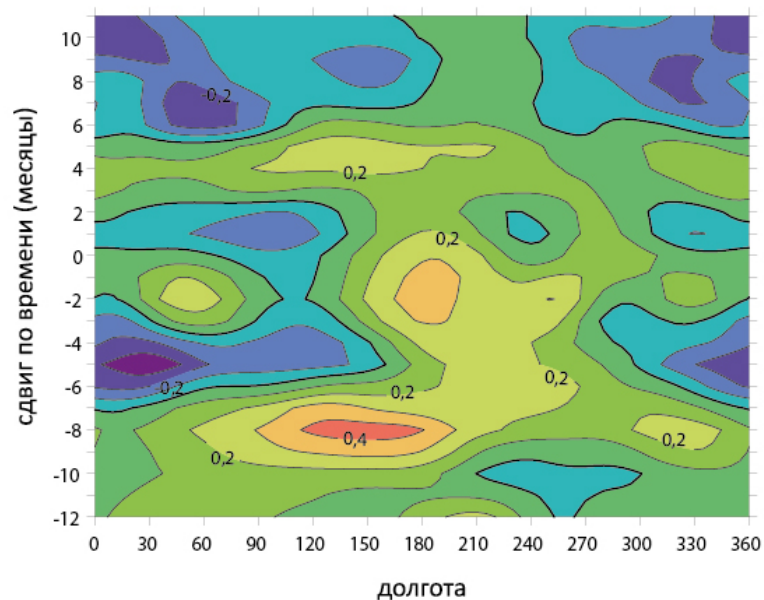


Индекс Е

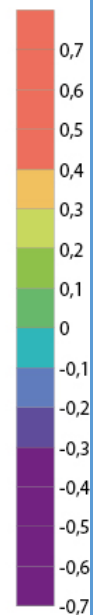
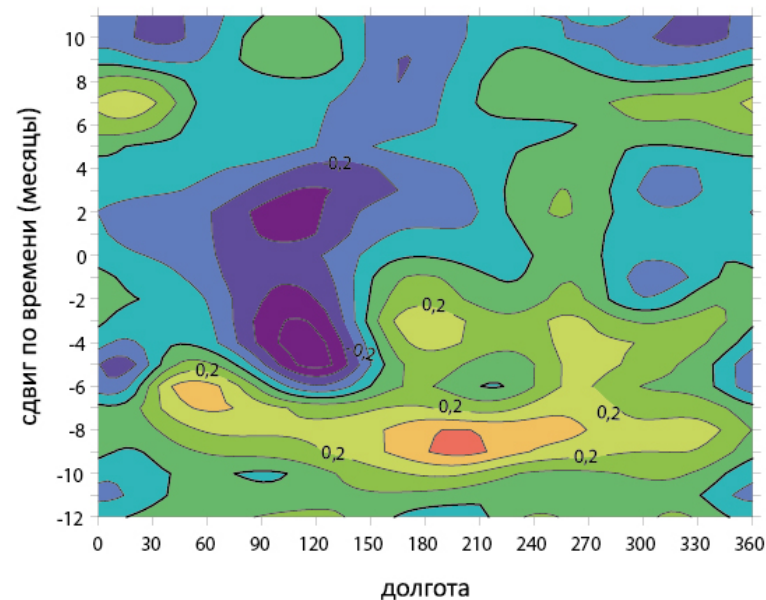
Reanalysis ERA5



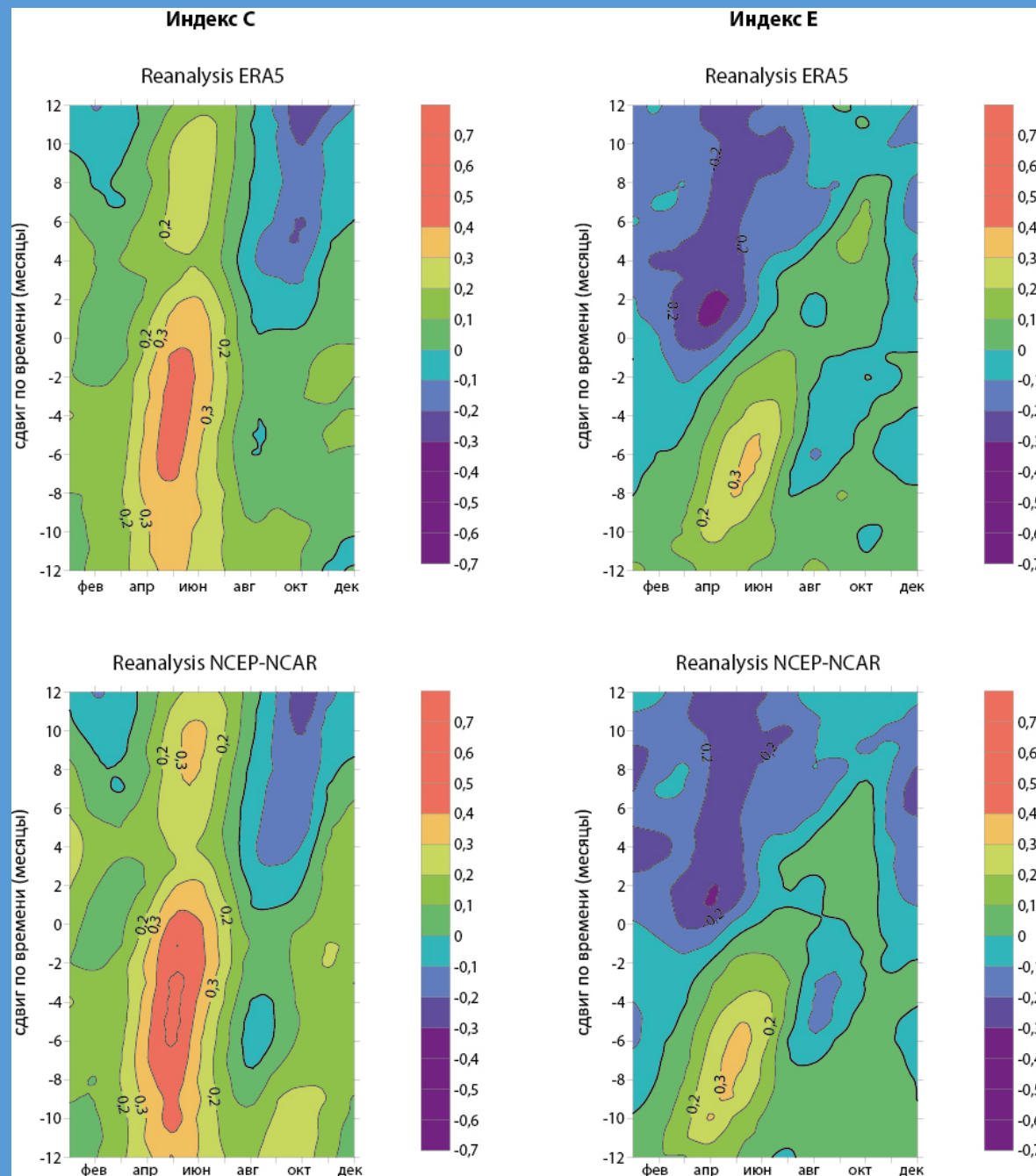
NCEP-NCAR



NCEP-NCAR



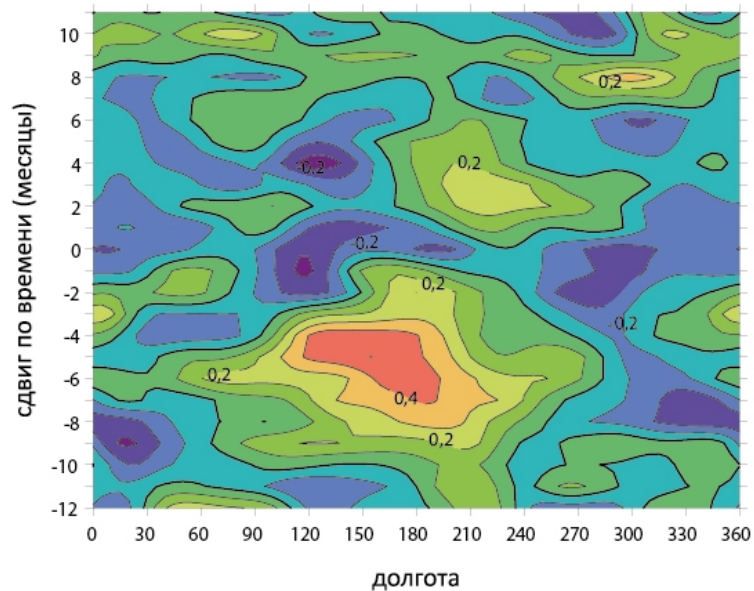
Корреляция
интенсивности
МЖО с
индексами
Эль-Ниньо в
январе (пик
события)



Кросс-корреляция индекса
интенсивности **МЮ** с
индексами Эль-Ниньо

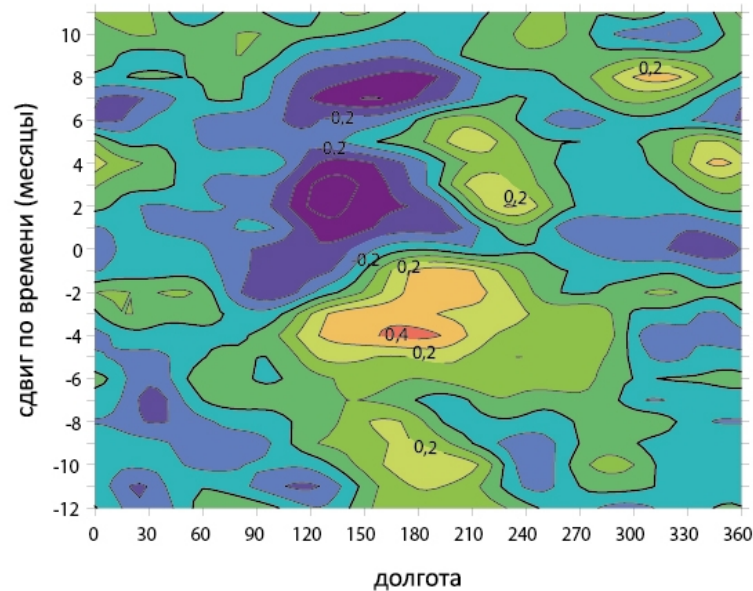
Индекс С

Reanalysis ERA5

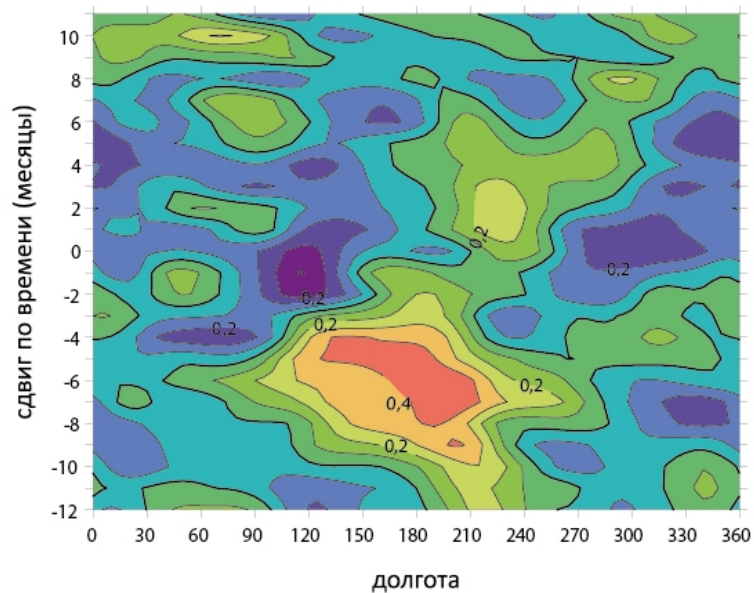


Индекс Е

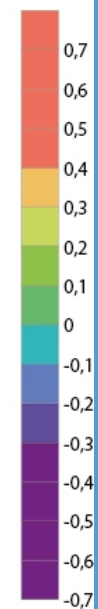
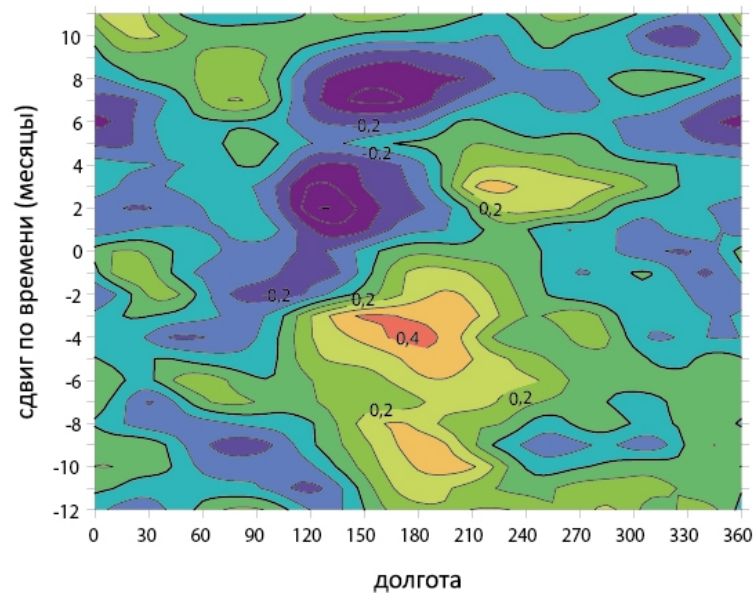
Reanalysis ERA5



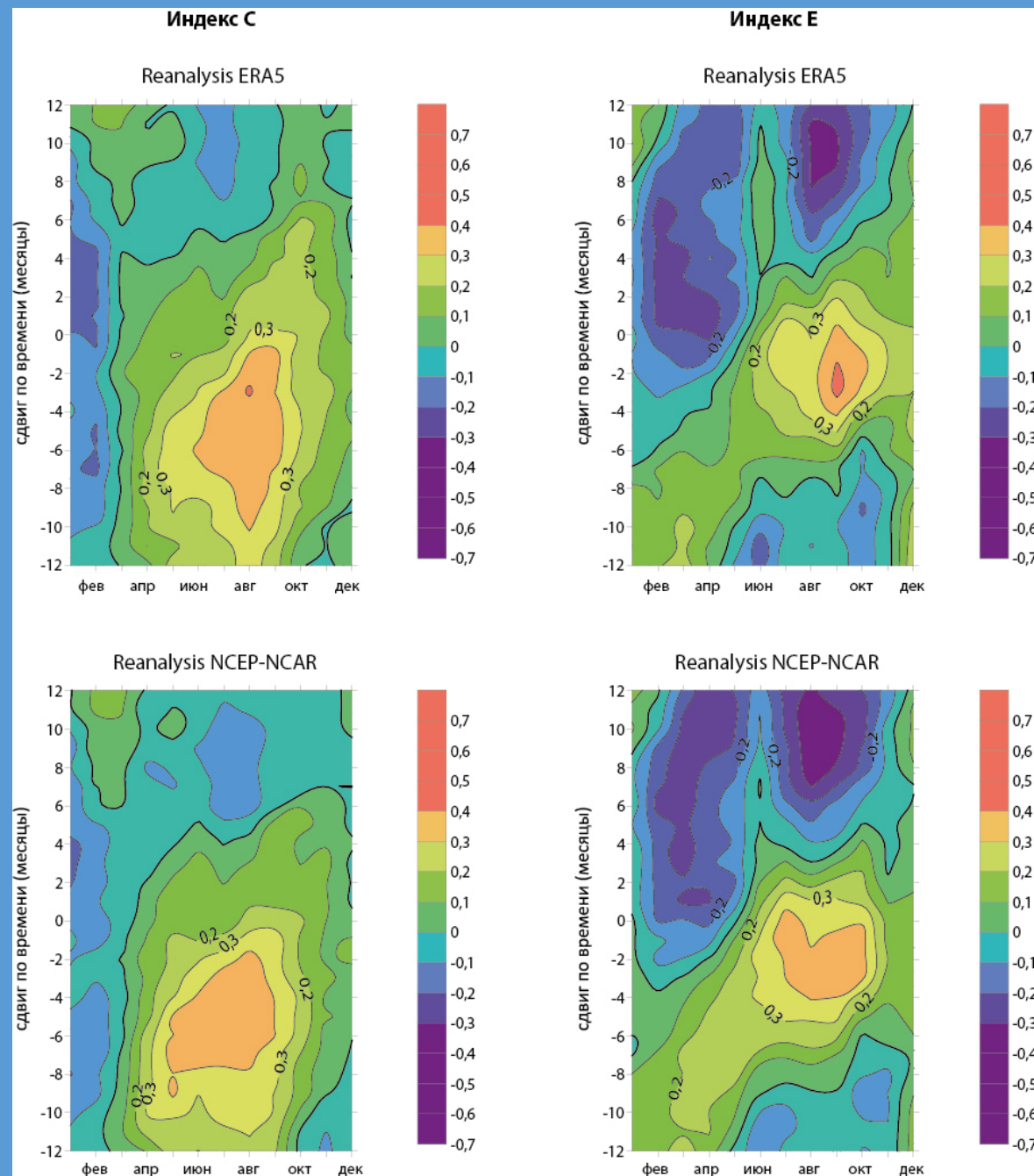
NCER-NCAR



NCER-NCAR



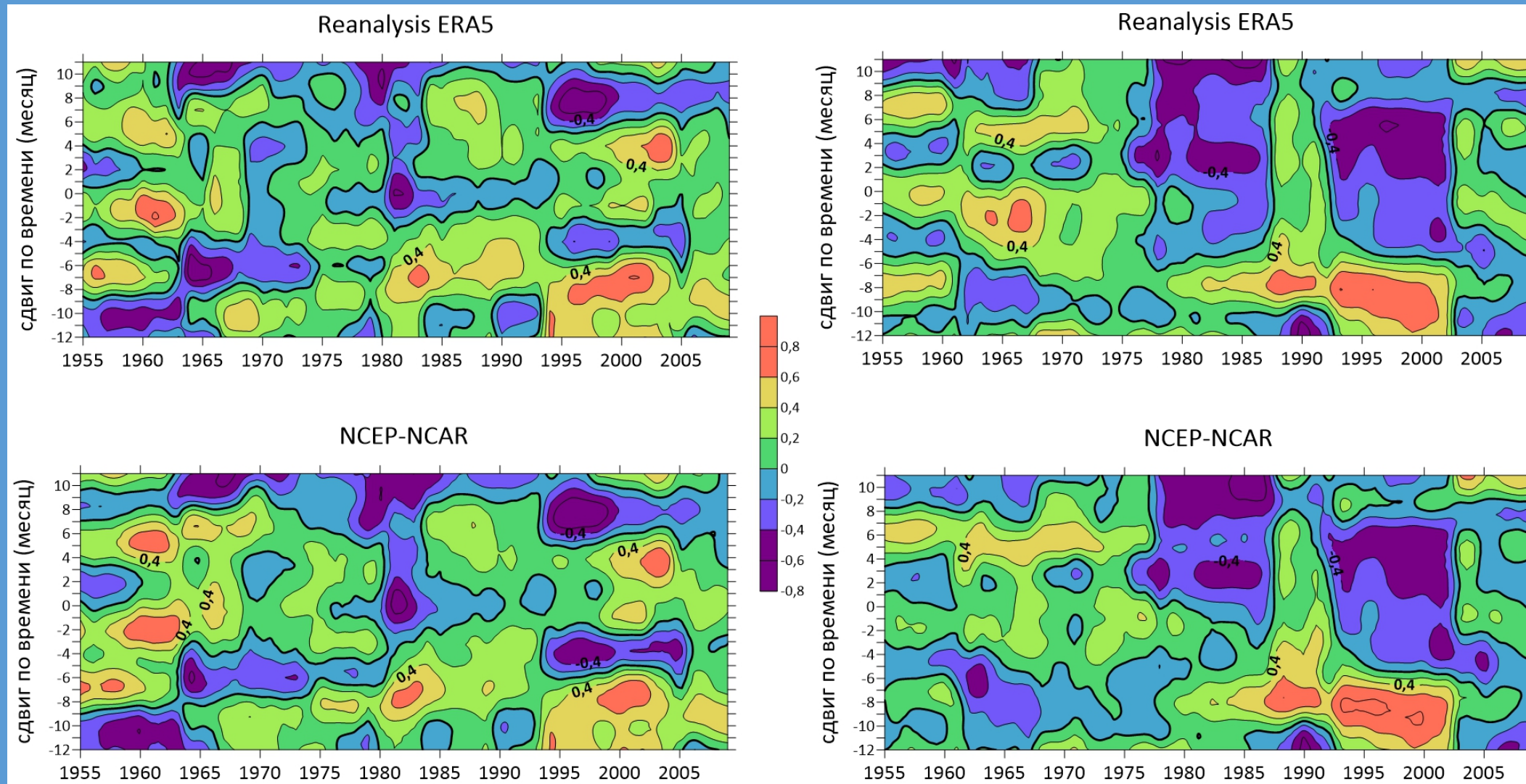
Корреляция
интенсивности
ER с
индексами
Эль-Ниньо в
январе (пик
события)



Кросс-корреляция индекса
интенсивности **ER** с
индексами Эль-Ниньо

CP El Nino

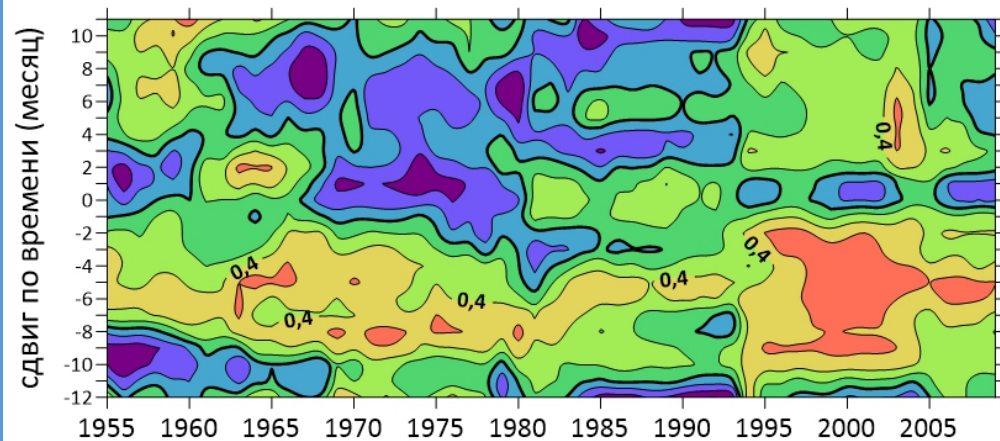
EP El Nino



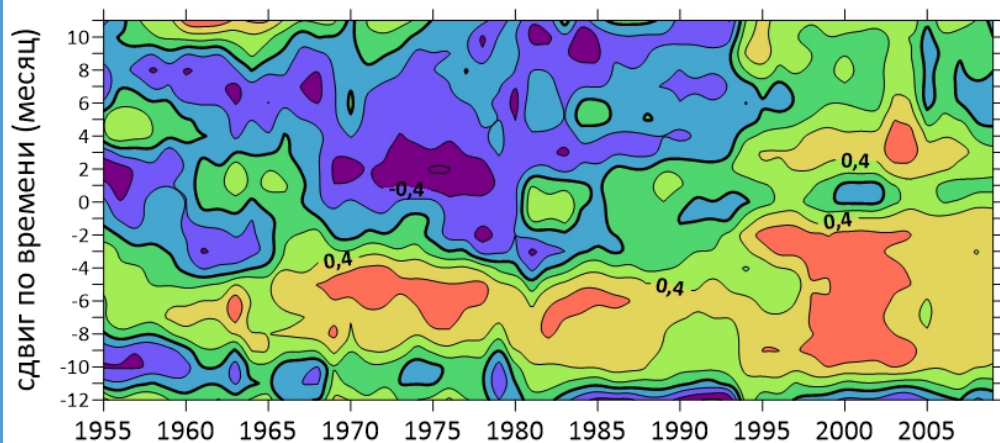
11- летняя скользящая корреляция интенсивности **МЮ** с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)

CP El Nino

Reanalysis ERA5

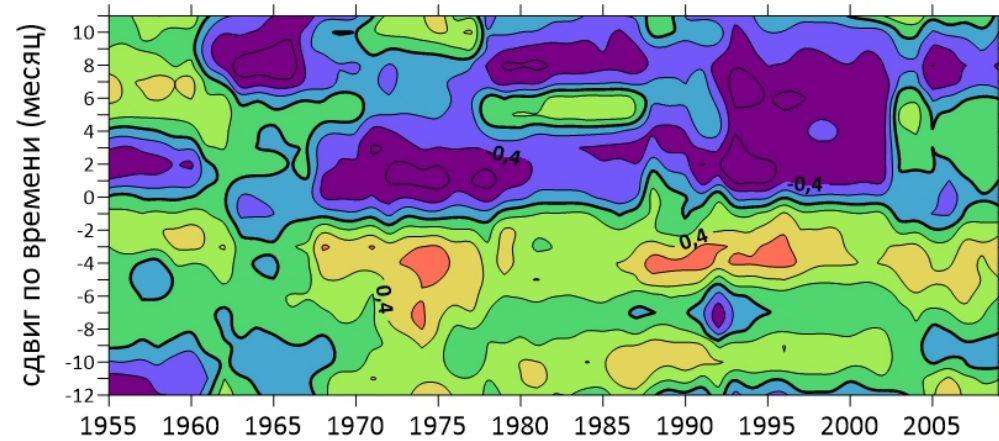


NCEP-NCAR

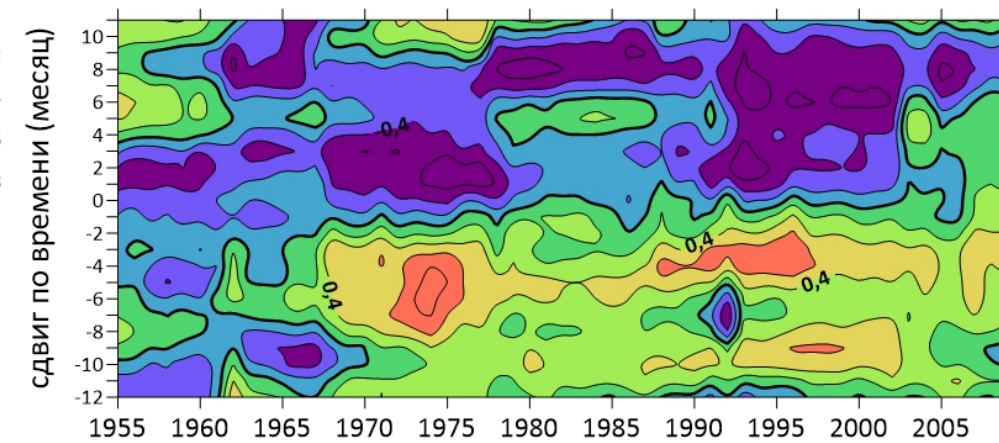


EP El Nino

Reanalysis ERA5



NCEP-NCAR

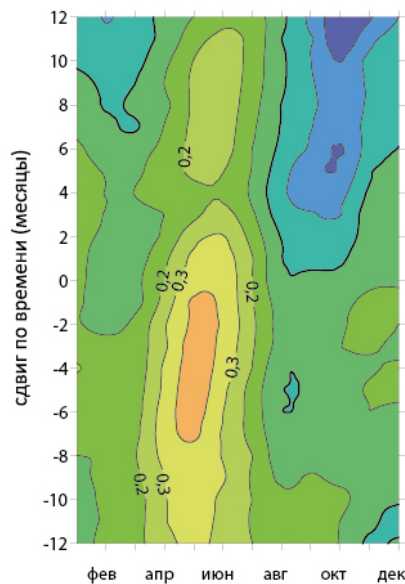


11- летняя скользящая корреляция интенсивности **ER** с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)

1950-2014

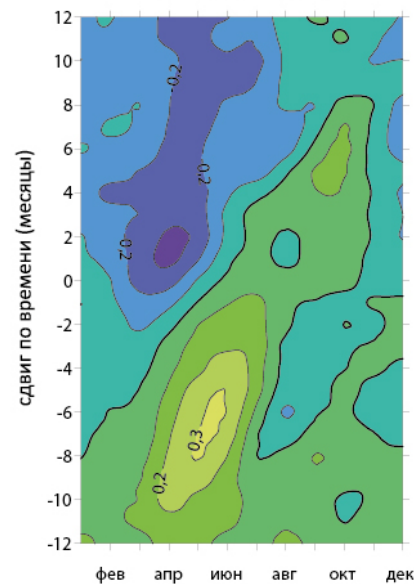
Индекс С

Reanalysis ERA5



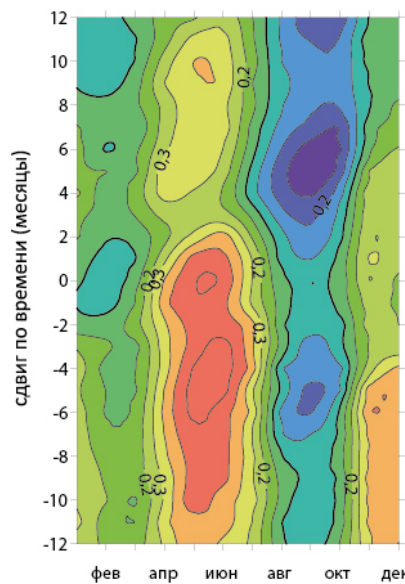
Индекс Е

Reanalysis ERA5

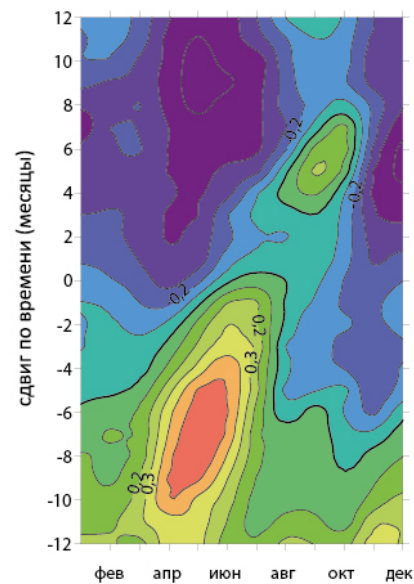


1980-2004

Reanalysis ERA5



Reanalysis ERA5

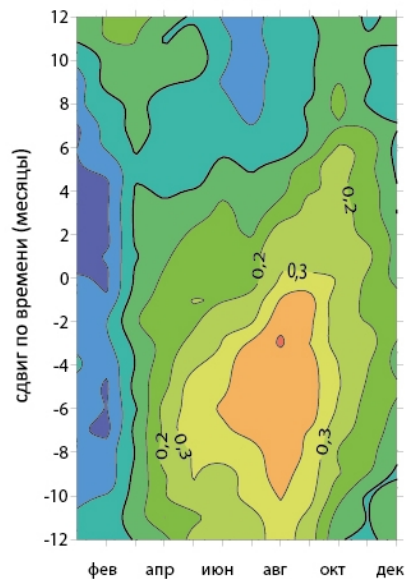


Кросс-корреляция индекса
интенсивности **МЮ** с
индексами Эль-Ниньо

1950-2014

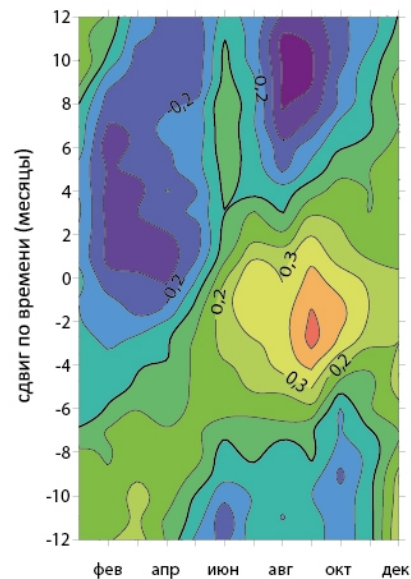
Индекс С

Reanalysis ERA5



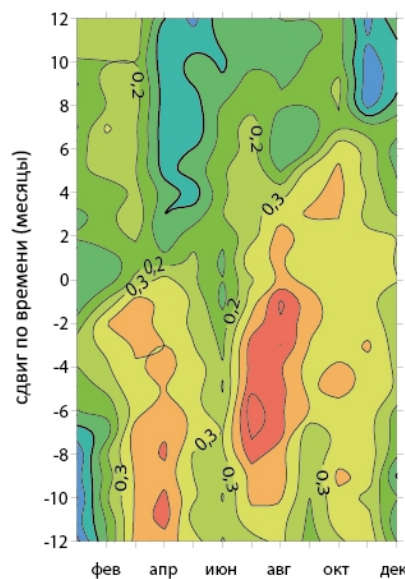
Индекс Е

Reanalysis ERA5

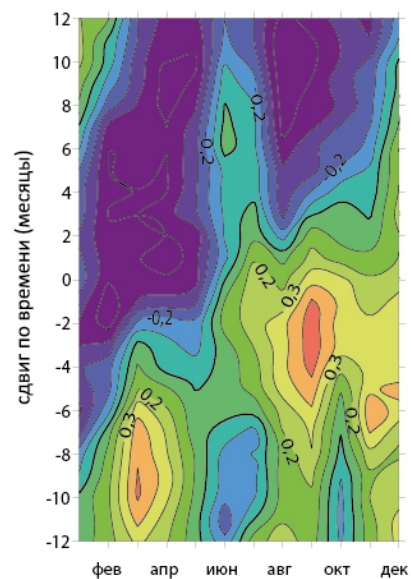


1980-2004

Reanalysis ERA5



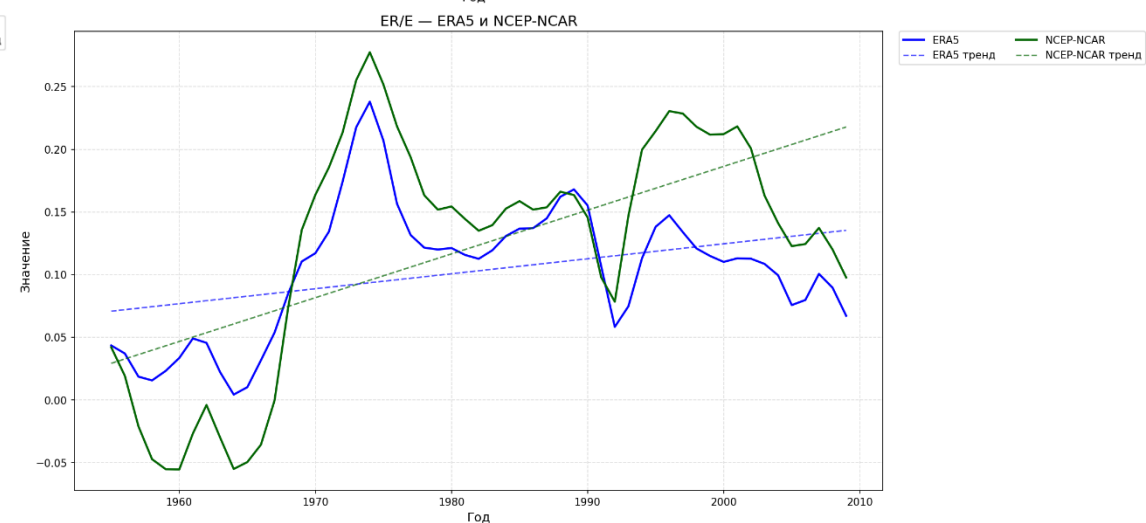
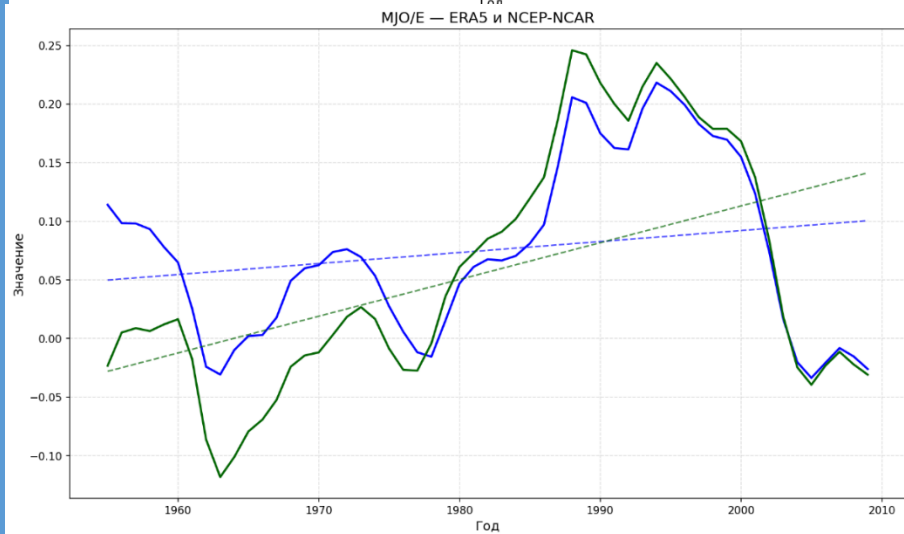
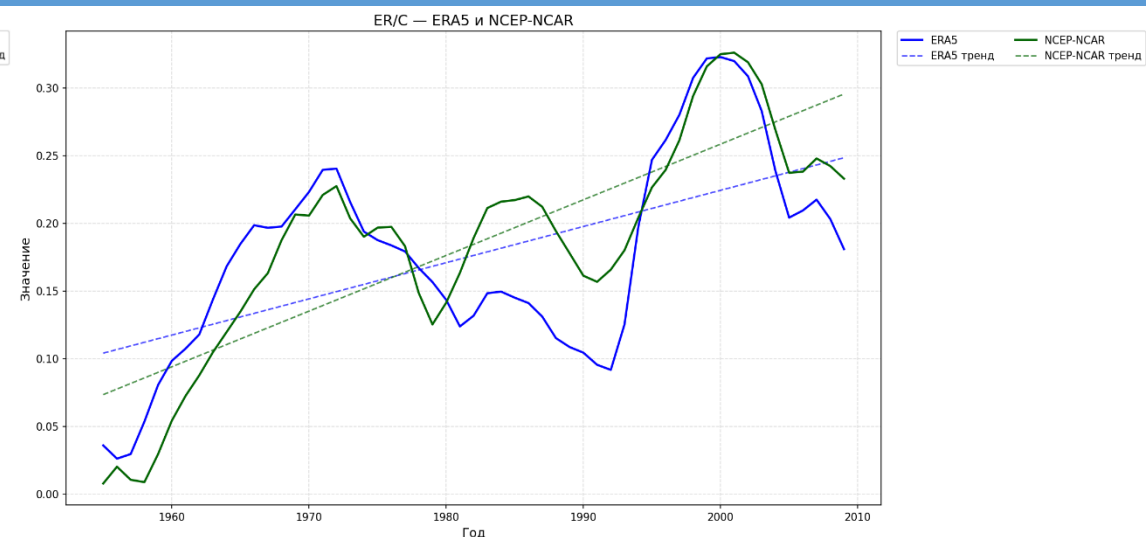
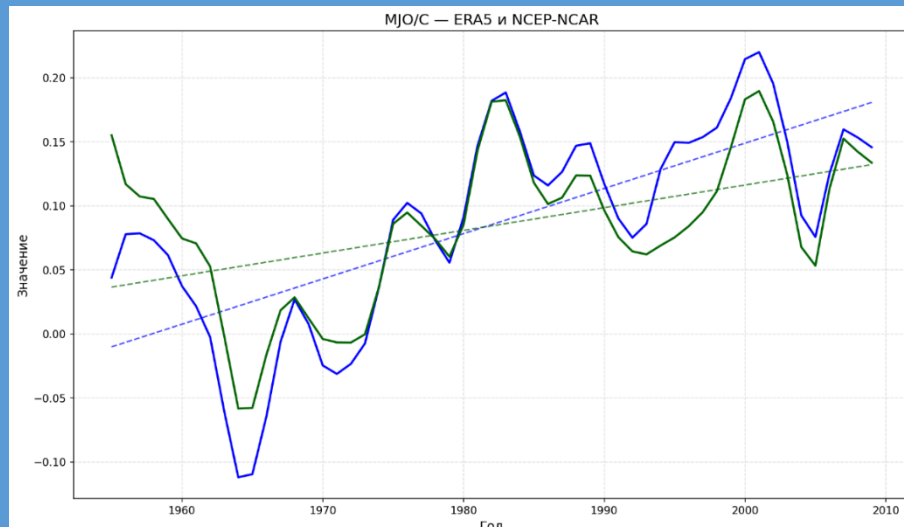
Reanalysis ERA5



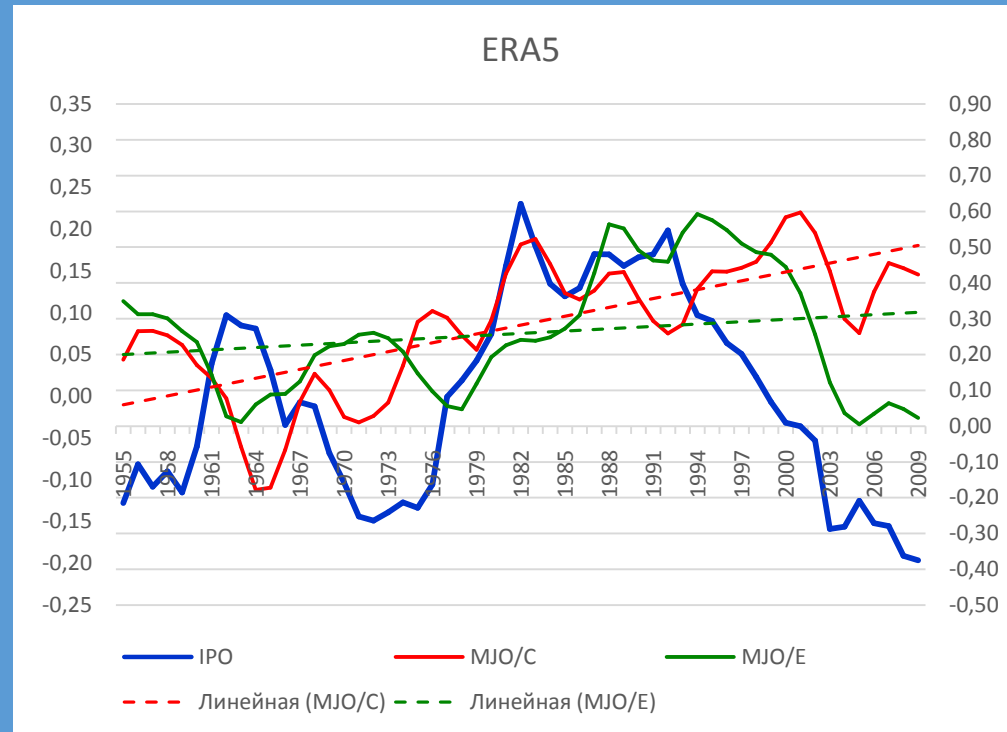
Кросс-корреляция индекса
интенсивности **ER** с
индексами Эль-Ниньо

Индекс прогностического потенциала

$$P_{ITV}^{ENSO}(t) = \int_{\tau=Mar(-1)}^{\tau=Jan(0)} \frac{cor_{ITV}^{ENSO}(\tau, t)}{(Jan(0) - Mar(-1))^2} \cdot (Jan(0) - \tau) \cdot d\tau$$



Прогностический индекс и IPO



Что мы ждем от моделей?

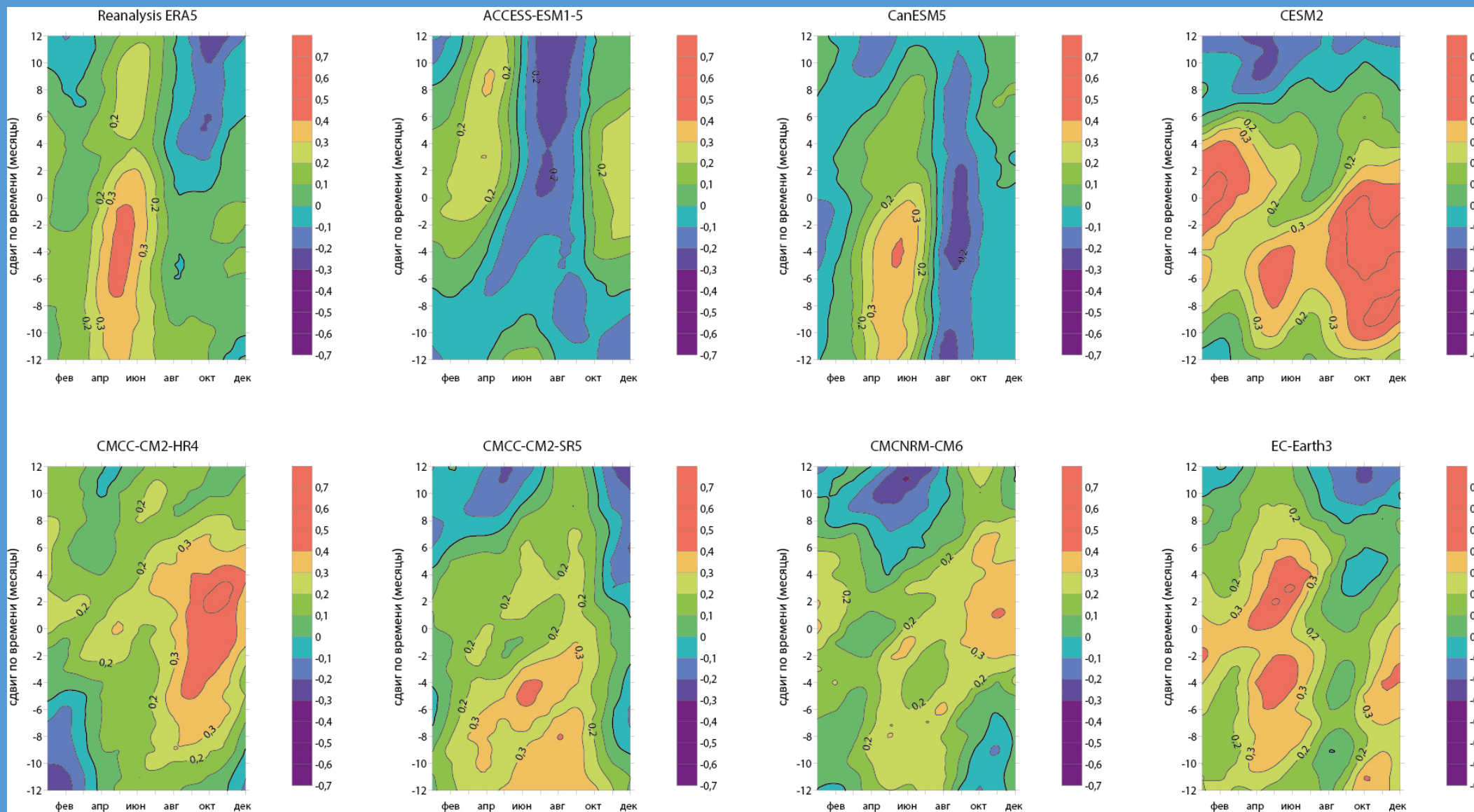
Колебания Маддена-Джулиана (МЮ)

- Корреляция с индексом ЭН в январе – интенсификация весной, предшествующей пику (лаги 7-9 месяцев) на западе Тихого океана
- Кросс-корреляция – интенсификация на лагах от -8 до 0 со смещением с марта к июню
- Наличие межгодовой изменчивости взаимосвязей

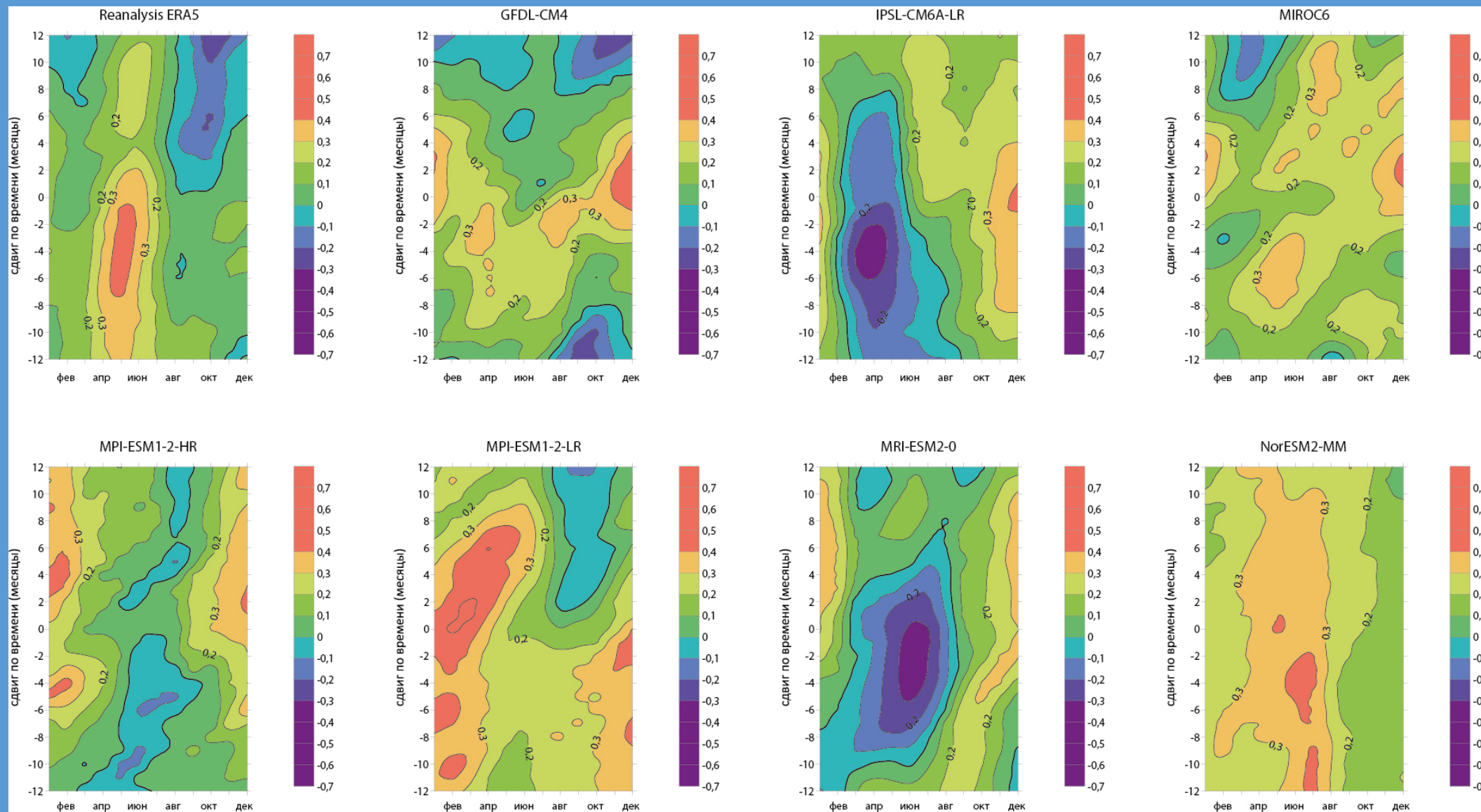
Экваториальные волны Россби (ЕР)

- Корреляция с индексом ЭН в январе – интенсификация летом, предшествующим пику (лаги 4-6 месяцев) в центре Тихого океана
- Кросс-корреляция – интенсификация на лагах от -8 до 0 со смещением с июня к октябрю
- Наличие межгодовой изменчивости взаимосвязей

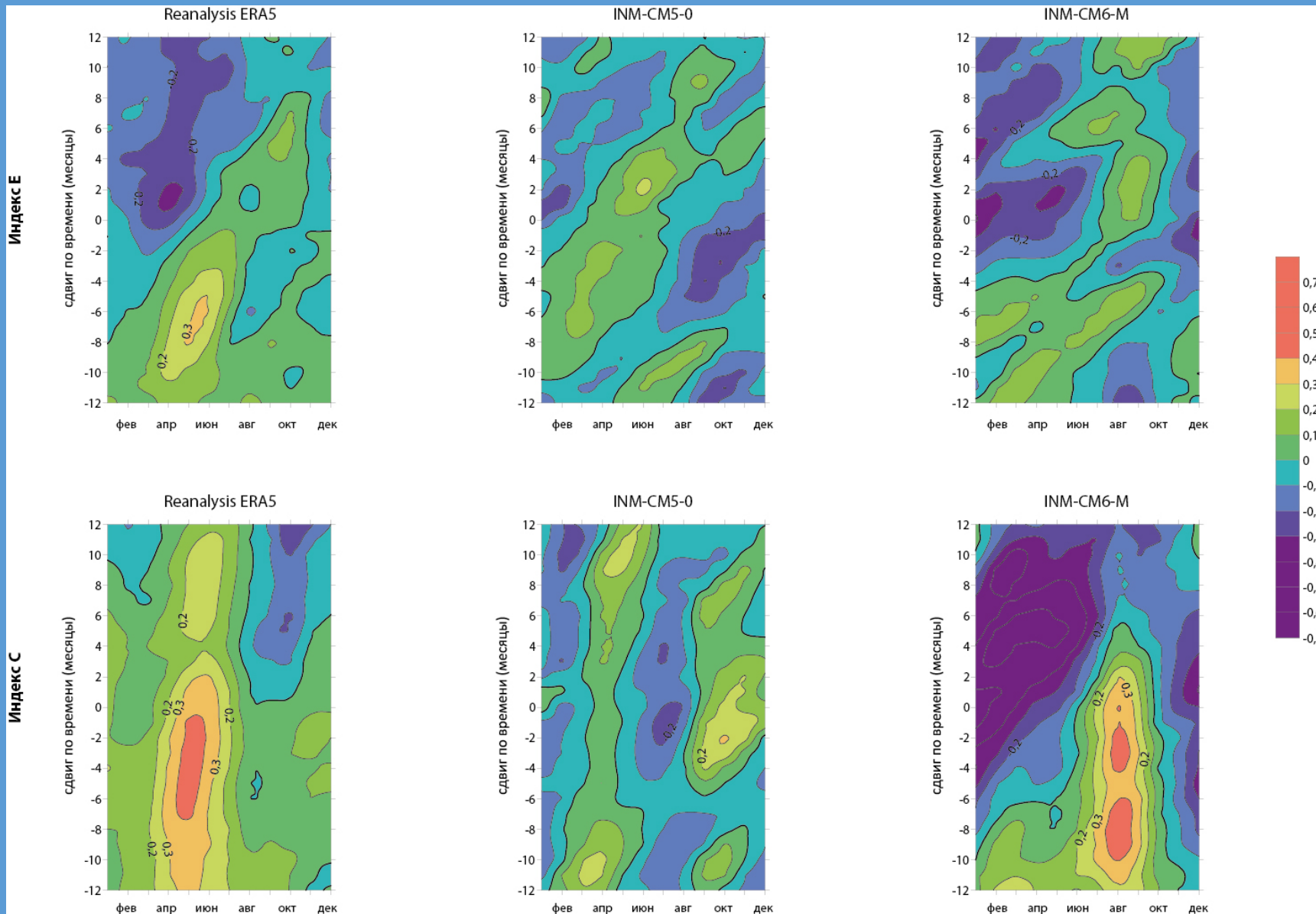
Кросс-корреляция индекса интенсивности МЮ с индексом ЦТ Эль-Ниньо



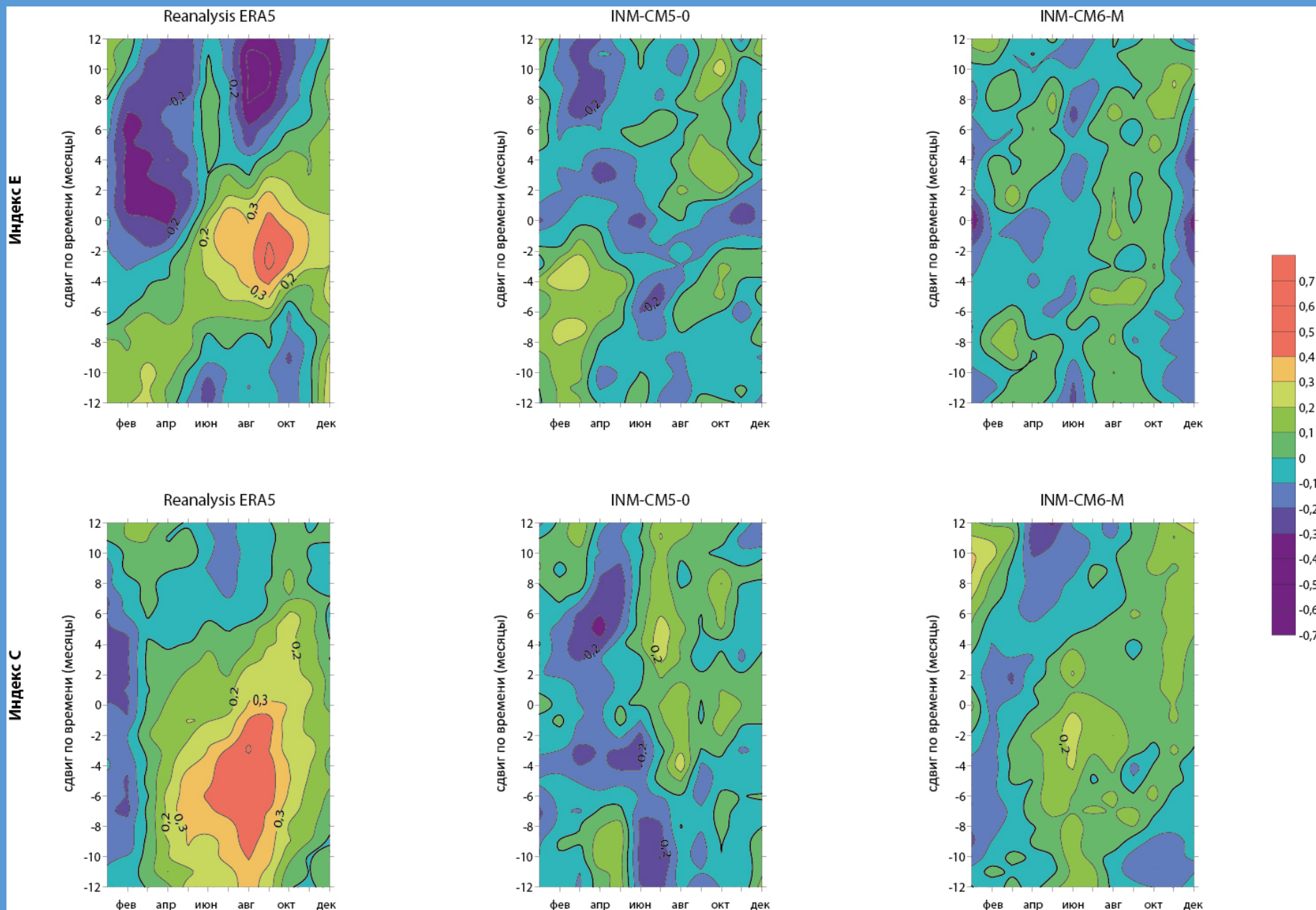
Кросс-корреляция индекса интенсивности МЮ с индексом ЦТ Эль-Ниньо



Кросс-корреляция индекса интенсивности МЮ с индексами Эль-Ниньо

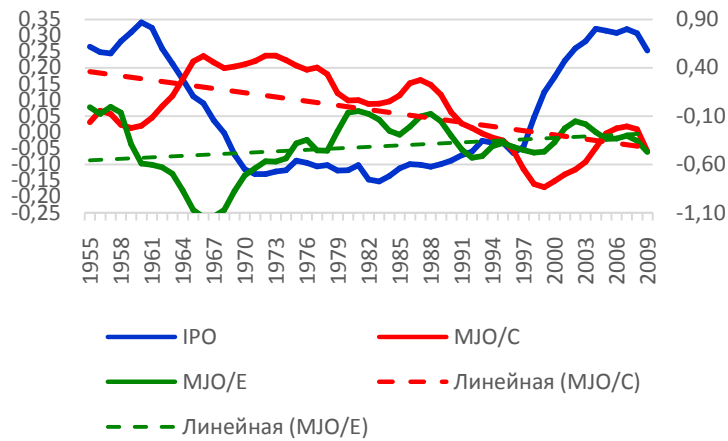


Кросс-корреляция индекса интенсивности ER с индексами Эль-Ниньо

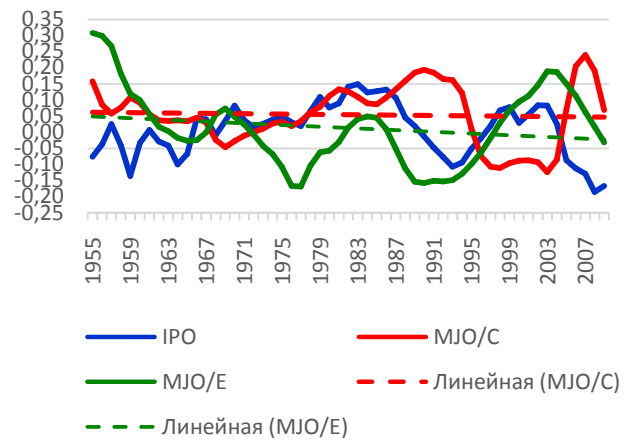


Прогностический индекс МЖО и IPO

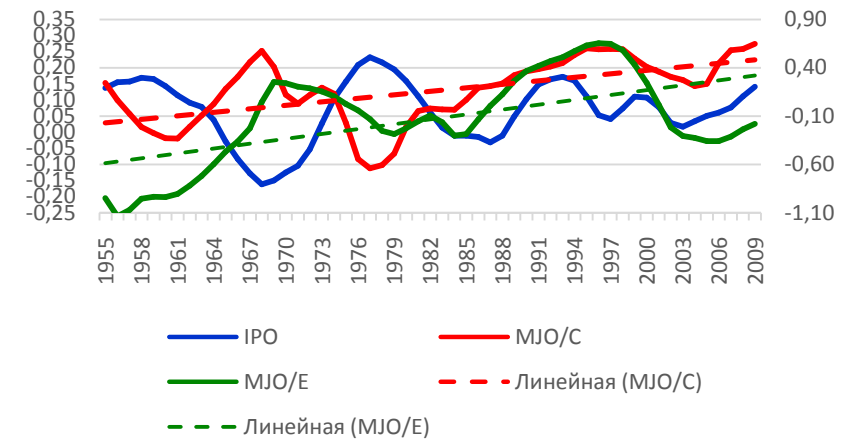
INM-CM5-0



INM-CM6-M



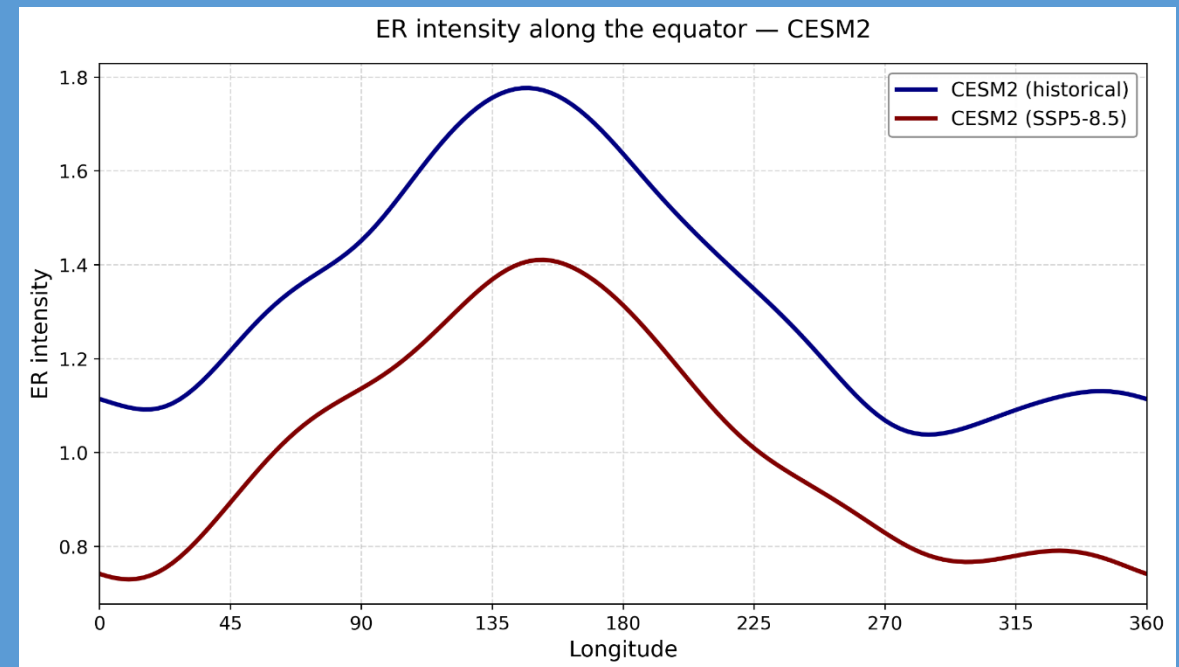
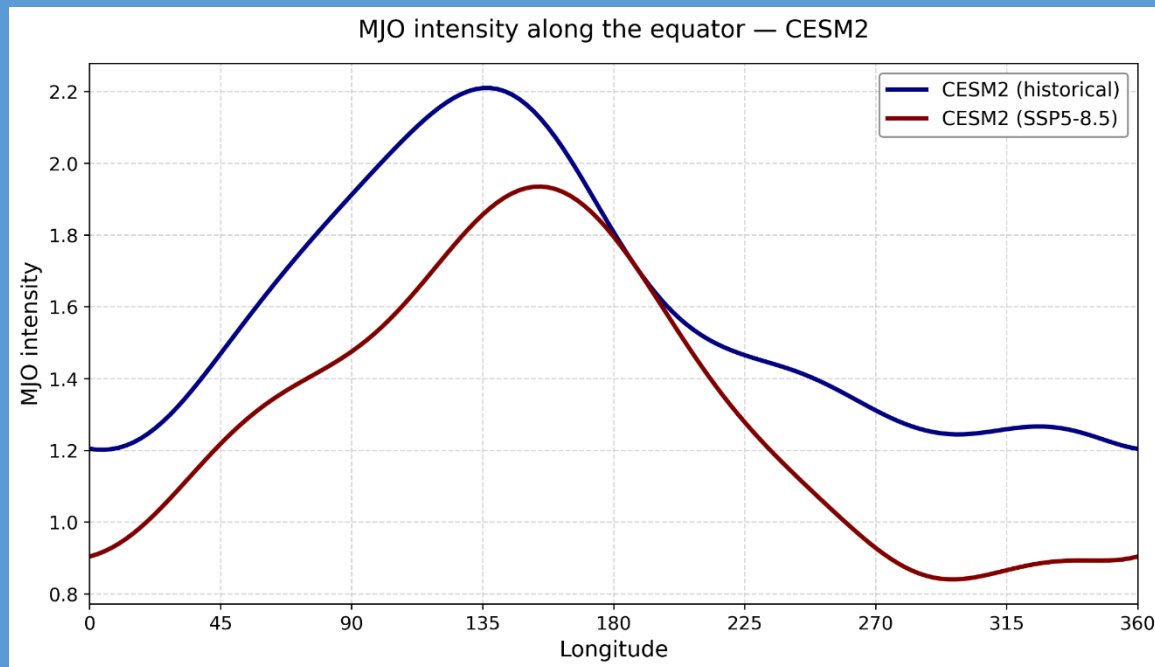
NorESM2-MM



Модели	Correlation with EN index in January				Cross-correlation				11-years running correlation			
	MJO/C	MJO/E	ER/C	ER/E	MJO/C	MJO/E	ER/C	ER/E	MJO/C	MJO/E	ER/C	ER/E
ACCESS-ESM1-5	—	+	+	±	—	+	+	—	—	±	+	±
CanESM5	+	—	+	—	+	—	—	—	+	—	—	—
CESM2	+	±	+	+	+	+	+	+	±	+	+	+
CMCC-CM2-HR4	±	±	+	+	—	±	±	+	±	—	—	+
CMCC-CM2-SR5	+	±	+	+	±	±	+	+	—	+	—	+
CNRM-CM6-1	±	±	±	±	—	±	—	±	—	+	—	—
EC-Earth3	+	±	+	±	+	±	+	±	±	—	±	+
GFDL-CM4	+	±	+	—	—	+	—	±	—	—	±	+
INM-CM5-0	±	—	—	—	—	—	—	—	±	±	—	+
INM-CM6-M	±	±	±	—	+	±	+	—	±	+	—	±
IPSL-CM6A-LR	—	±	+	+	—	—	+	—	—	—	±	—
MIROC6	+	+	+	+	±	+	—	±	±	—	±	—
MPI-ESM1-2-HR	—	±	+	±	—	—	±	—	—	—	+	±
MPI-ESM1-2-LR	+	±	+	+	—	—	±	±	+	±	+	±
+MRI-ESM2-0	—	—	+	+	—	—	—	±	—	—	±	±
NorESM2-MM	+	+	+	+	±	+	—	+	+	+	+	+

CESM

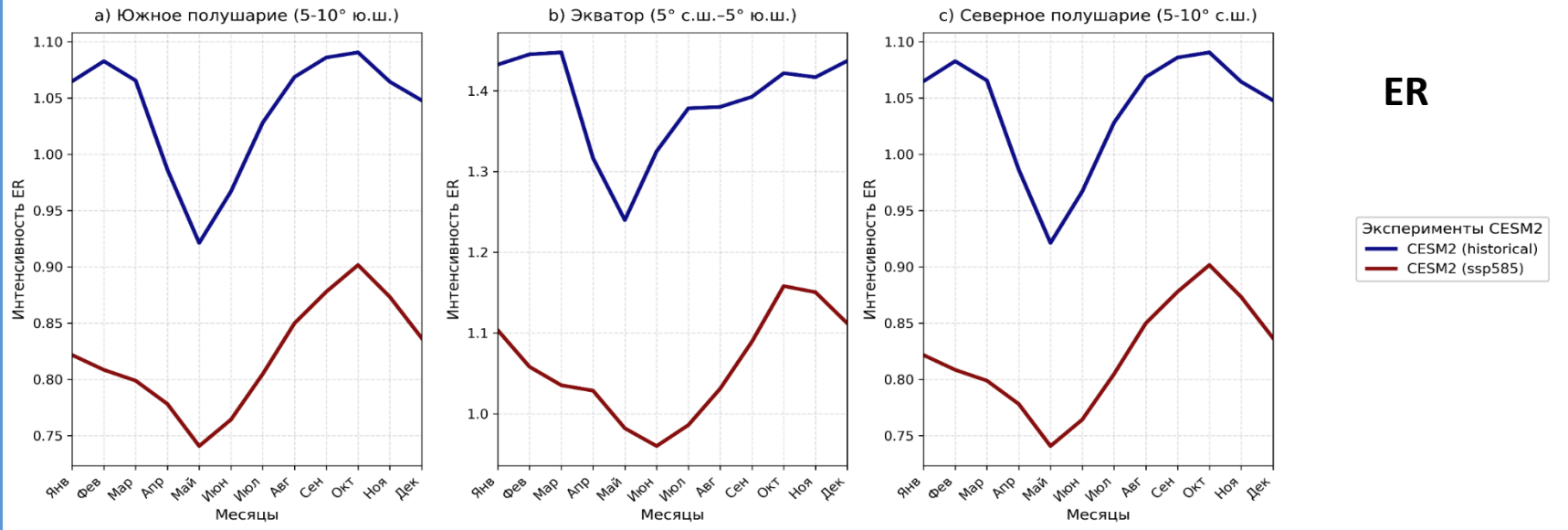
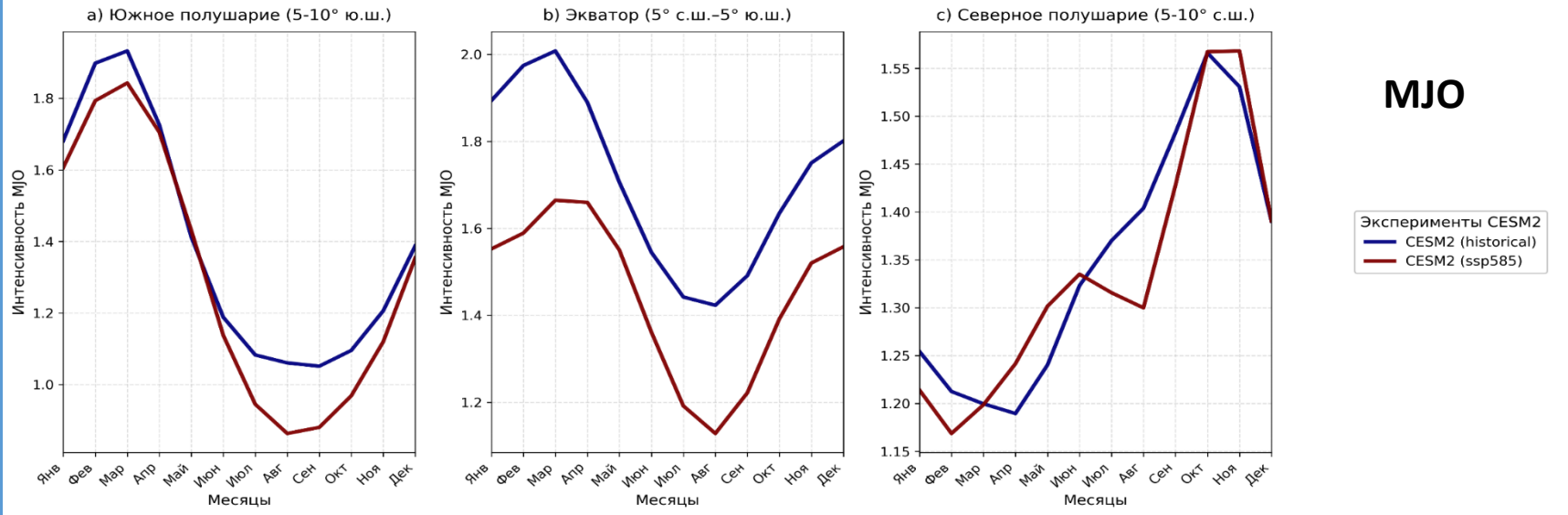
Распределение интенсивности МЖО и ER вдоль экватора



В будущем климате интенсивность МЖО на экваторе уменьшается а максимум смещается на восток

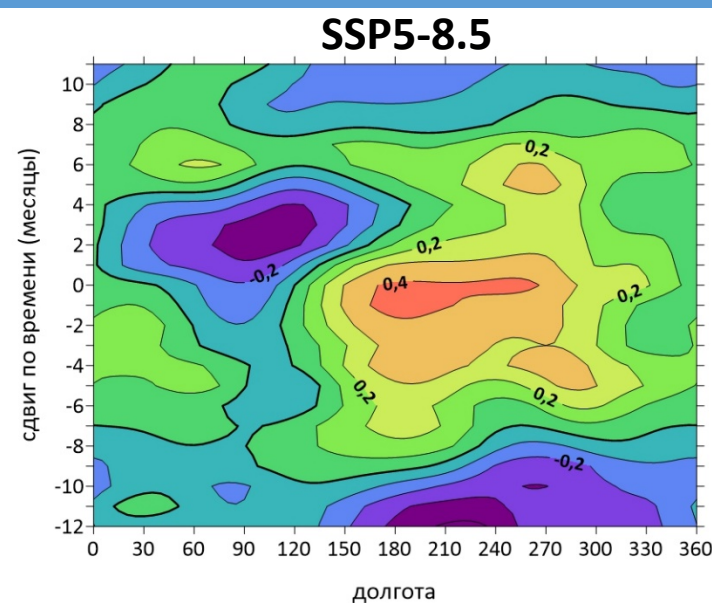
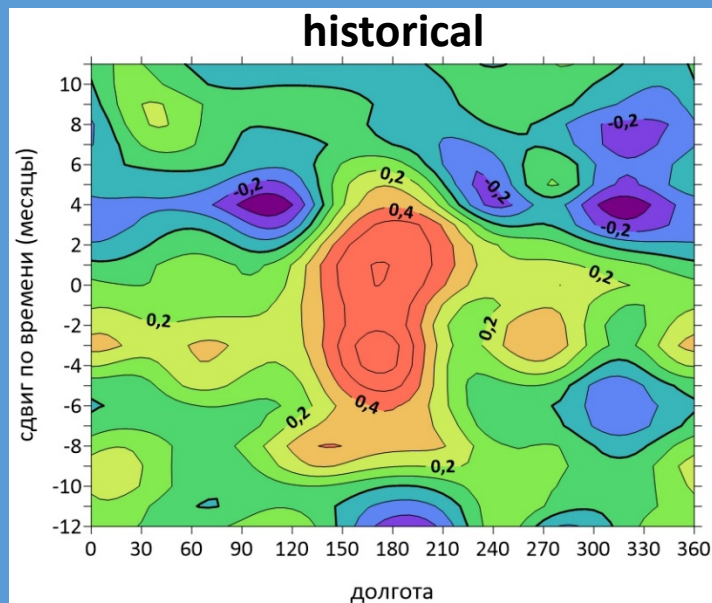
Интенсивность волн Россби уменьшается вдвое!

Сезонный ход интенсивности MJO и ER вдоль экватора

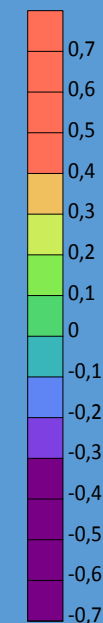
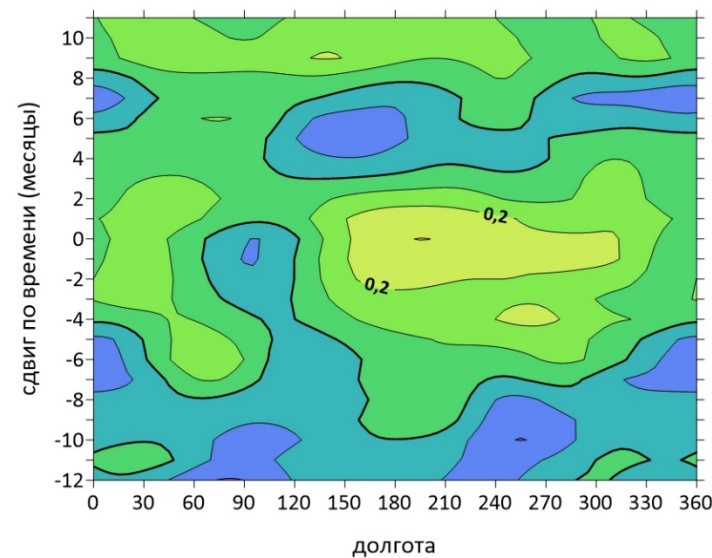
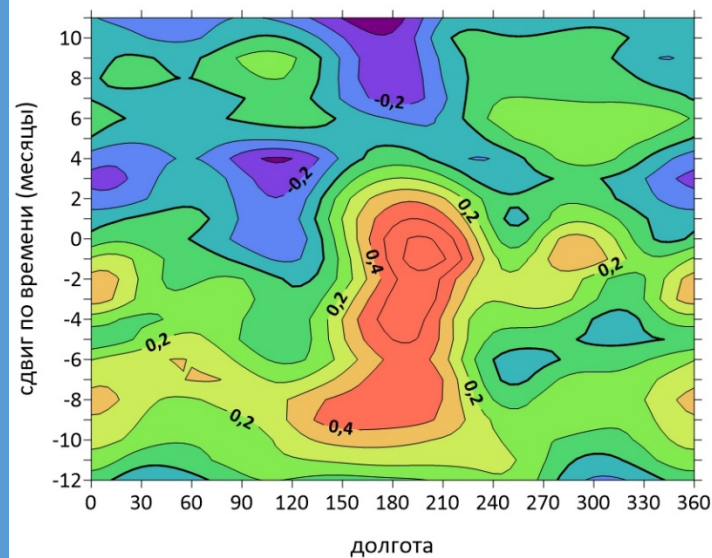


Корреляция интенсивности МЈО с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)

Индекс С

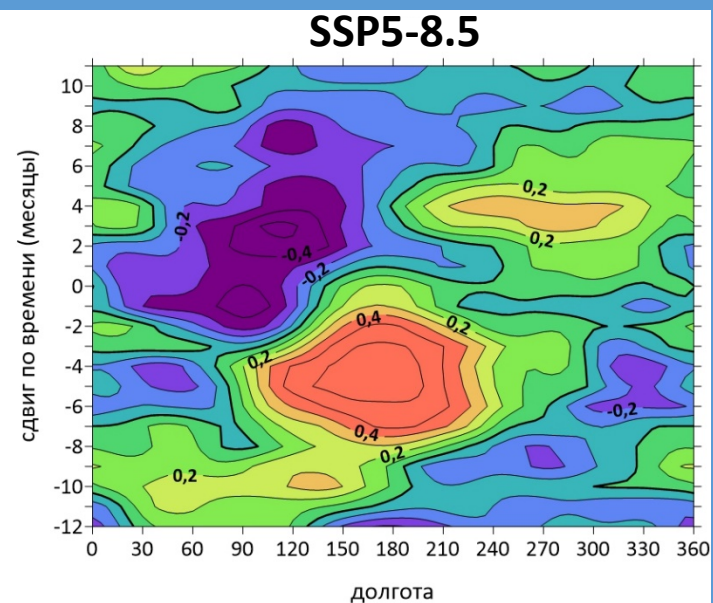
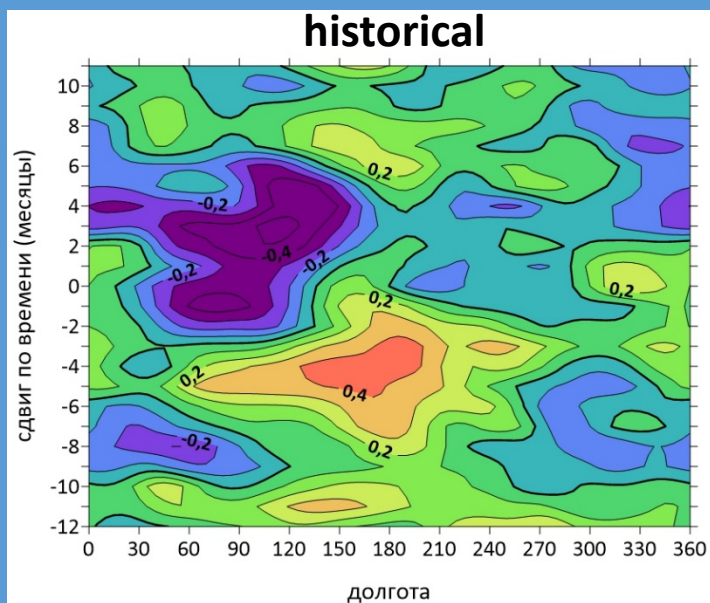


Индекс Е

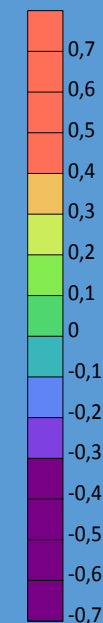
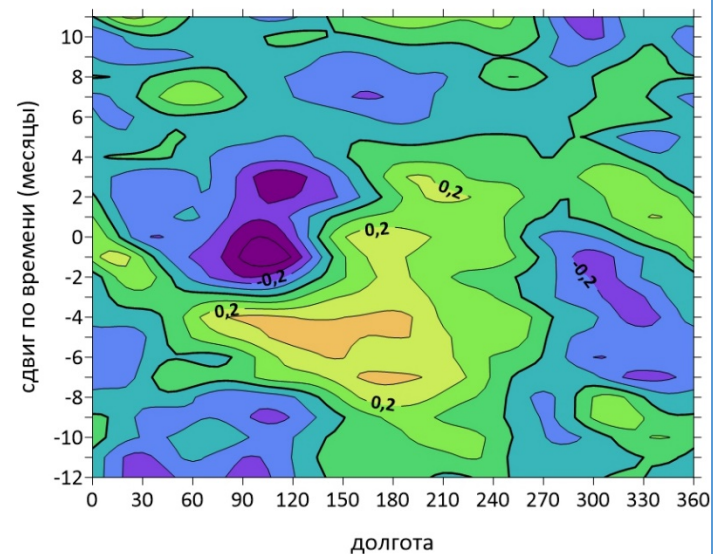
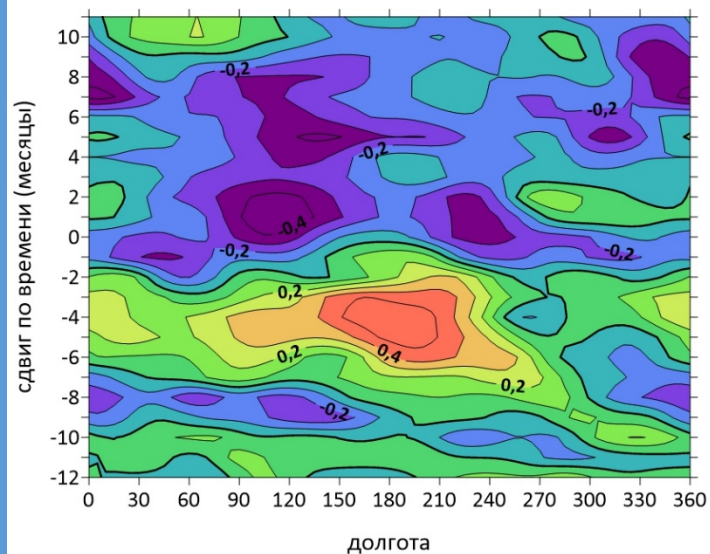


Корреляция интенсивности ER с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)

Индекс С



Индекс Е

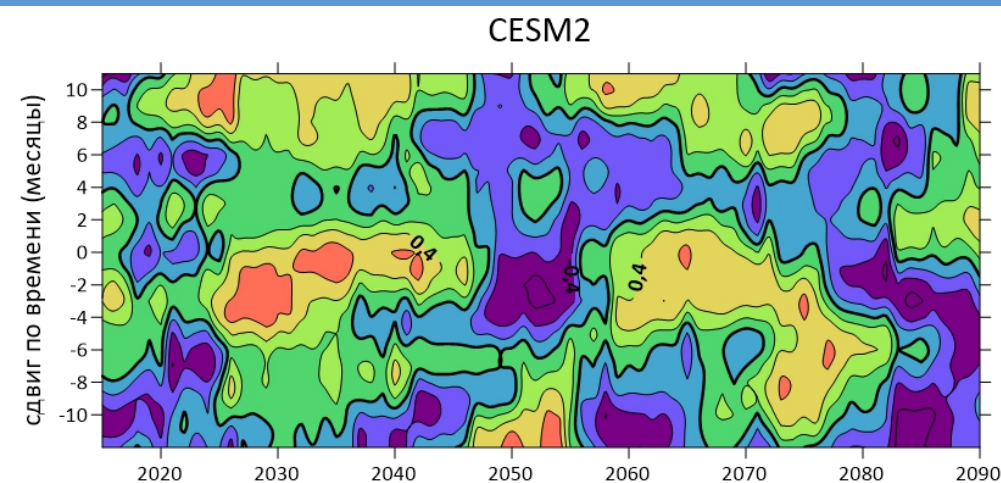
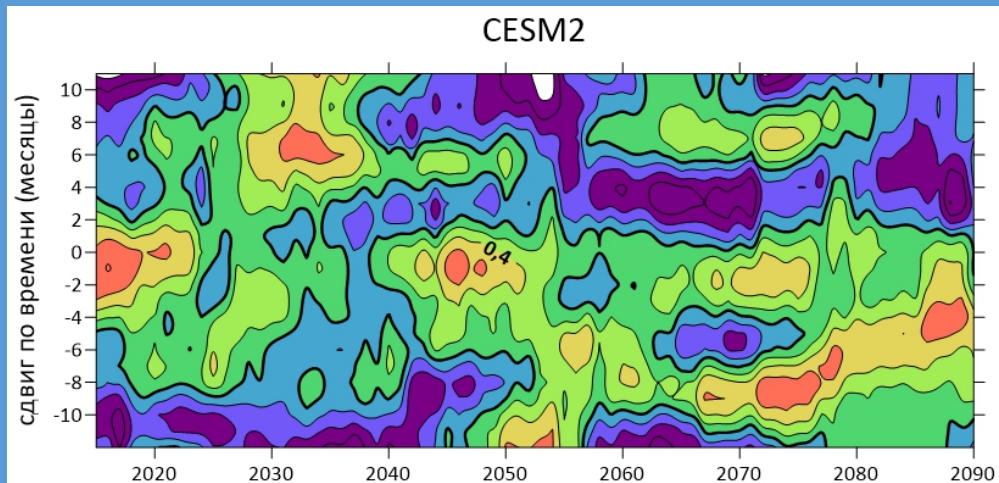


11- летняя скользящая корреляция индексов **MJO** и **ER** с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)

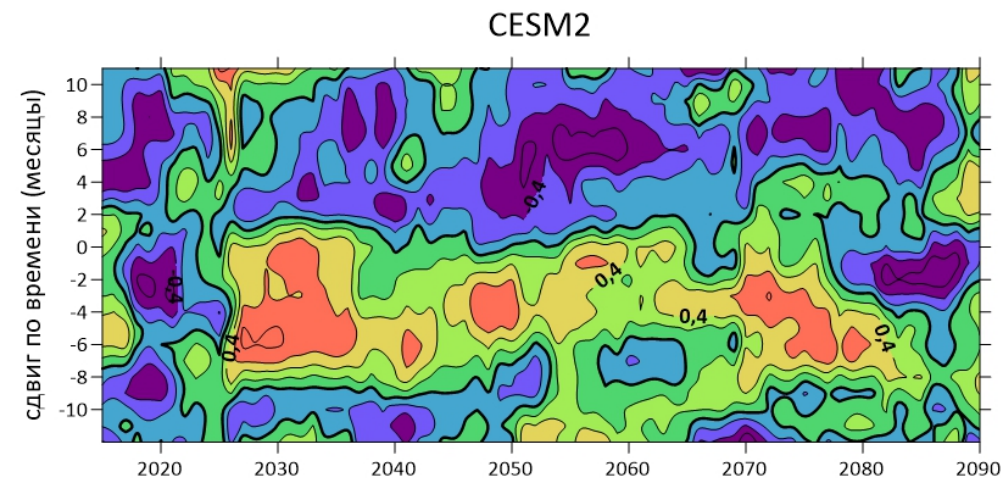
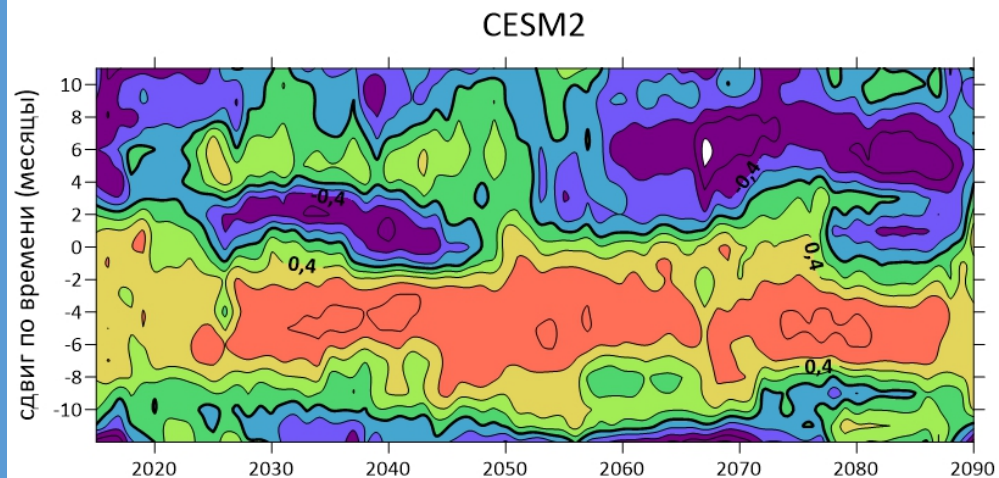
Индекс С

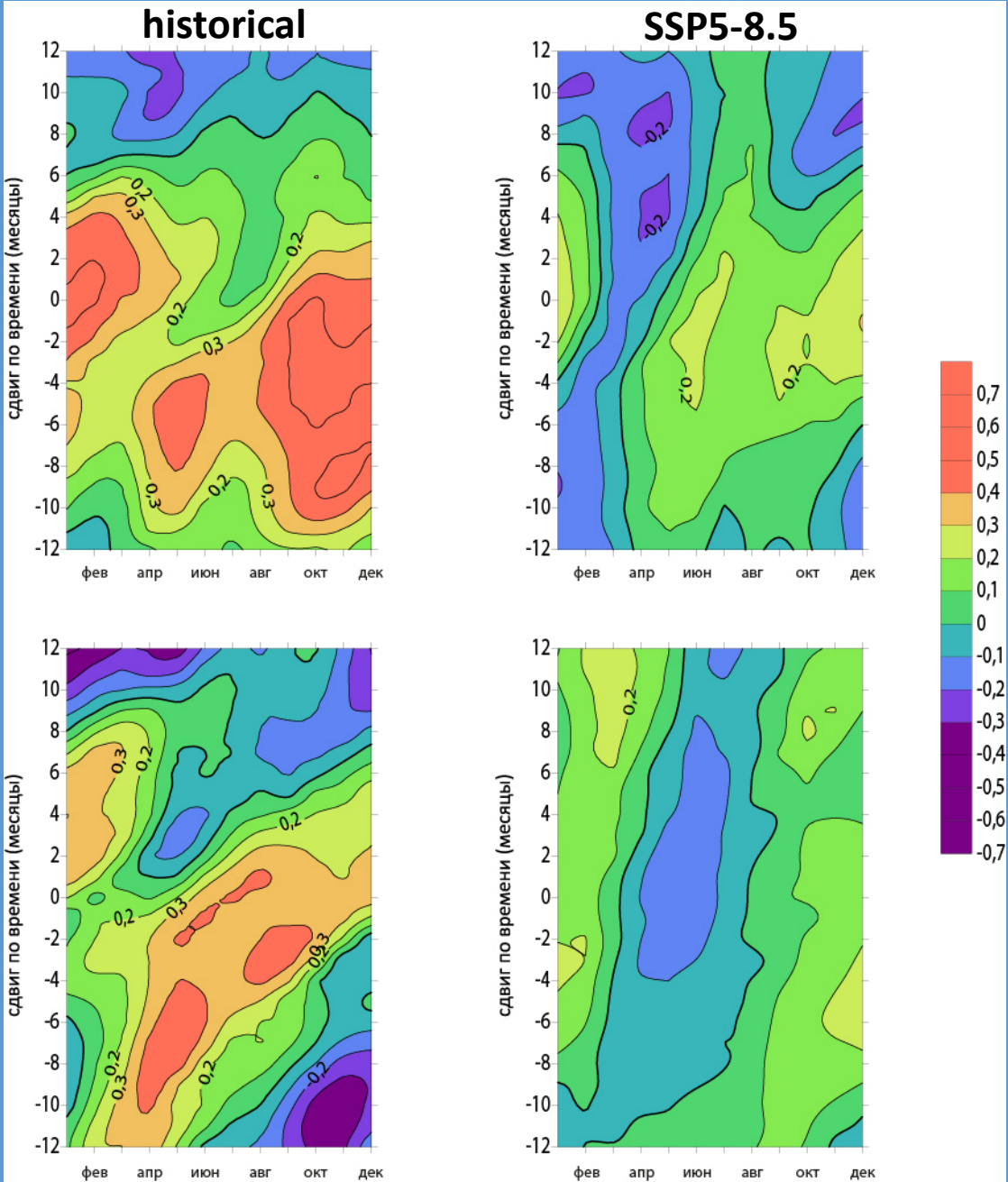
Индекс Е

MJO



ER





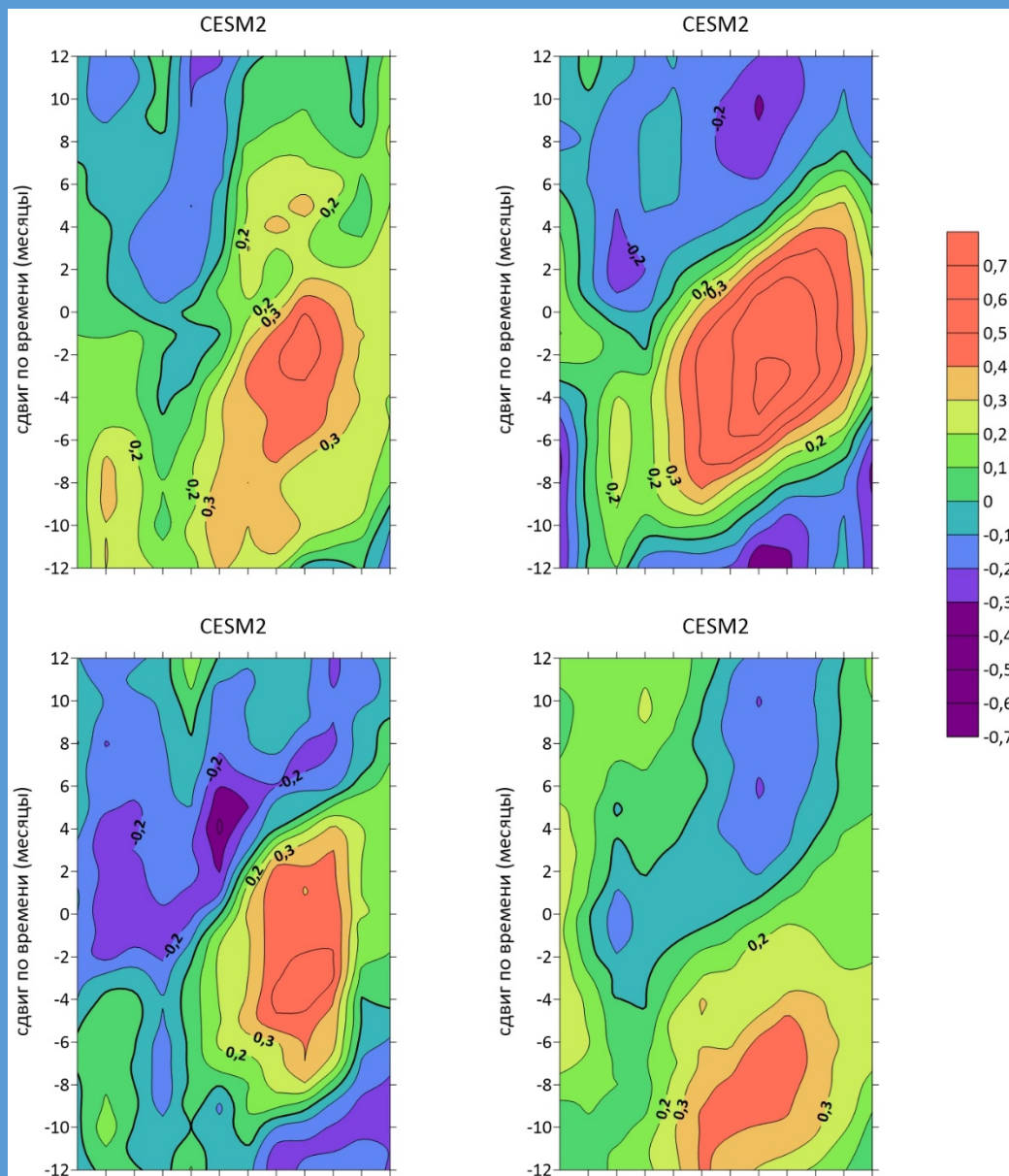
Кросс-корреляция индекса
интенсивности **МЮ** с
индексами Эль-Ниньо

Индекс С

Индекс Е

historical

SSP5-8.5

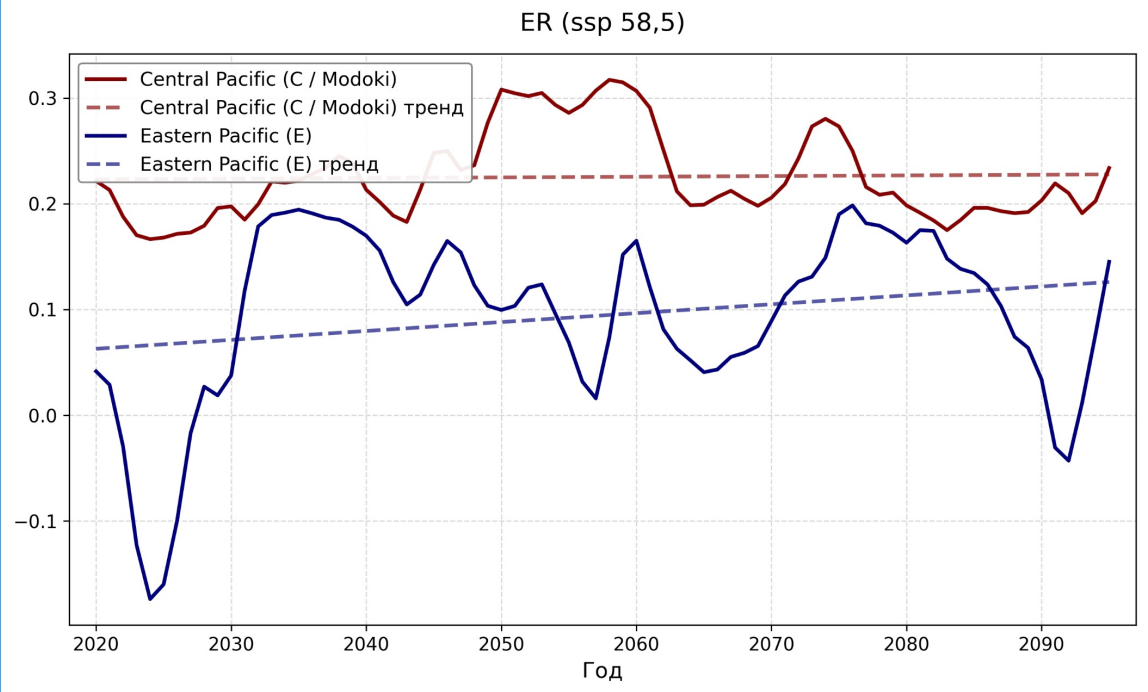
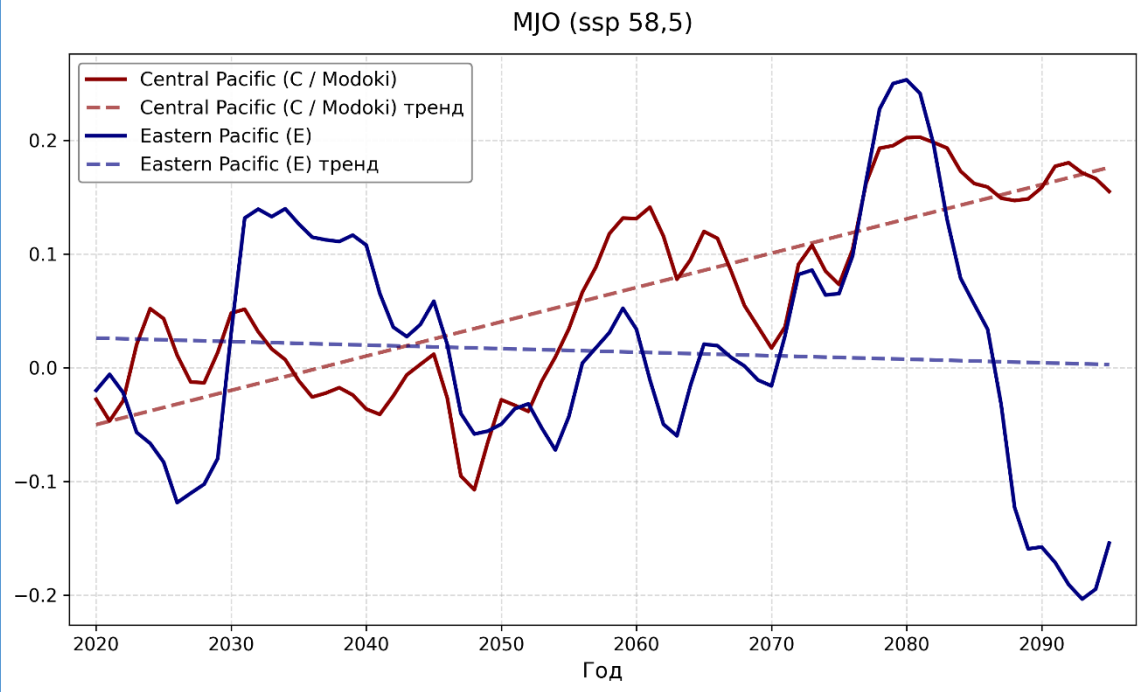


Кросс-корреляция
индекса
интенсивности **ER** с
индексами Эль-Ниньо

Индекс С

Индекс Е

Индекс прогностического потенциала

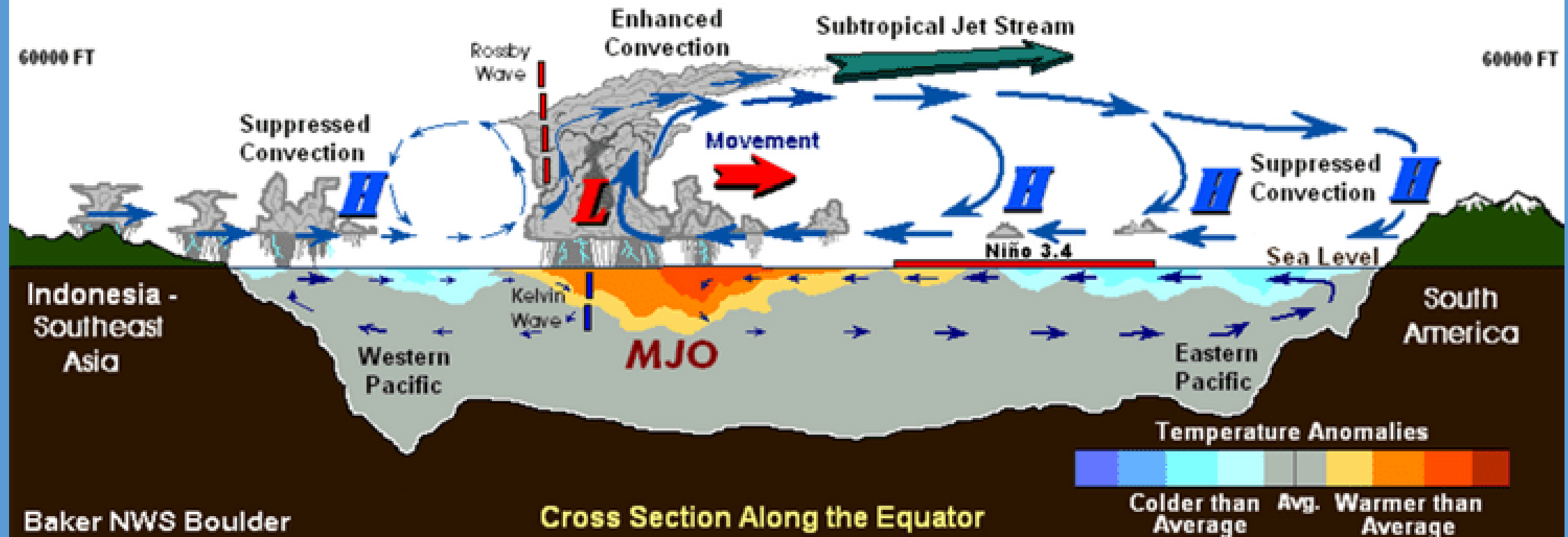


- Модели, корректно воспроизводящие механизм генерации Эль-Ниньо, ЕСТЬ
- Новая версия модели INM-CM6 существенно лучше воспроизводит данный механизм, но пока существенно хуже, чем лучшие модели
- В будущем климате вклад МЮ в генерацию Эль-Ниньо ослабляется, так же, как и прогностический потенциал
- Вклад волн Россби в генерацию Эль-Ниньо и прогностический потенциал существенно не изменяется

Спасибо за внимание!



Madden-Julian Oscillation (MJO) in the Tropical Pacific Ocean



- Период 30-60 дней
- Возмущения в поле конвекции и циркуляции, амплитуда 10 Вт/м^2 для УДР и 1 м/с для зонального ветра на 850 гПа
- Распространяются на восток со средней скоростью $\sim 5 \text{ м/с}$ (430 км/сутки),
- Наблюдаются над Индийским и Западным Тихим океанами

Конвективно-связанные экваториальные волны Кельвина

(from M. Wheeler “Tropical meteorology”)

$$v_{Kelvin} = \sqrt{g h / k}$$

v – частота

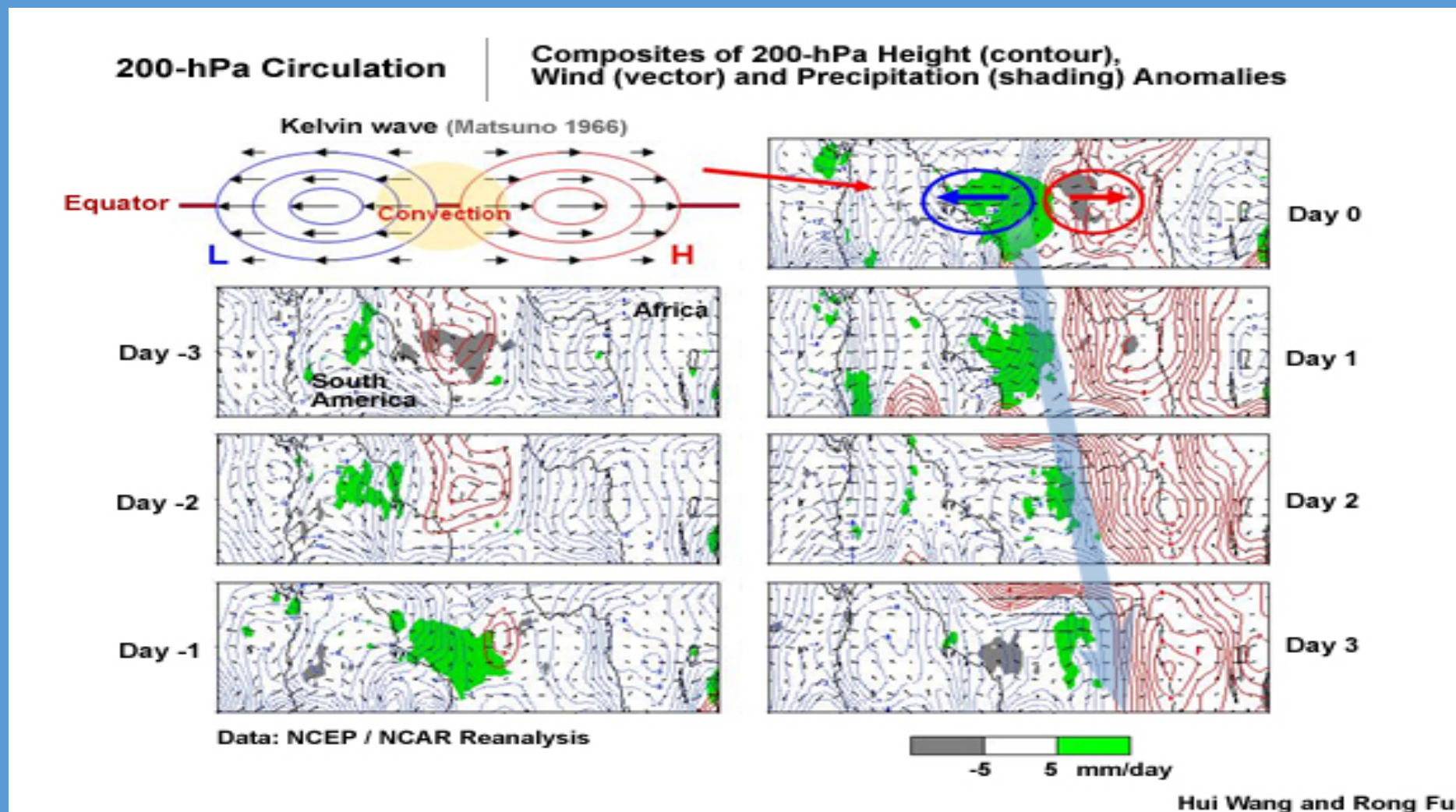
k – зональное волновое число

h – эквивалентная толщина
атмосферы

g – ускорение свободного
падения

- Максимум на экваторе
- Меридиональный масштаб 2000 км
- Зональный масштаб 2000-20000 км
- Распространяются на восток со средней скоростью 30-60 м/с в сухой атмосфере и 12-25 м/с во влажной атмосфере
- Меридиональная компонента отсутствует

Конвективно-связанные экваториальные волны Кельвина



Конвективно-связанные экваториальные волны Россби

(from M. Wheeler “Tropical meteorology”)

$$v_{Rossby} \approx \frac{-\beta k}{k^2 + (2n + 1)\beta / \sqrt{g h_1}}$$

v – частота

k – зональное волновое число

β – меридиональная производная параметра Кориолиса

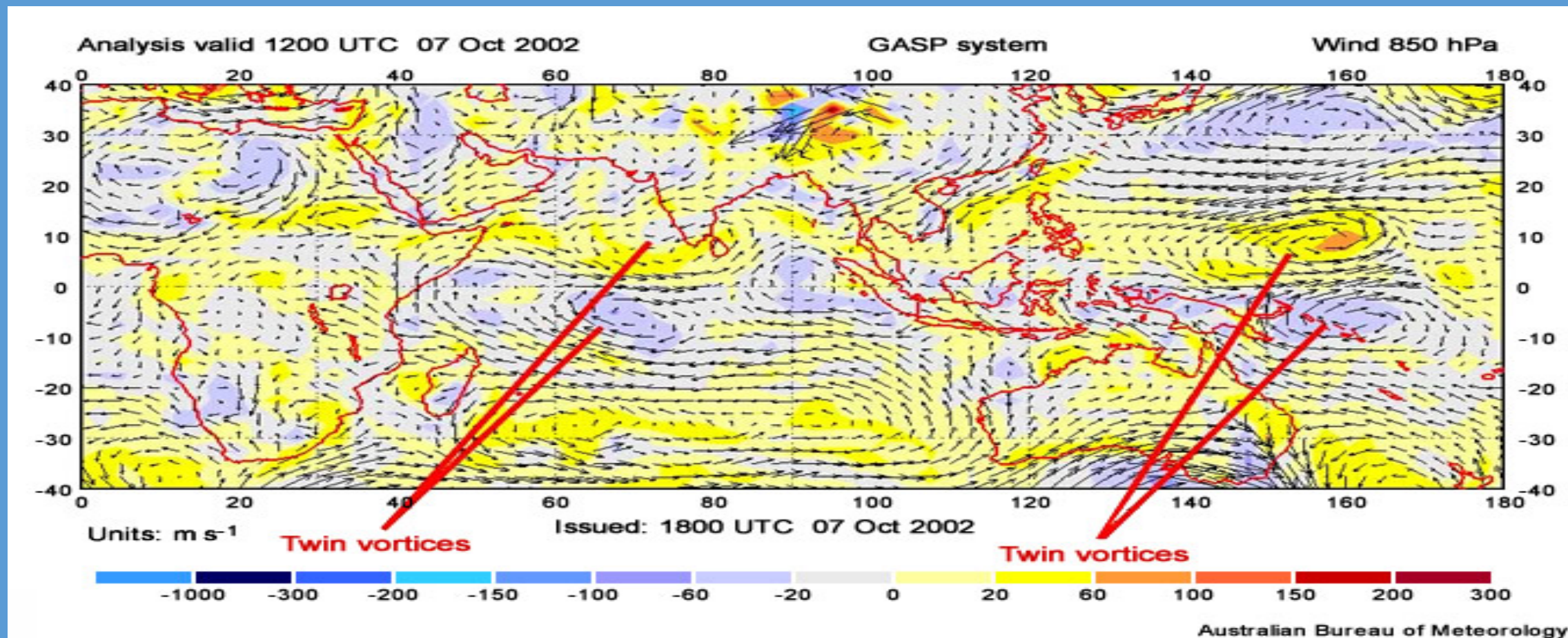
n – число меридиональных мод

h – эквивалентная толщина атмосферы

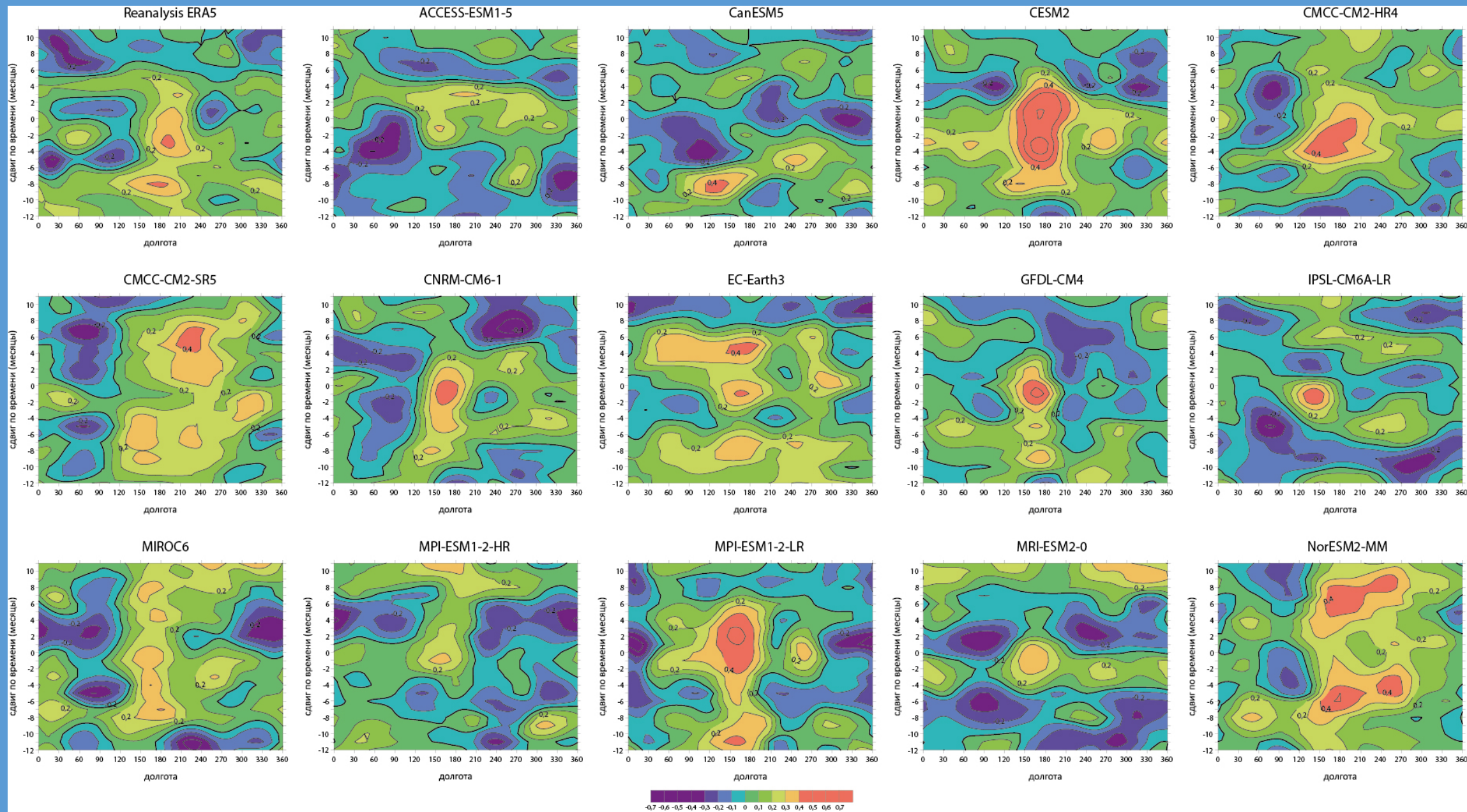
g – ускорение свободного падения

- Максимум на 10° широты
- Зональный масштаб 10 000 км
- Распространяются на запад со средней скоростью 10-15 м/с в сухой атмосфере и 5-7 м/с во влажной атмосфере

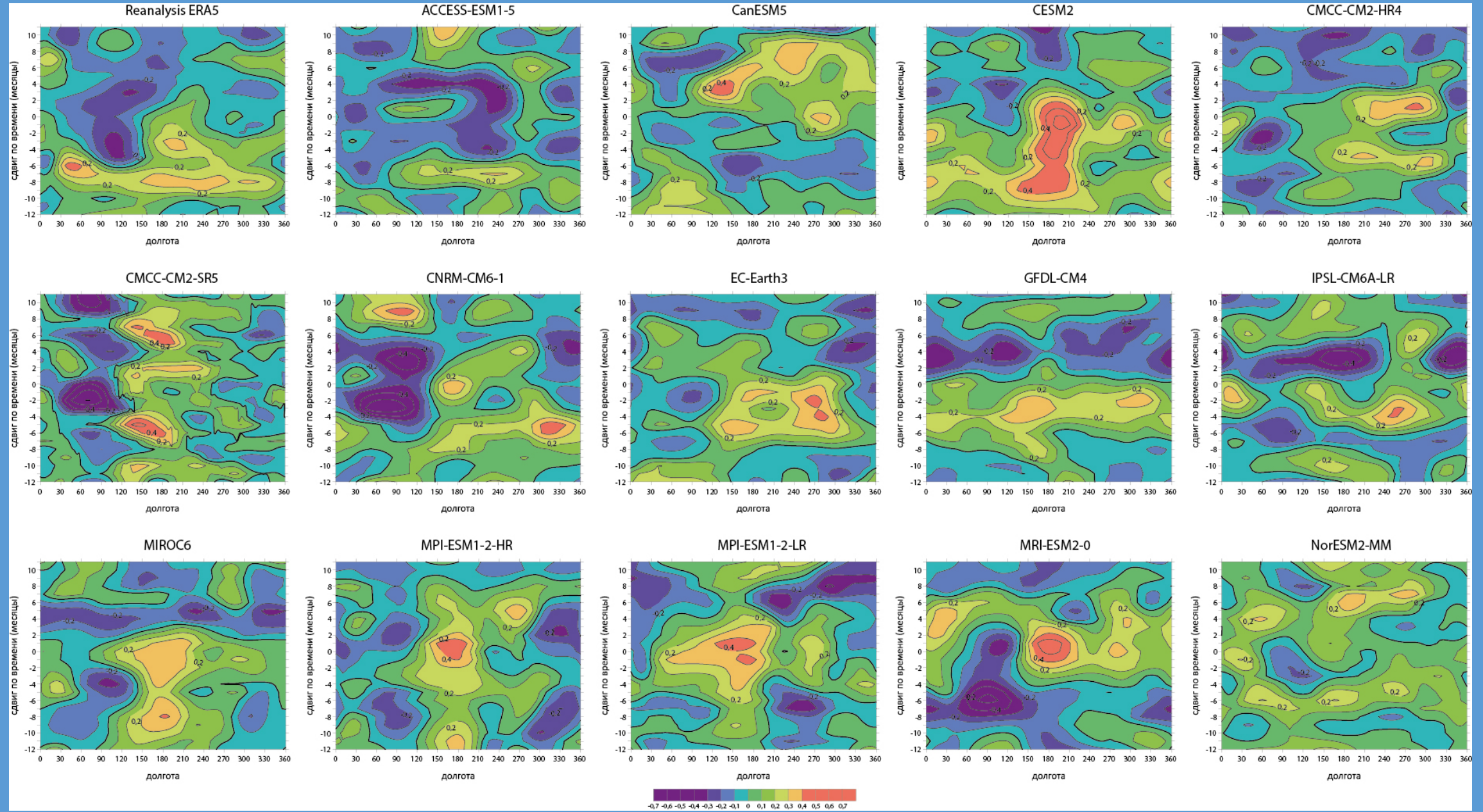
Конвективно-связанные экваториальные волны Россби



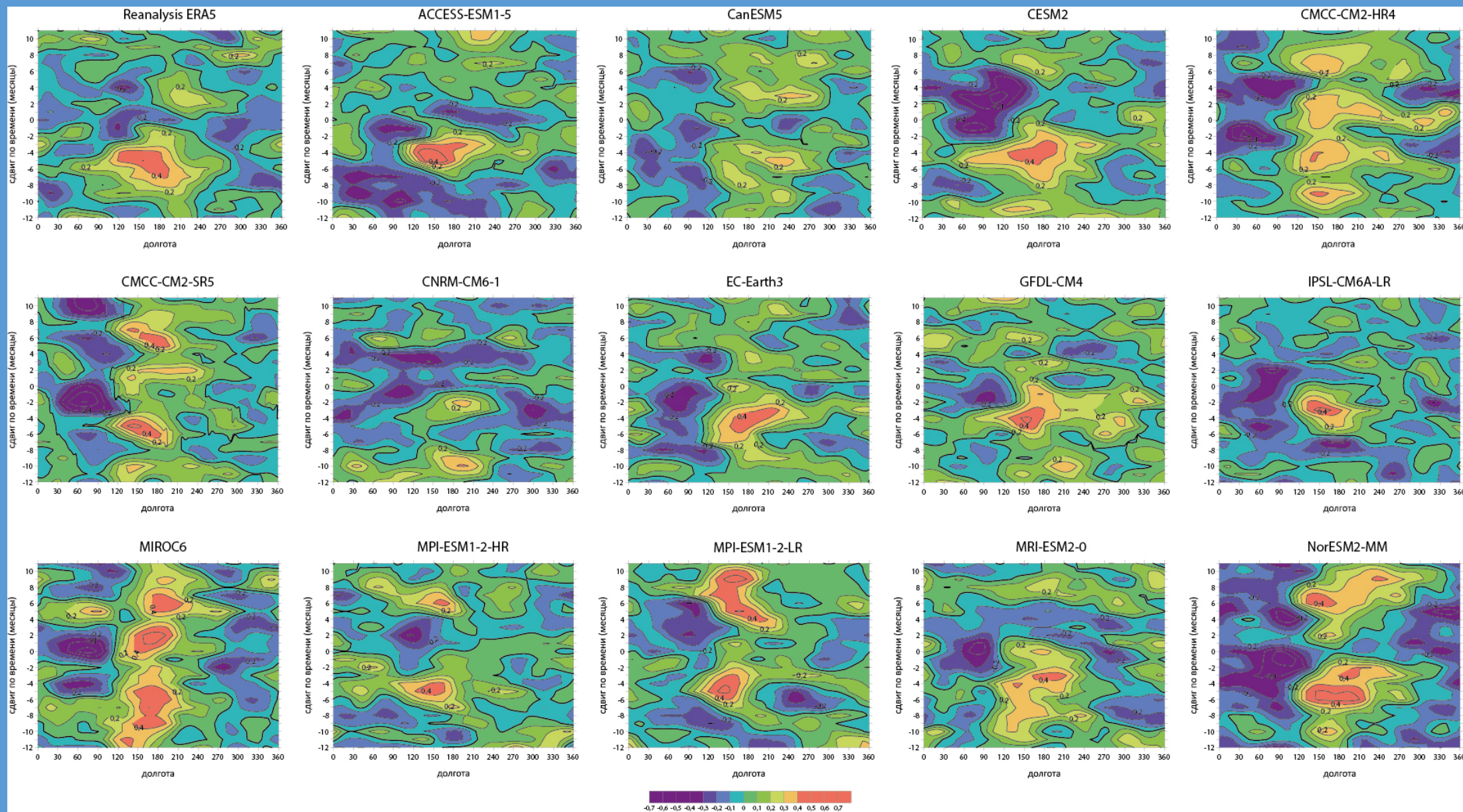
Корреляция интенсивности МЮ с индексом ЦТ Эль-Ниньо в январе (пик события)



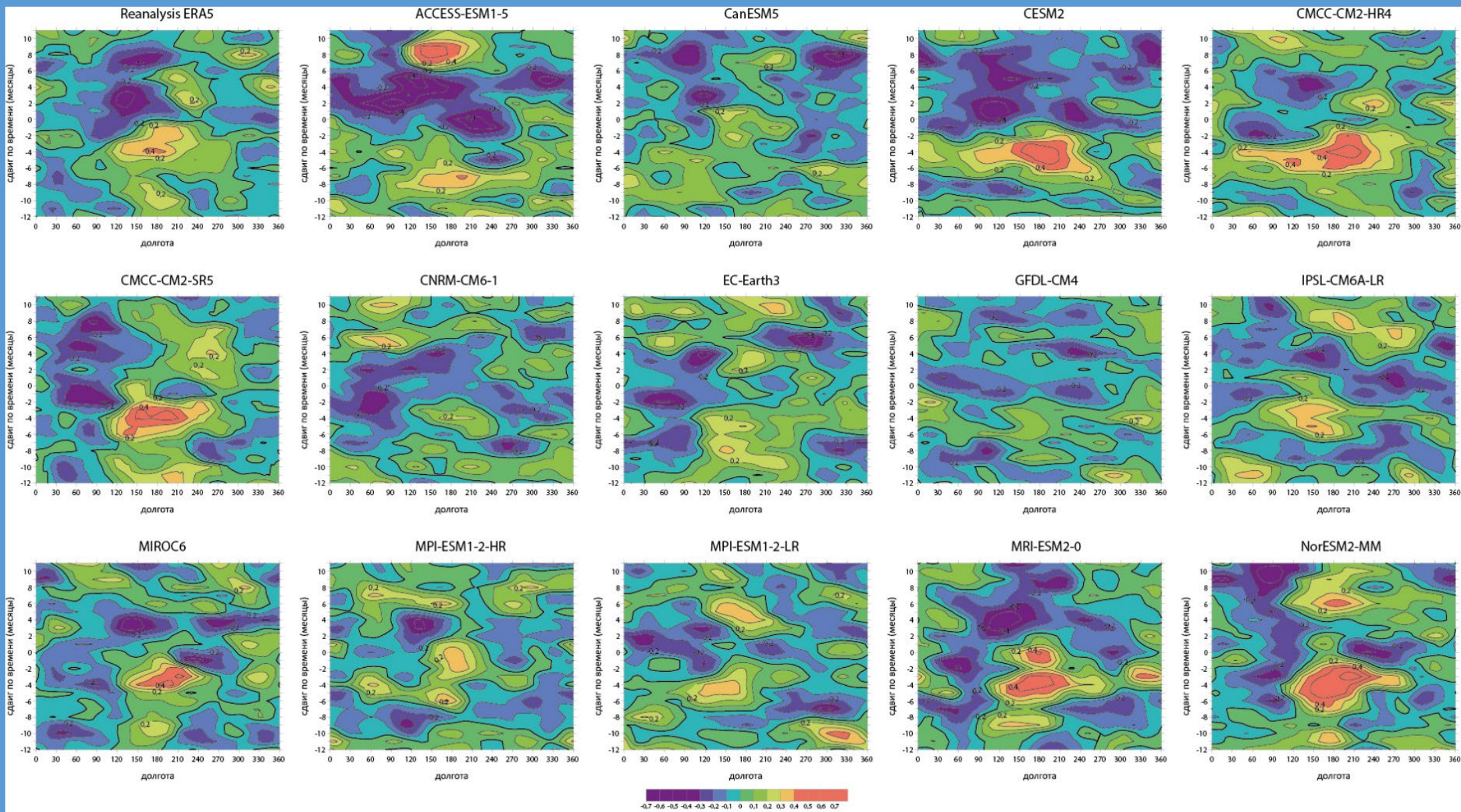
Корреляция интенсивности МЮ с индексом ВТ Эль-Ниньо в январе (пик события)



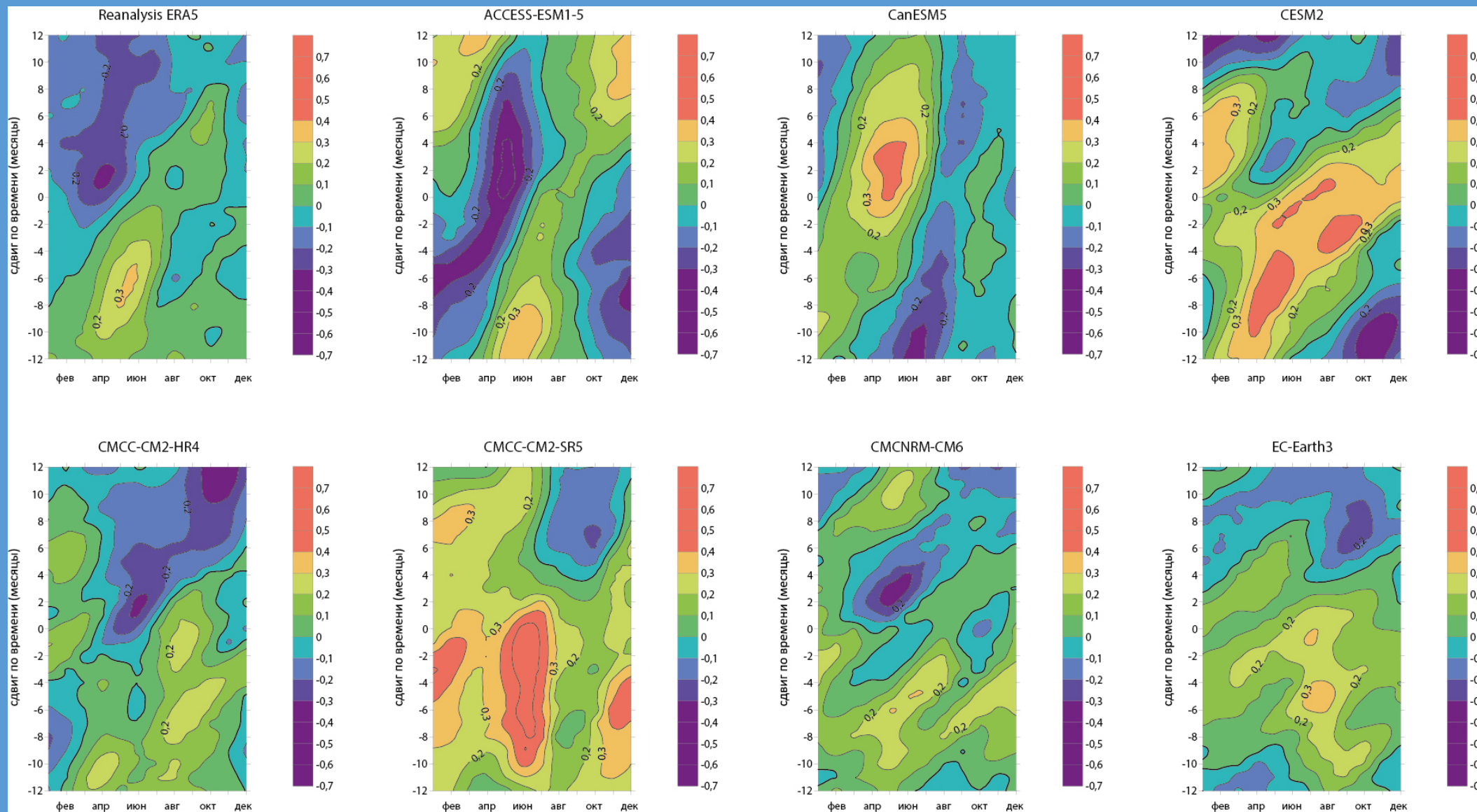
Корреляция интенсивности ER с индексом ЦТ Эль-Ниньо в январе (пик события)



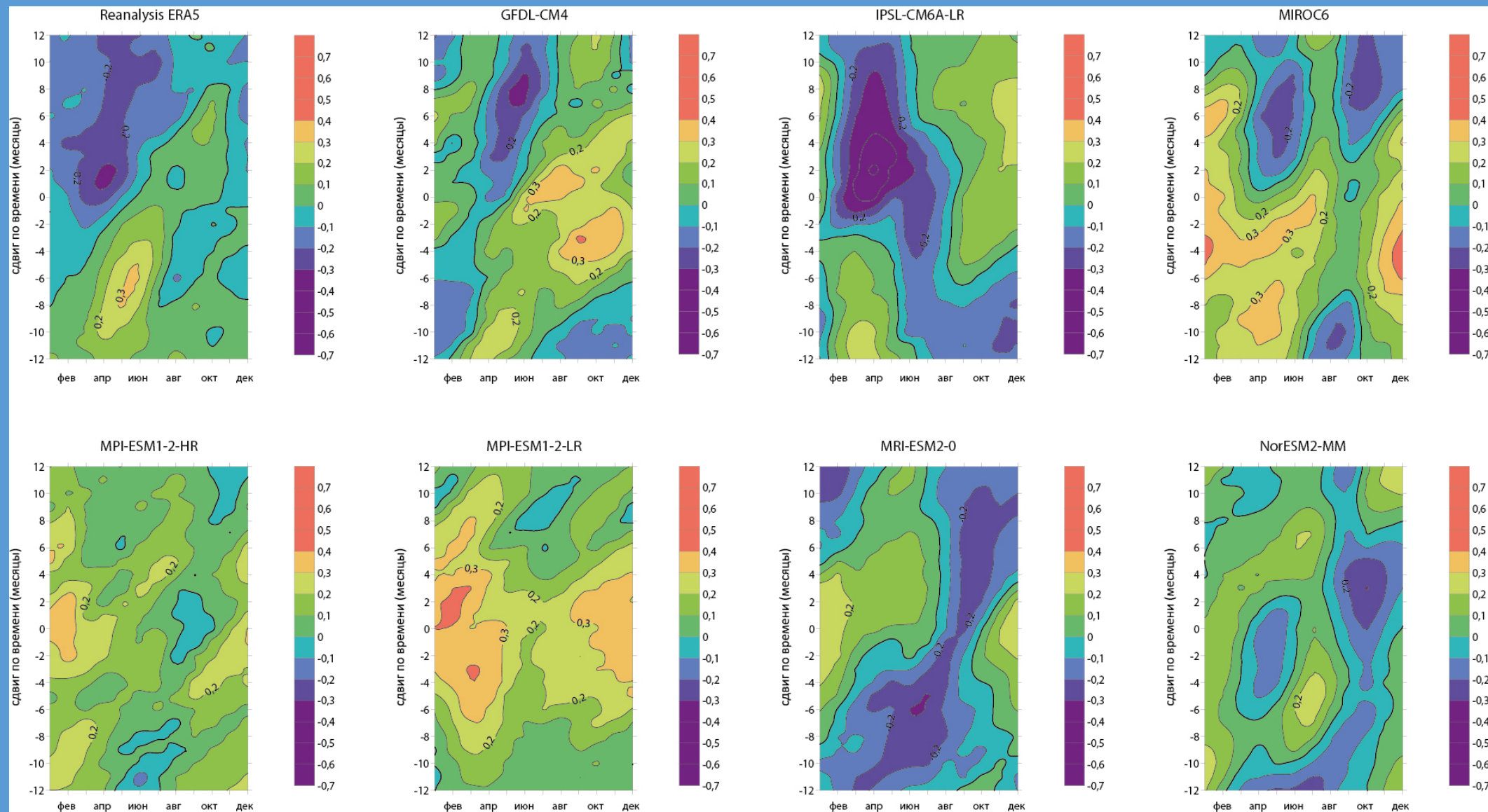
Корреляция интенсивности ER с индексом BT Эль-Ниньо в январе (пик события)



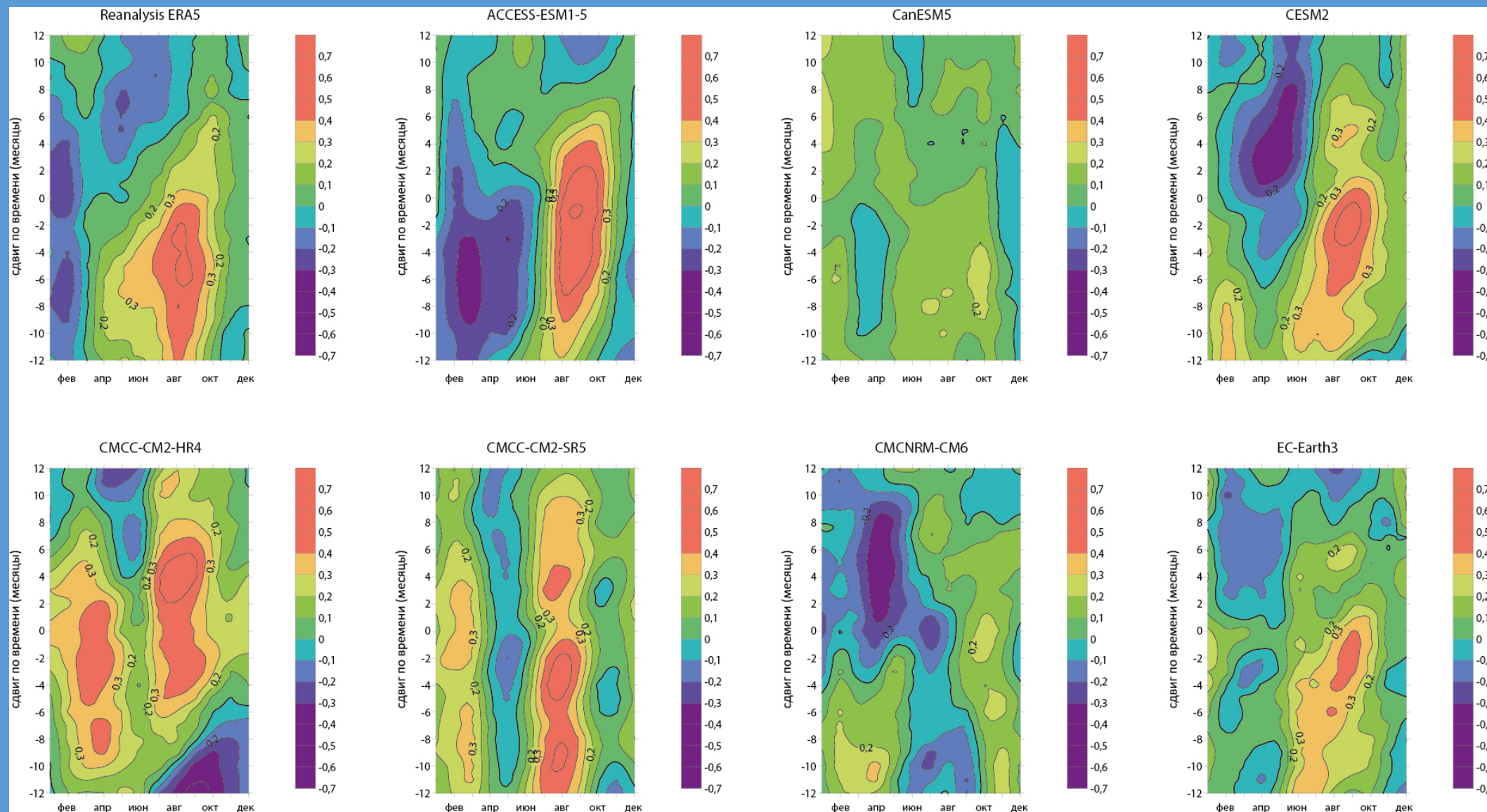
Кросс-корреляция индекса интенсивности МЮ с индексом ВТ Эль-Ниньо



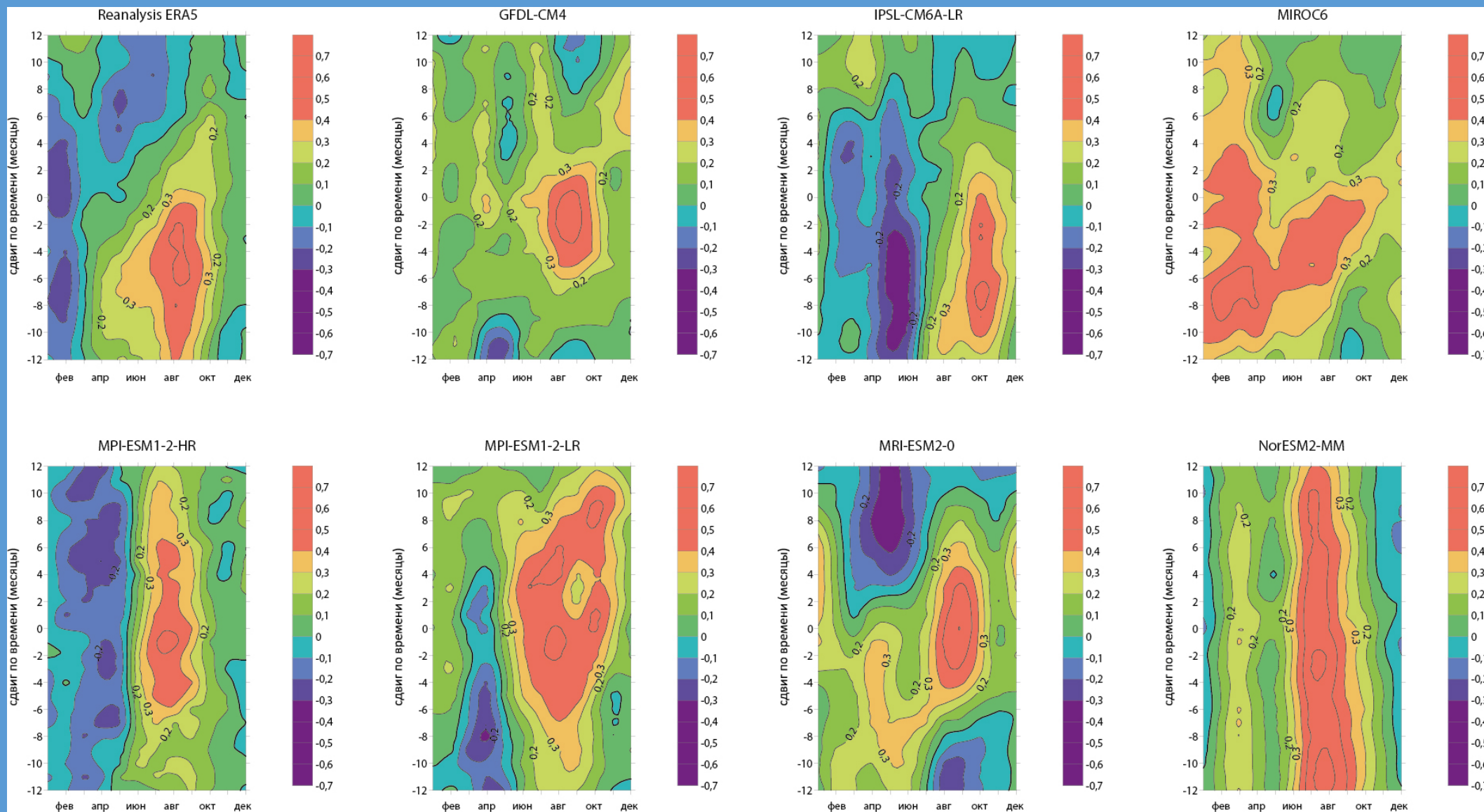
Кросс-корреляция индекса интенсивности МЮ с индексом ВТ Эль-Ниньо



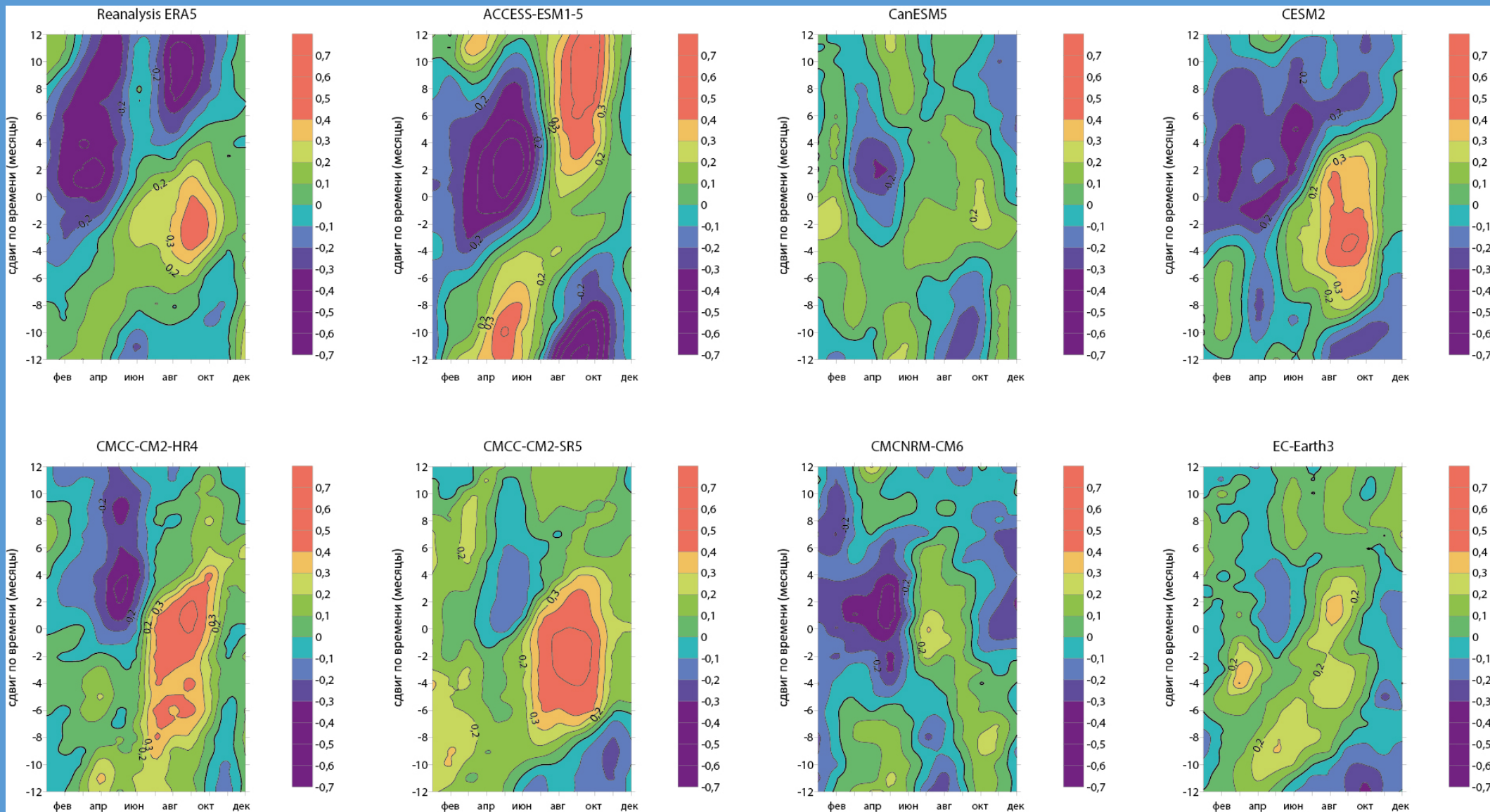
Кросс-корреляция индекса интенсивности ER с индексом ЦТ Эль-Ниньо



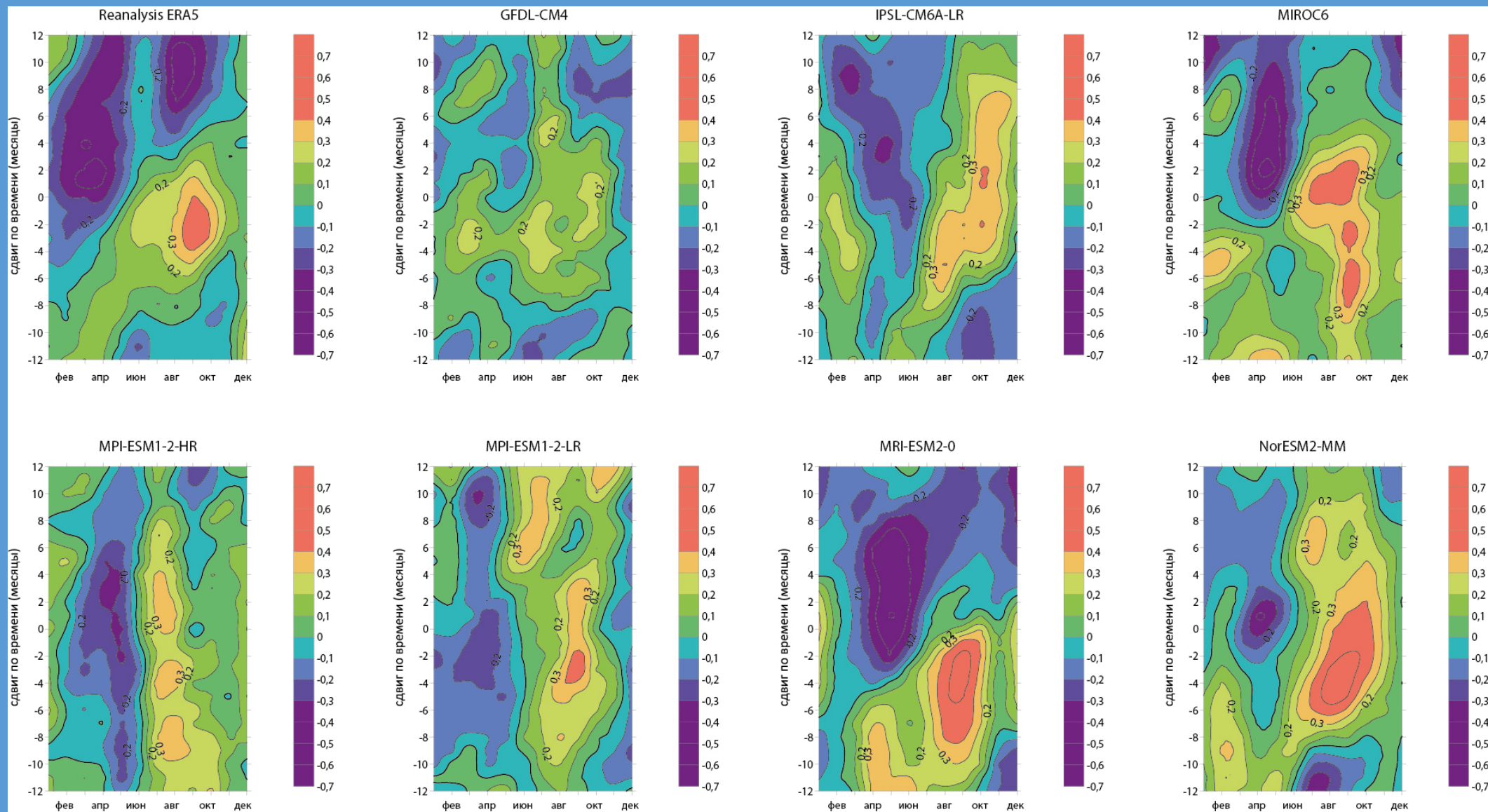
Кросс-корреляция индекса интенсивности ER с индексом ЦТ Эль-Ниньо



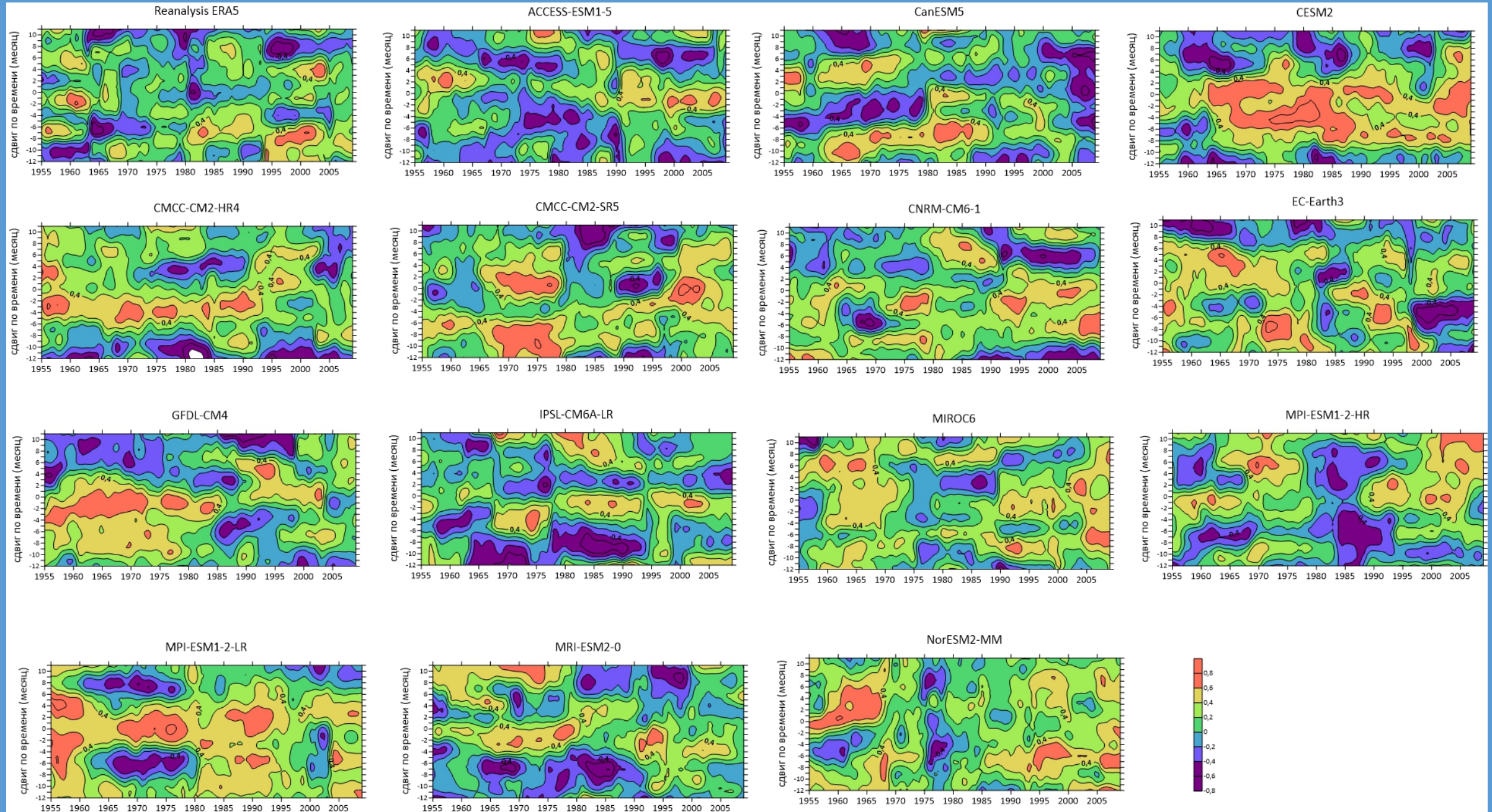
Кросс-корреляция индекса интенсивности ER с индексом BT Эль-Ниньо



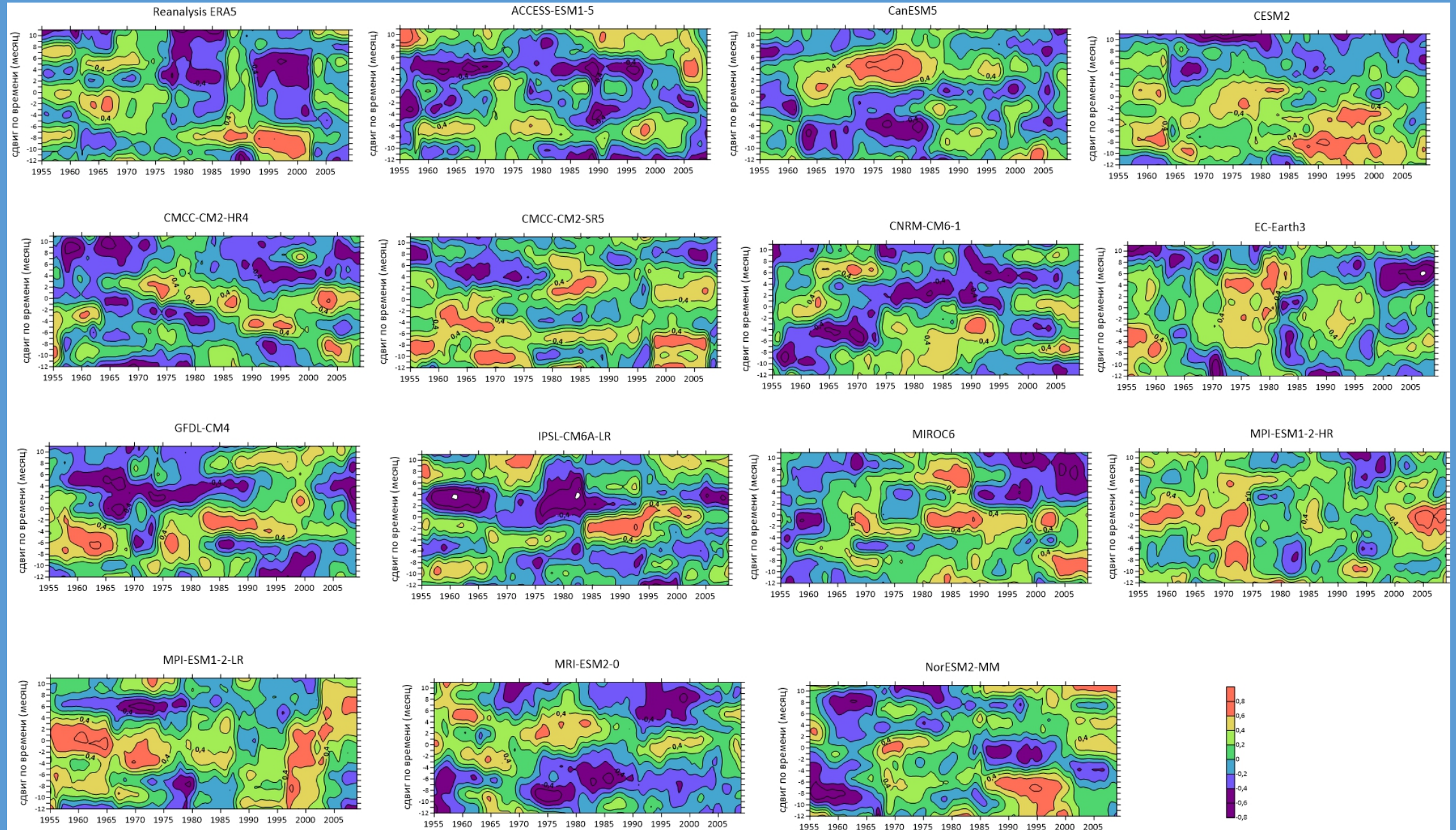
Кросс-корреляция индекса интенсивности ER с индексом BT Эль-Ниньо



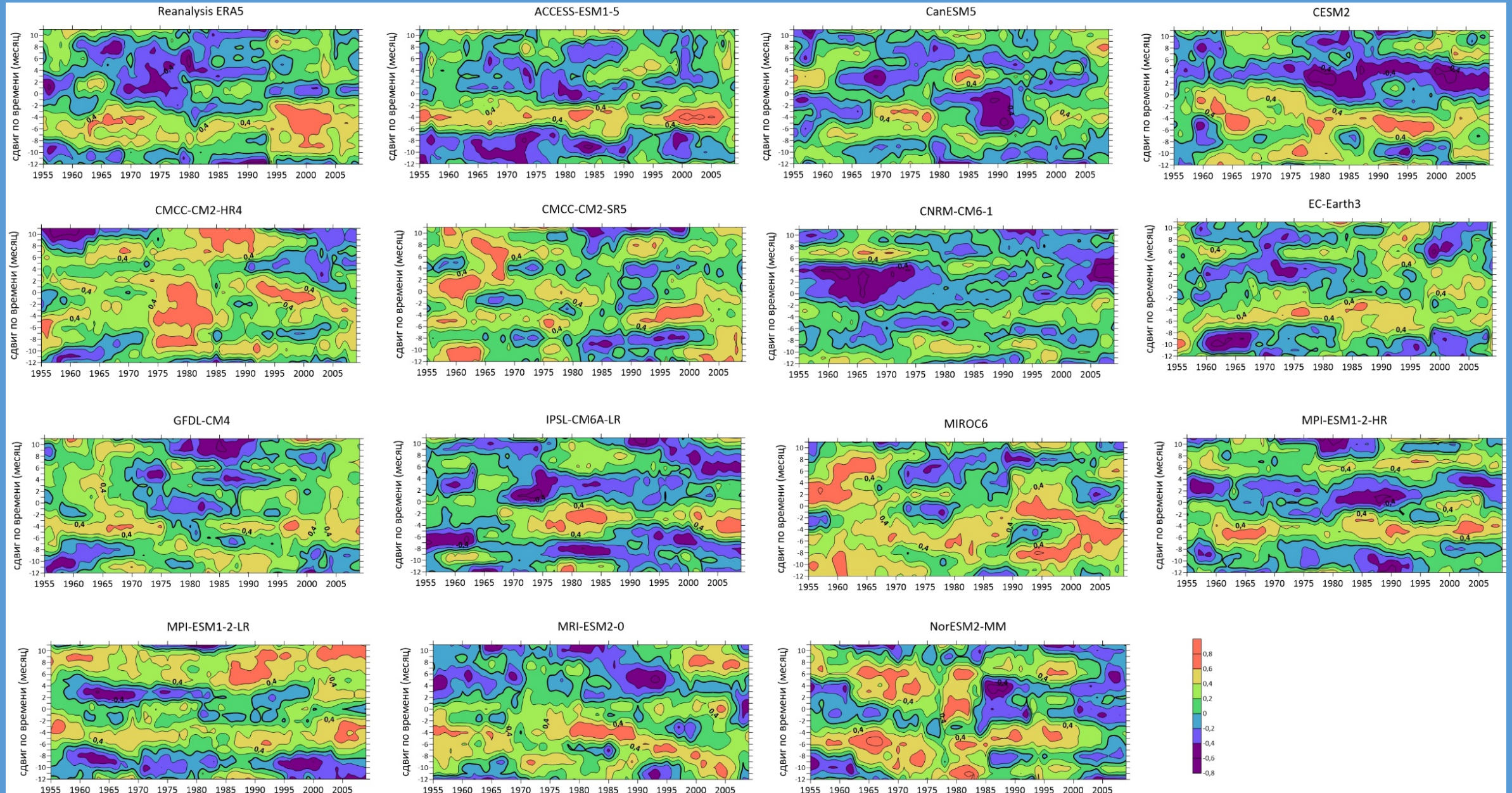
11- летняя скользящая корреляция интенсивности МЮ с индексом ЦТ Эль-Ниньо в январе (пик события)



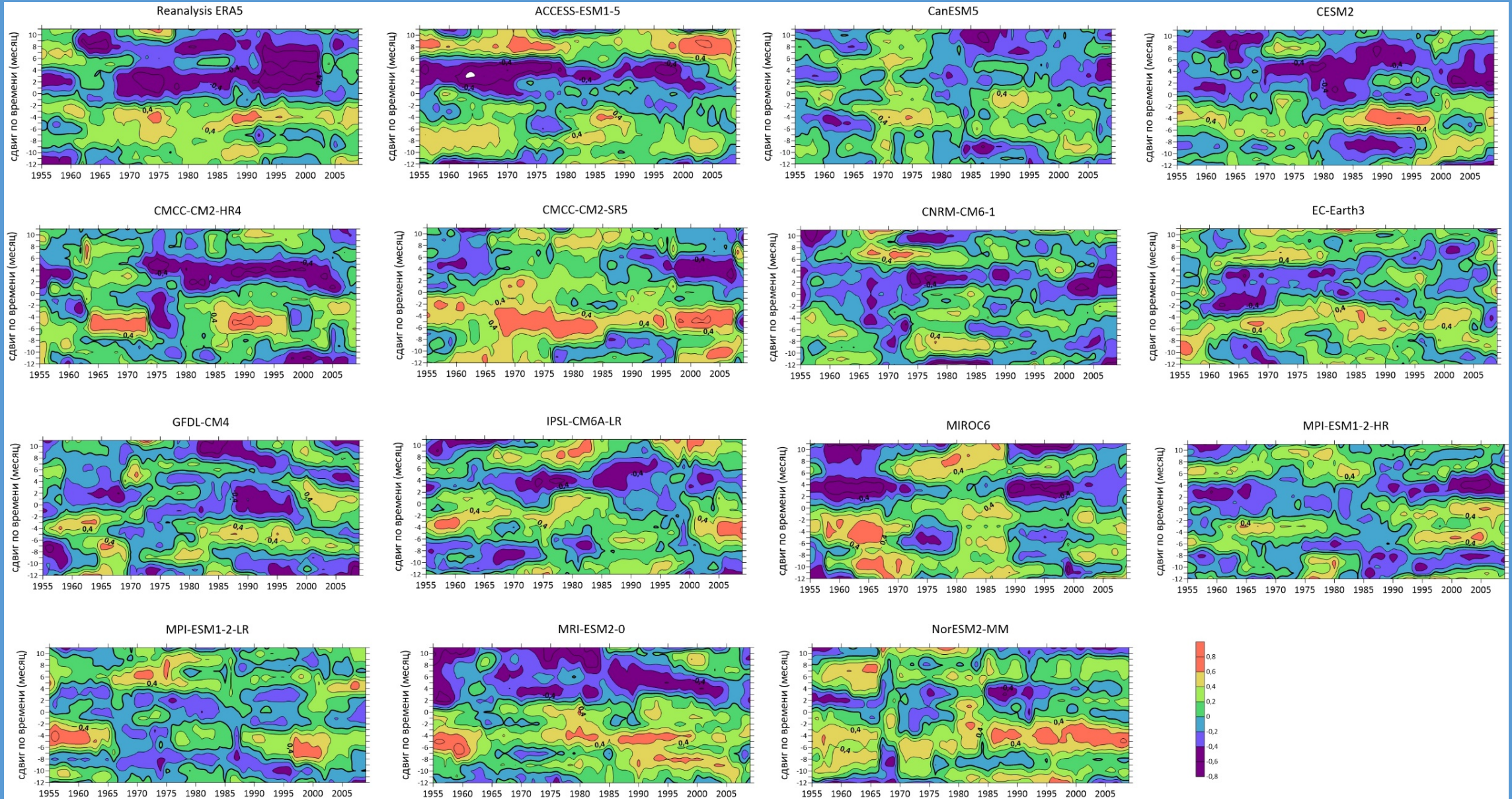
11- летняя скользящая корреляция интенсивности МЮ с индексом ВТ Эль-Ниньо в январе (пик события)



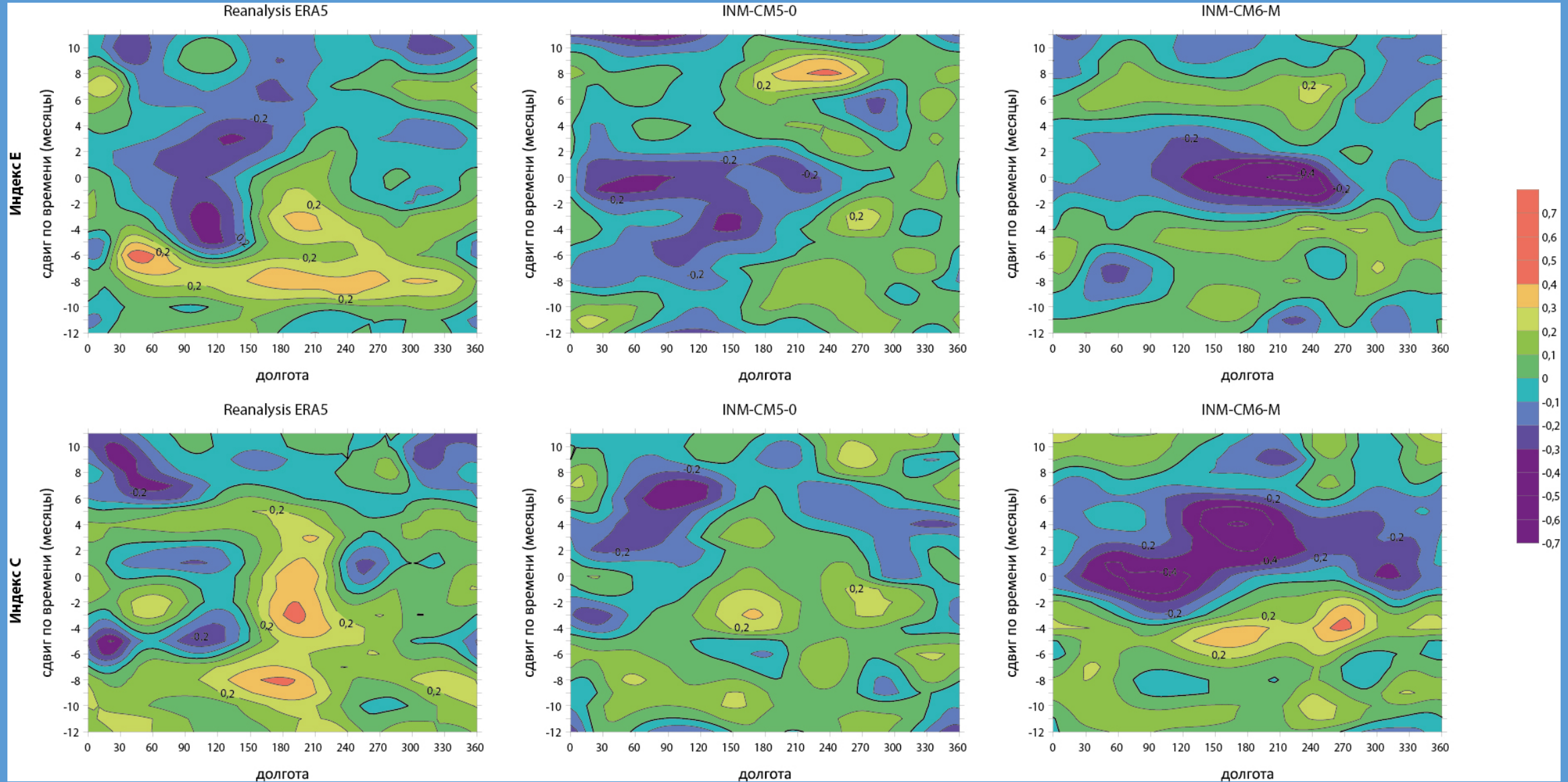
11- летняя скользящая корреляция интенсивности ER с индексом ЦТ Эль-Ниньо в январе (пик события)



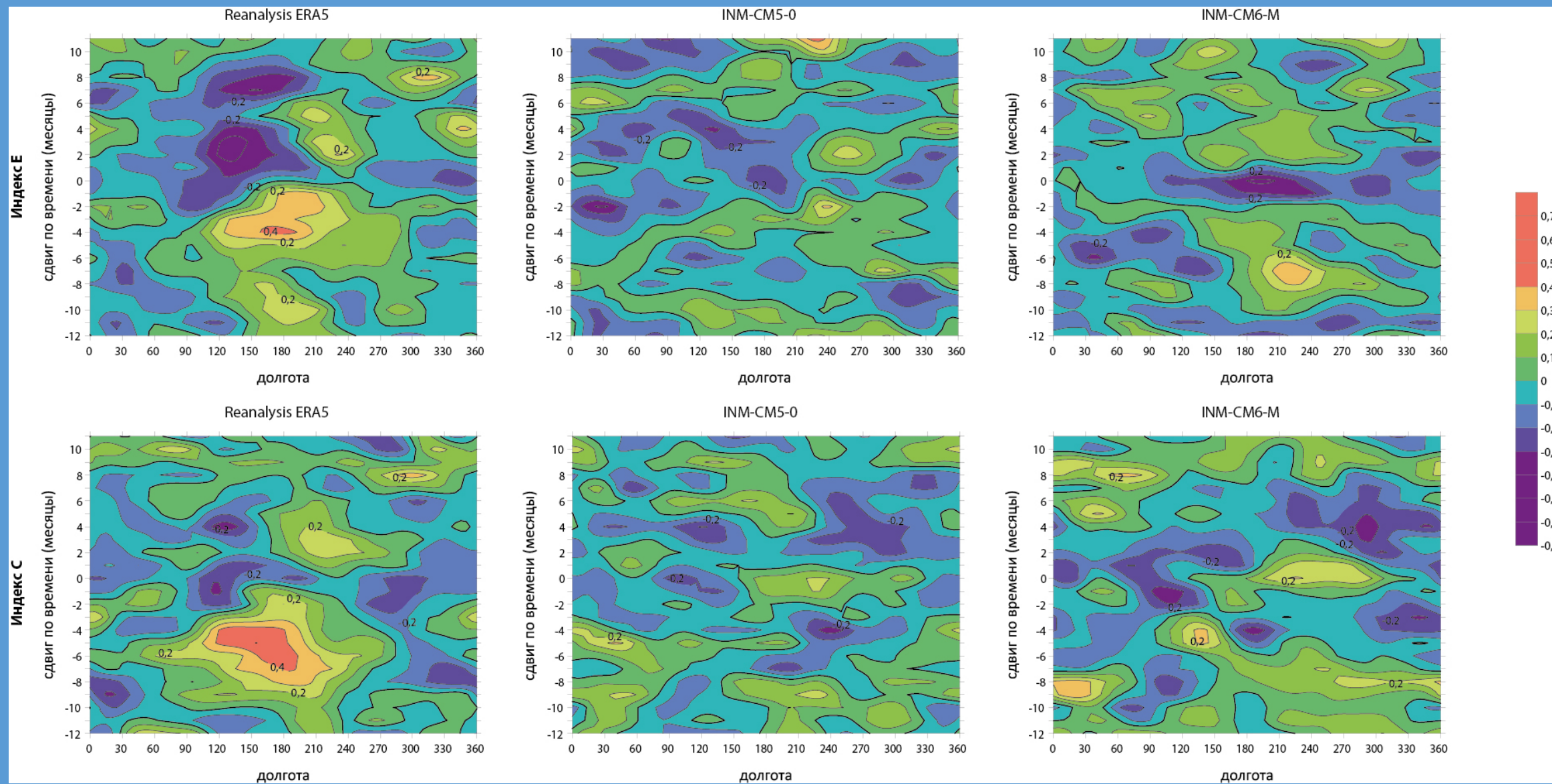
11- летняя скользящая корреляция интенсивности ER с индексом BT Эль-Ниньо в январе (пик события)



Корреляция интенсивности МЮ с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)



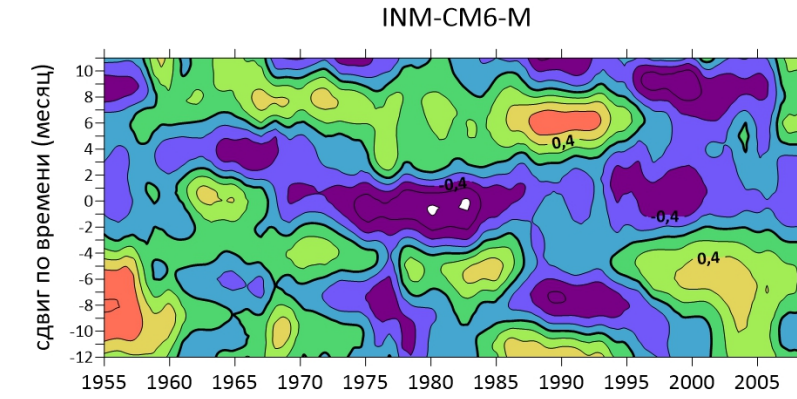
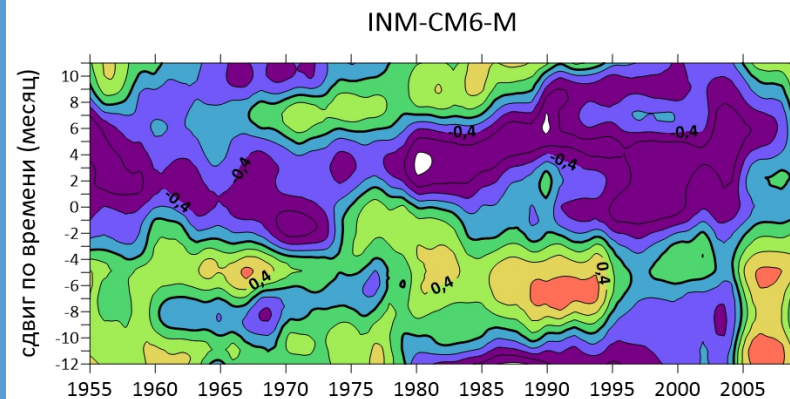
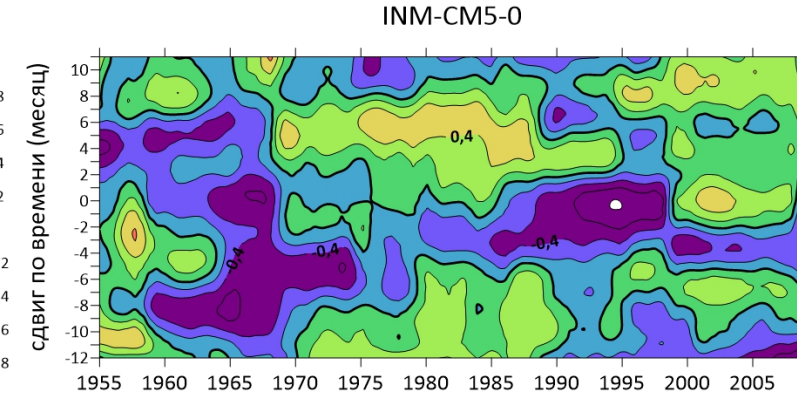
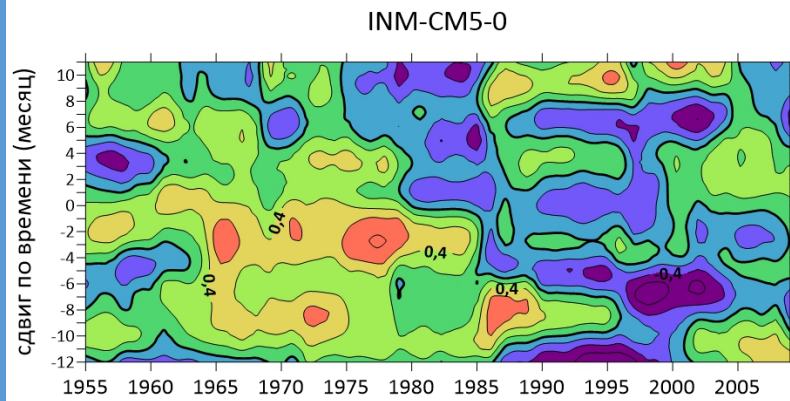
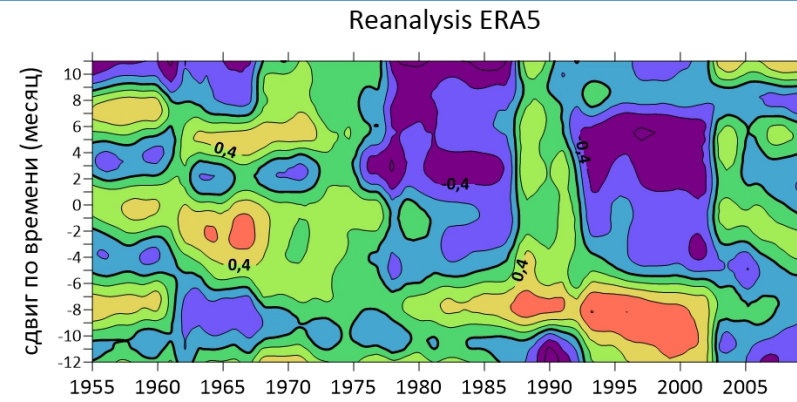
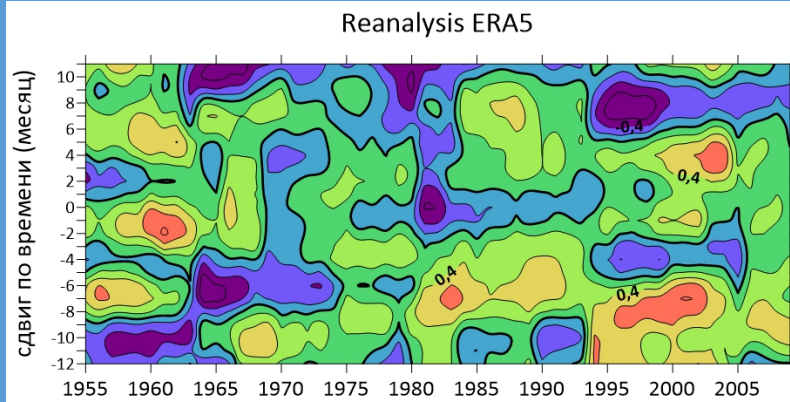
Корреляция интенсивности ER с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)



11- летняя скользящая корреляция интенсивности МЮ с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)

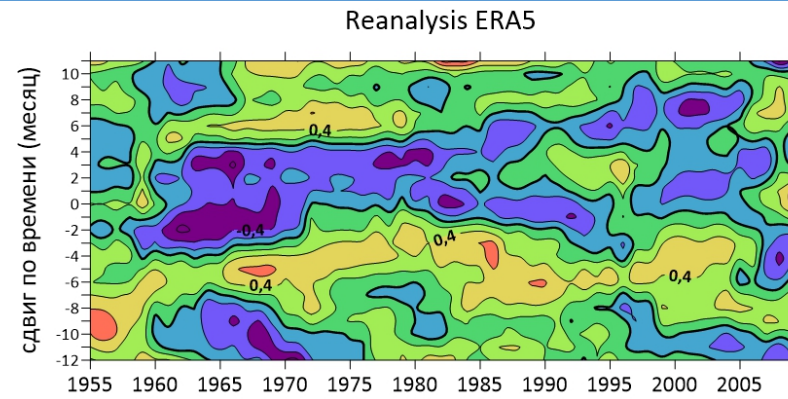
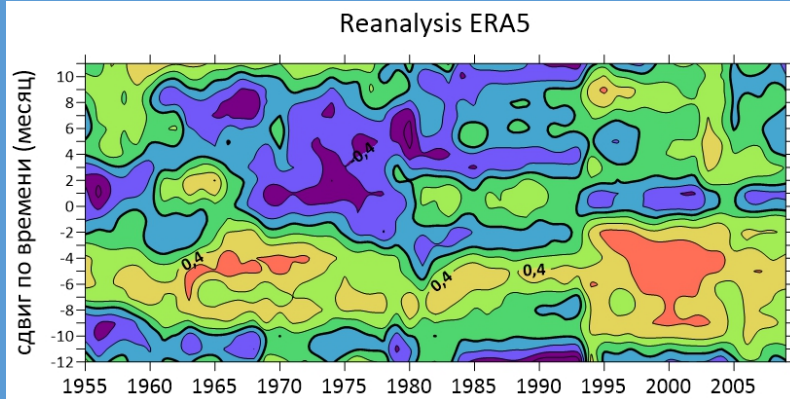
Индекс С

Индекс Е

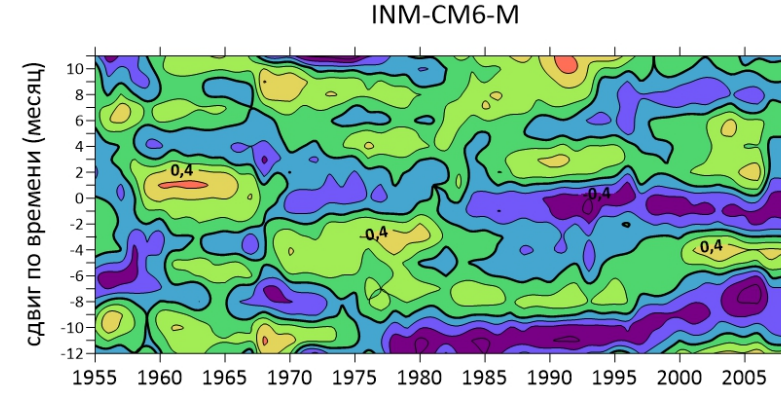
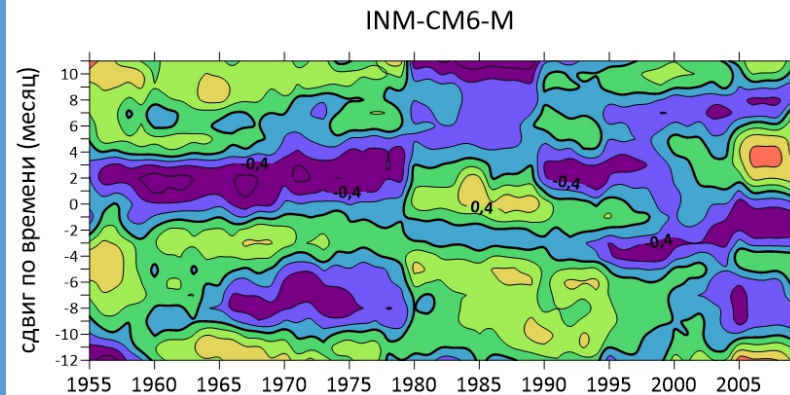
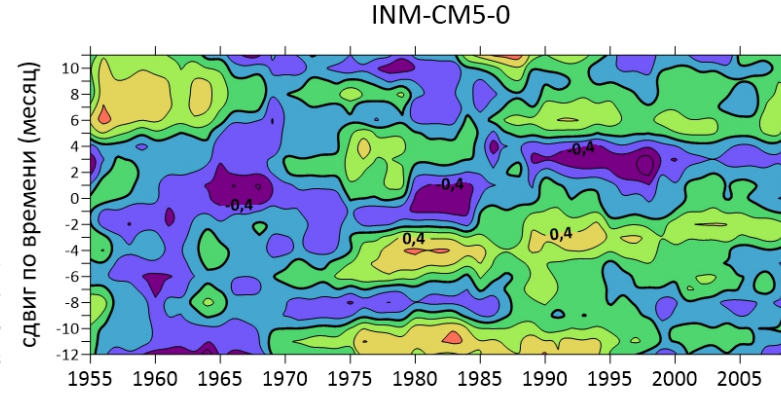
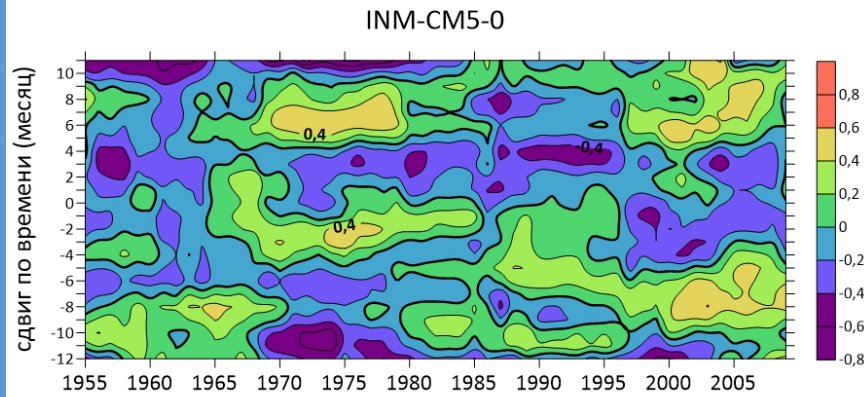


11- летняя скользящая корреляция интенсивности ER с индексами Эль-Ниньо в январе (пик события)

Индекс С

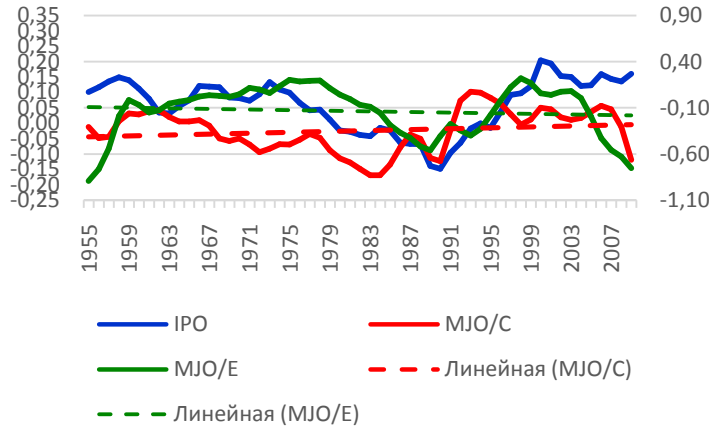


Индекс Е

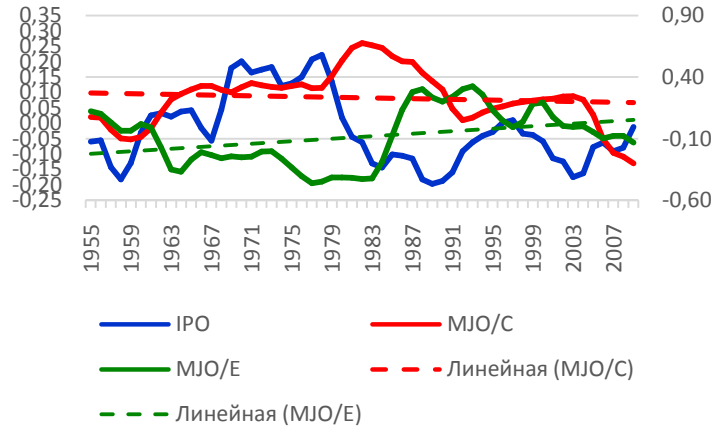


Прогностический индекс МЖО и IPO

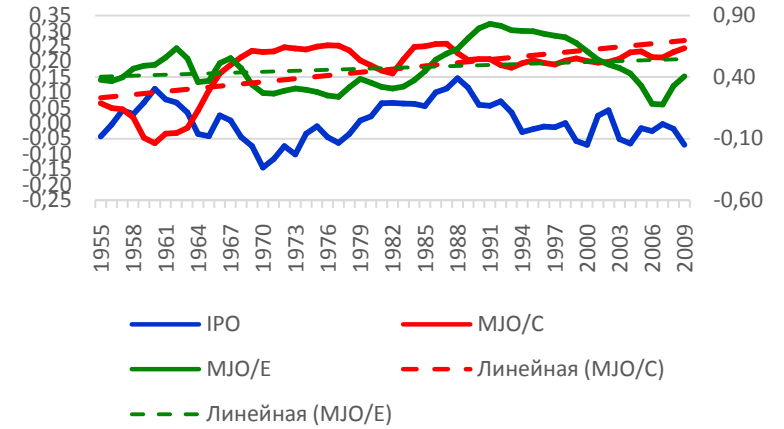
ACCESS-ESM1-5



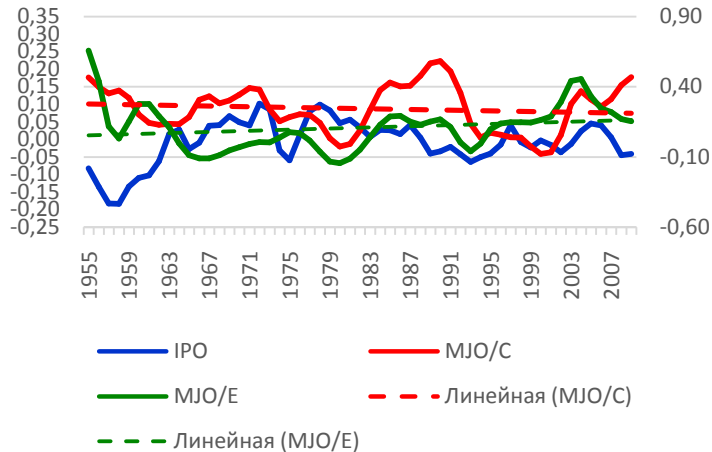
Can-ESM5



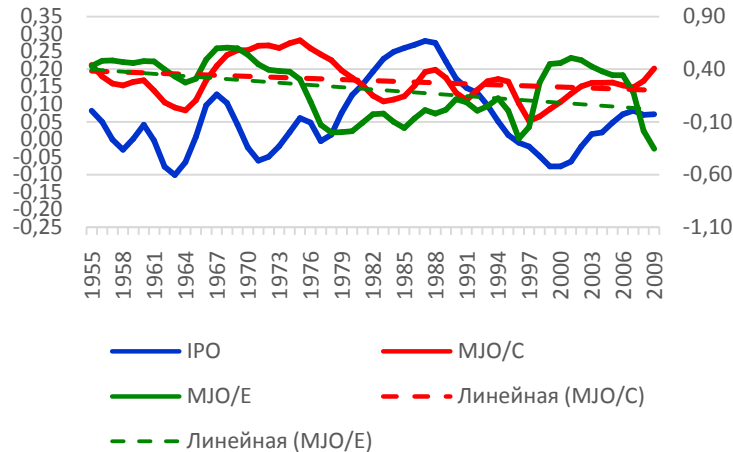
CESM2



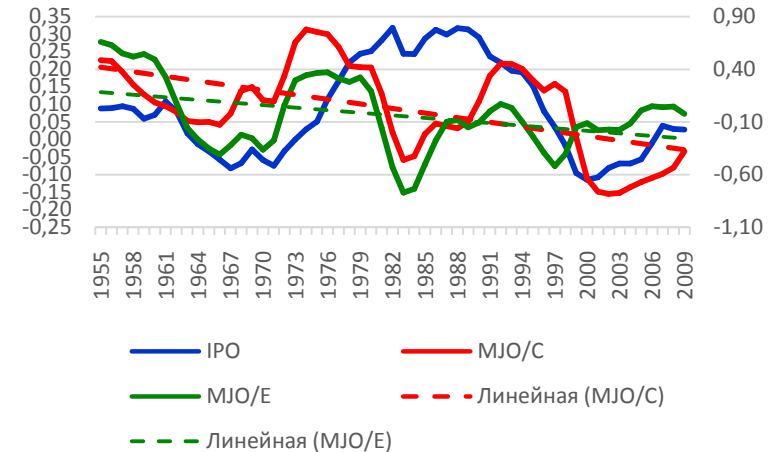
CMCC-CM2-HR4



CMCC-CM2-SR5

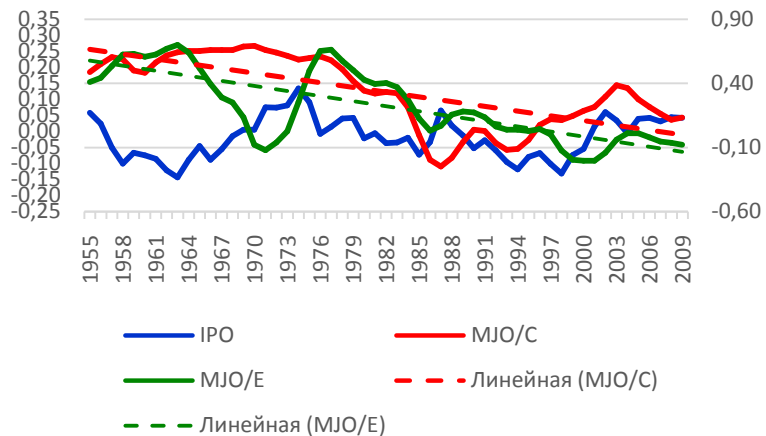


EC-Earth3

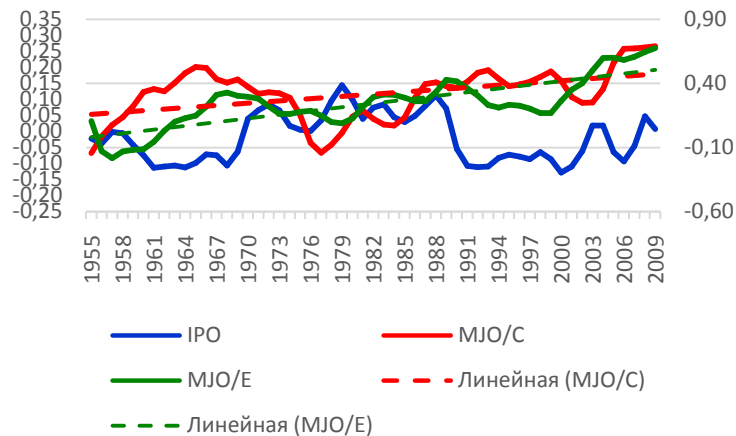


Прогностический индекс МЖО и IPO

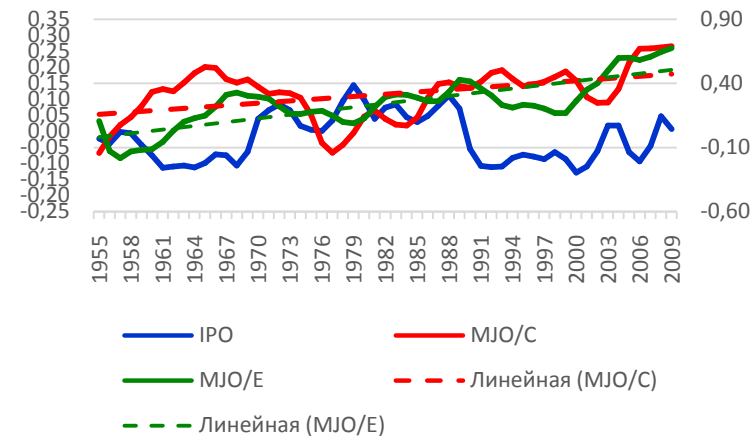
GFDL-CM4



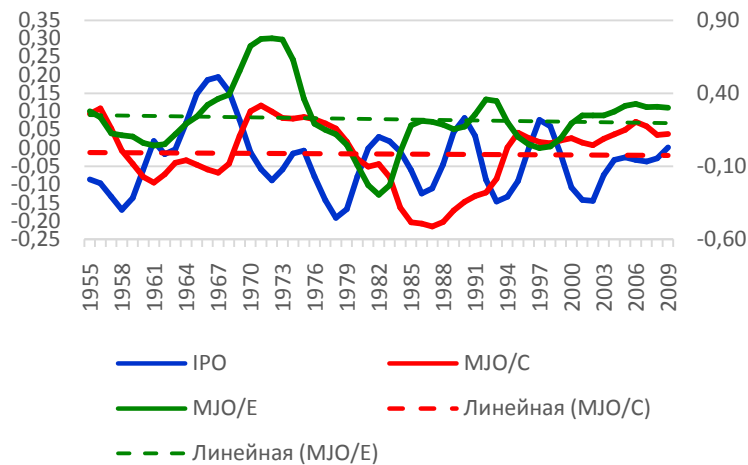
IPSL-CM6A-LR



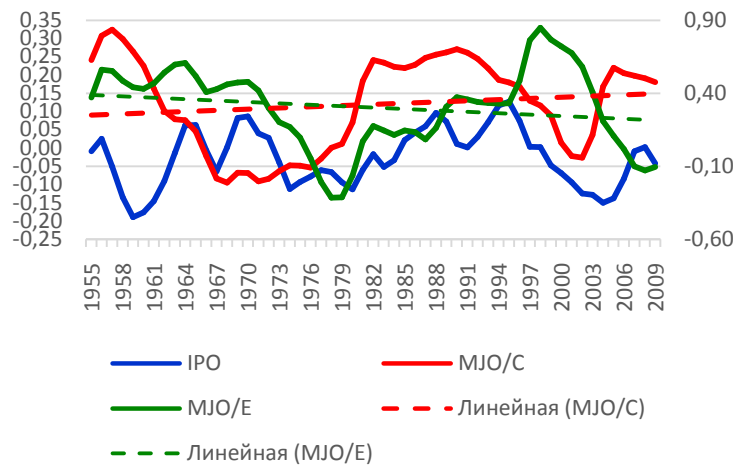
MIROC6



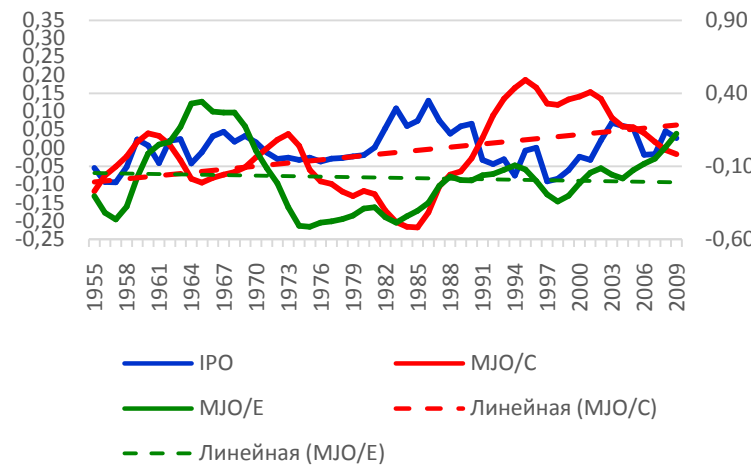
MPI-ESM1-2-HR



MPI-ESM1-2-LR

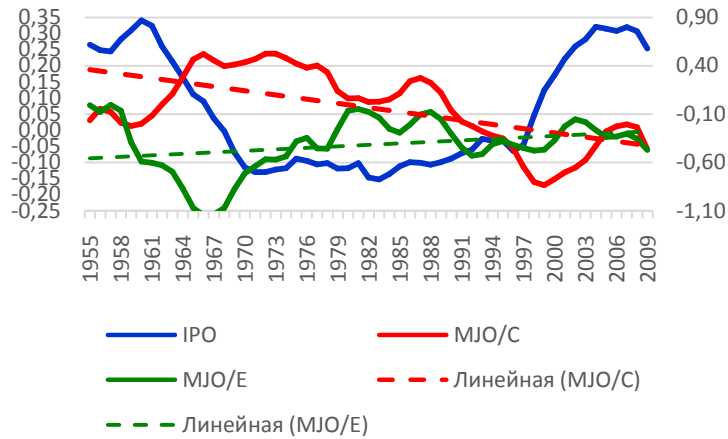


MRI-ESM2-0

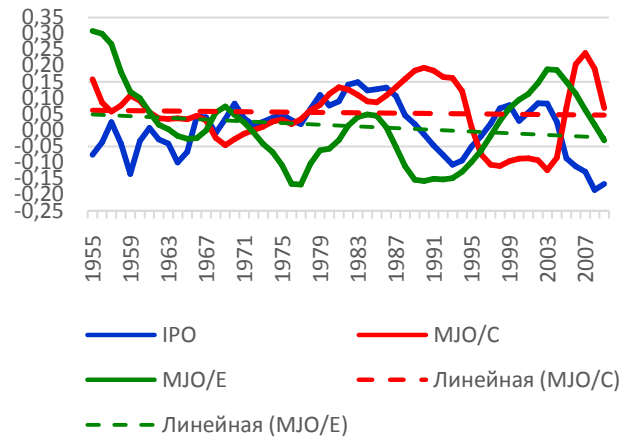


Прогностический индекс МЖО и IPO

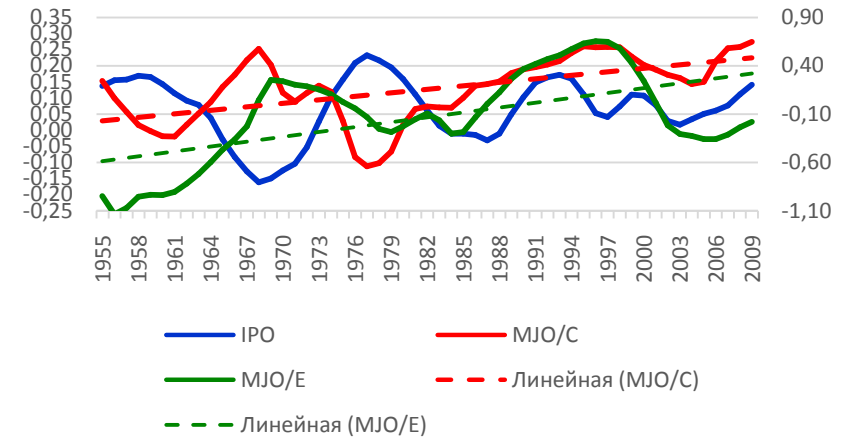
INM-CM5-0



INM-CM6-M

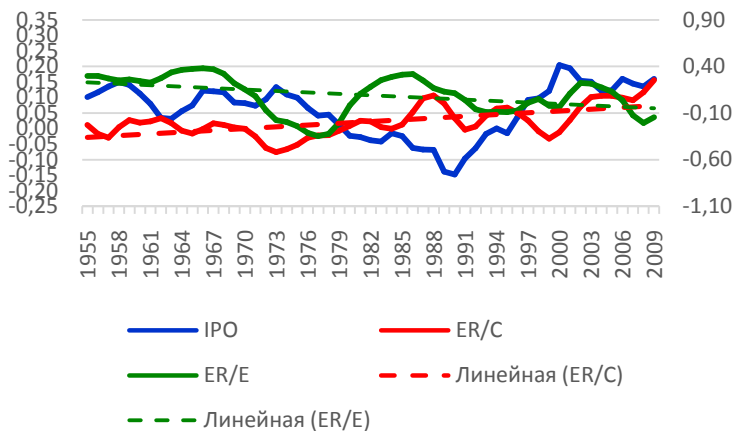


NorESM2-MM

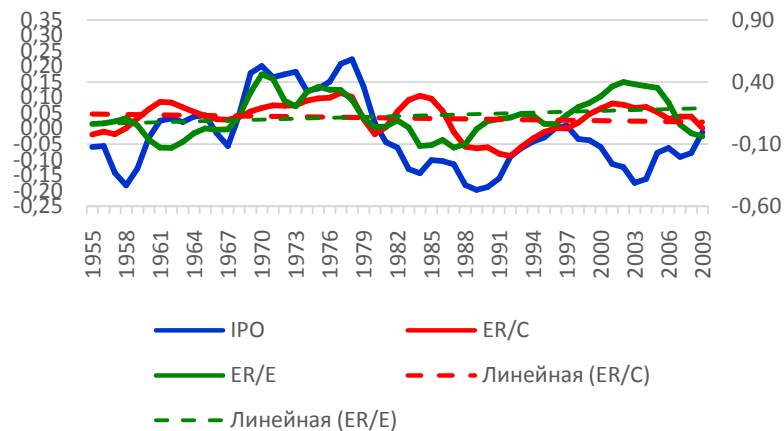


Прогностический индекс ER и IPO

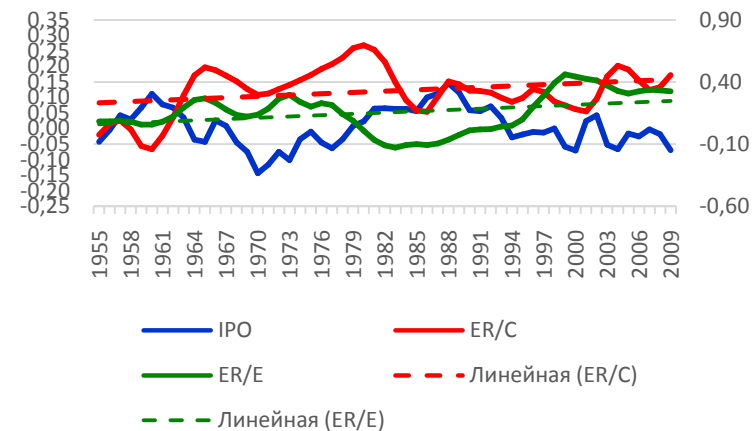
ACCESS-ESM1-5



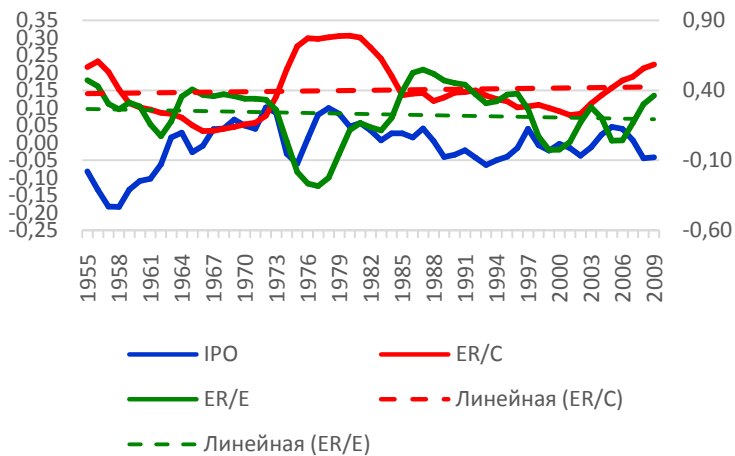
Can-ESM5



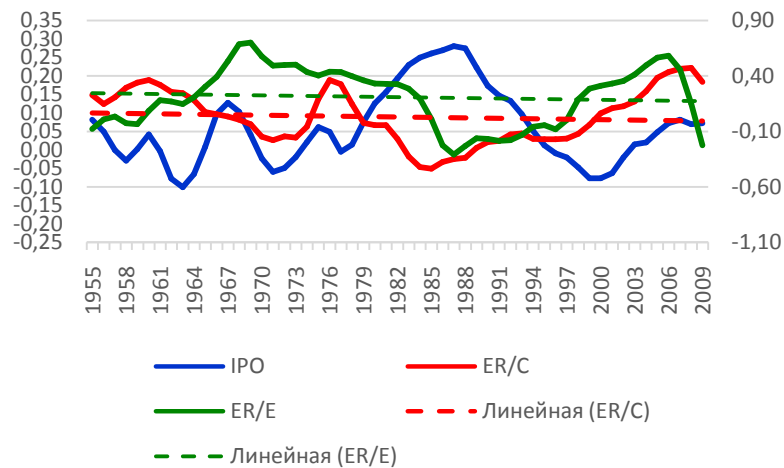
CESM2



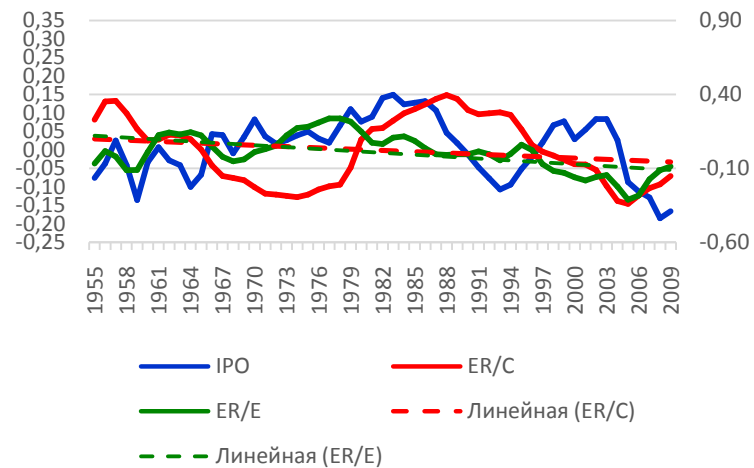
CMCC-CM2-HR4



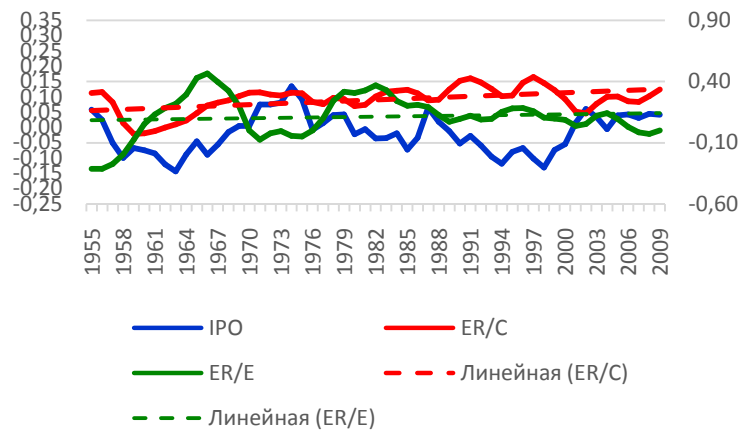
CMCC-CM2-SR5



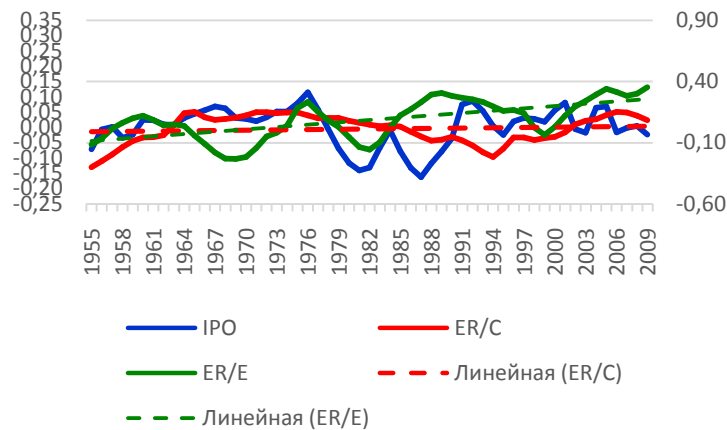
EC-Earth3



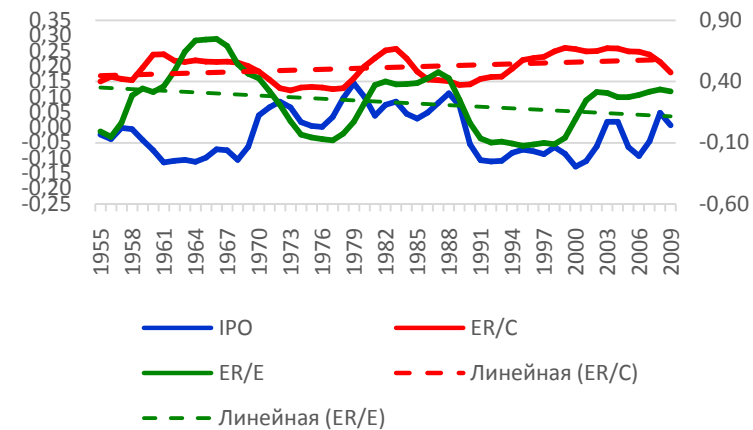
GFDL-CM4



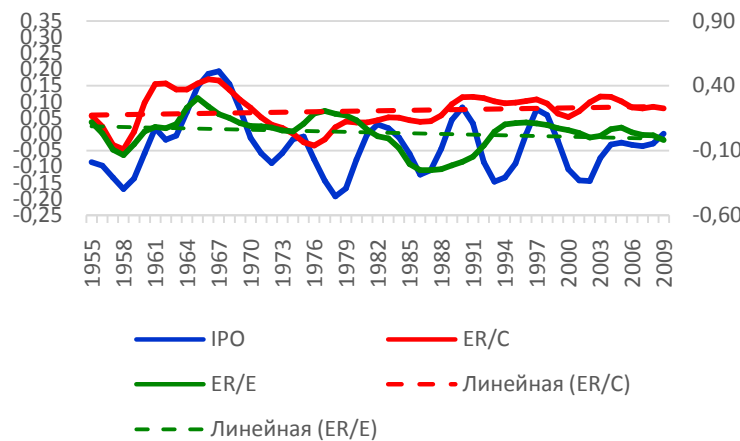
IPSL-CM6A-LR



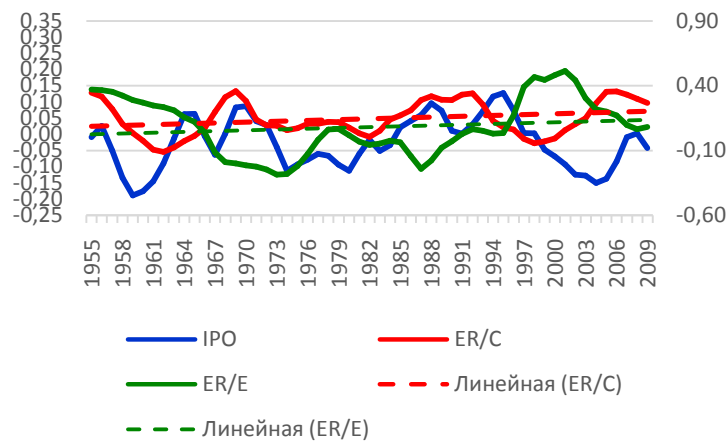
MIROC6



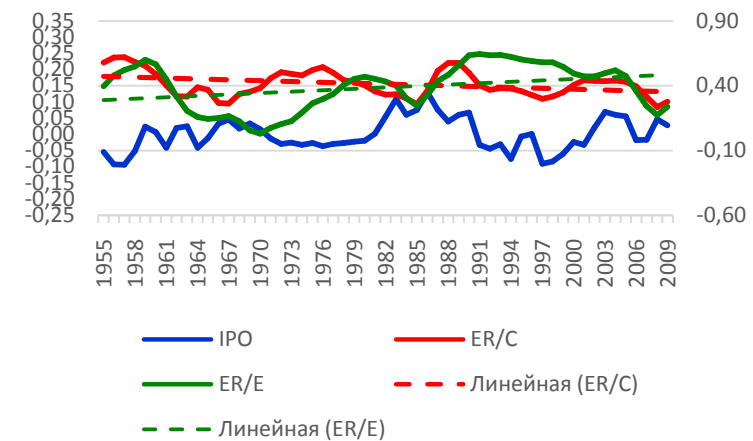
MPI-ESM1-2-HR



MPI-ESM1-2-LR

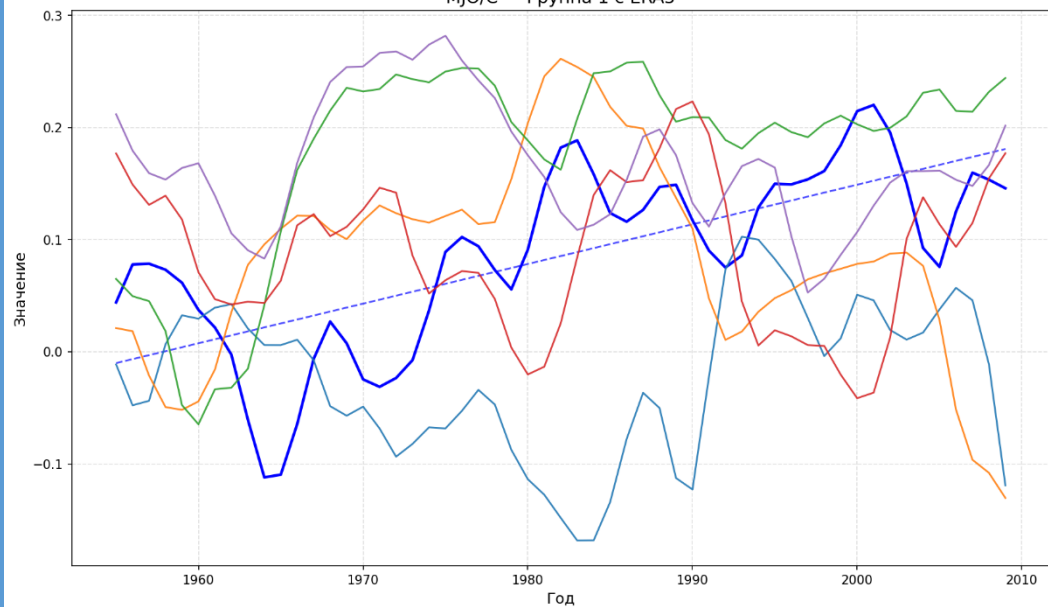


MRI-ESM2-0

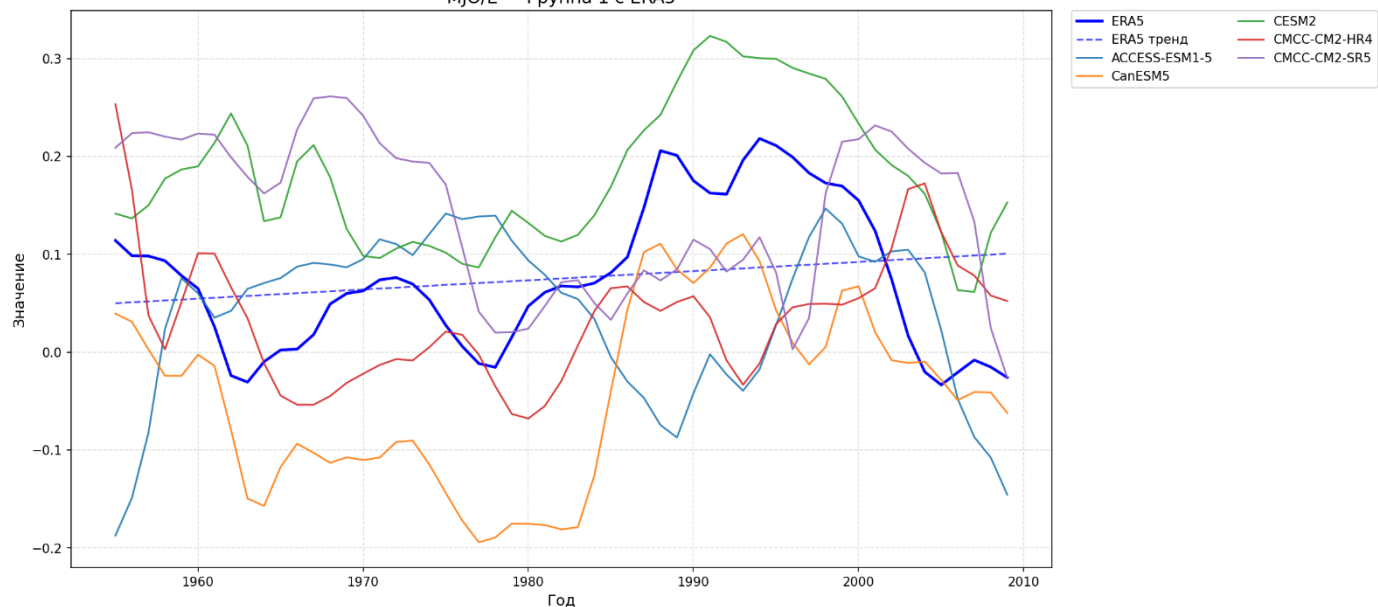


Прогностический индекс ER и IPO

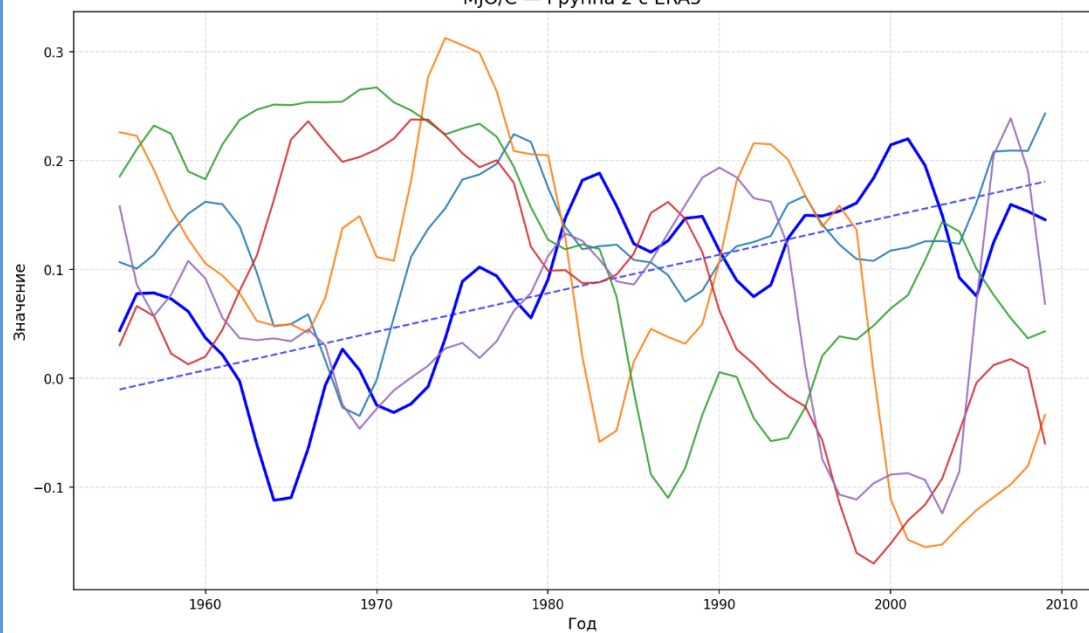
МЈО/С — Группа 1 с ERA5



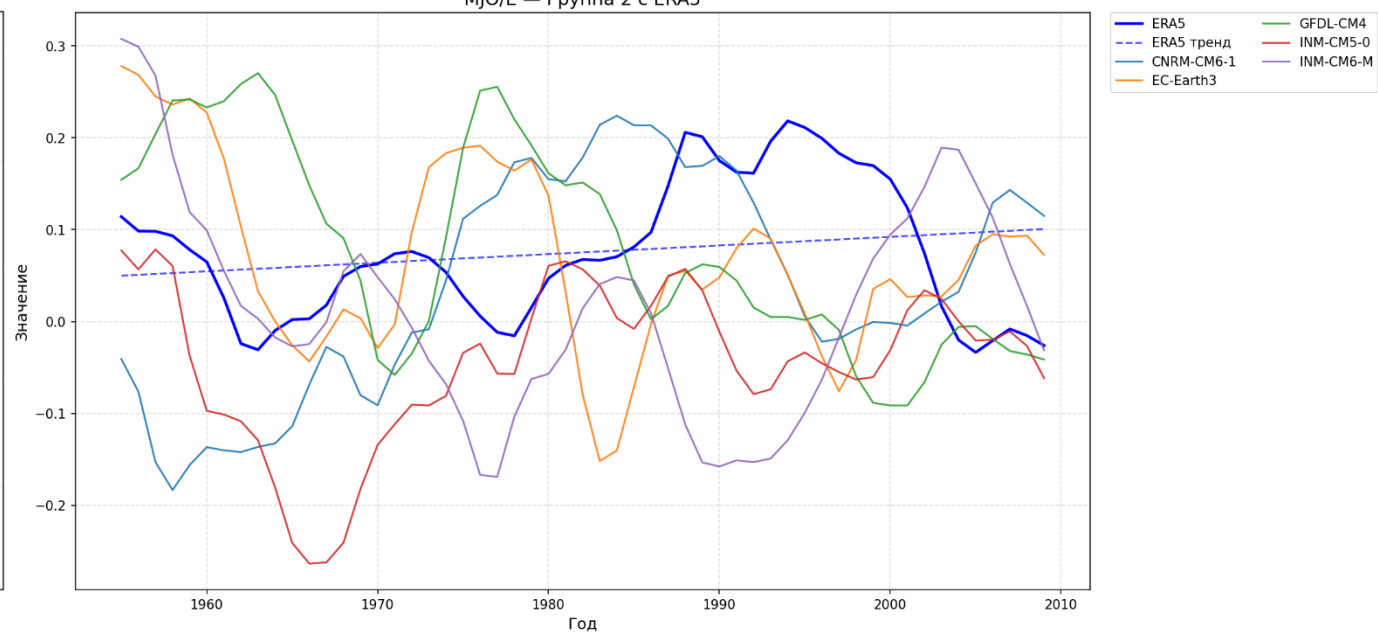
МЈО/Е — Группа 1 с ERA5



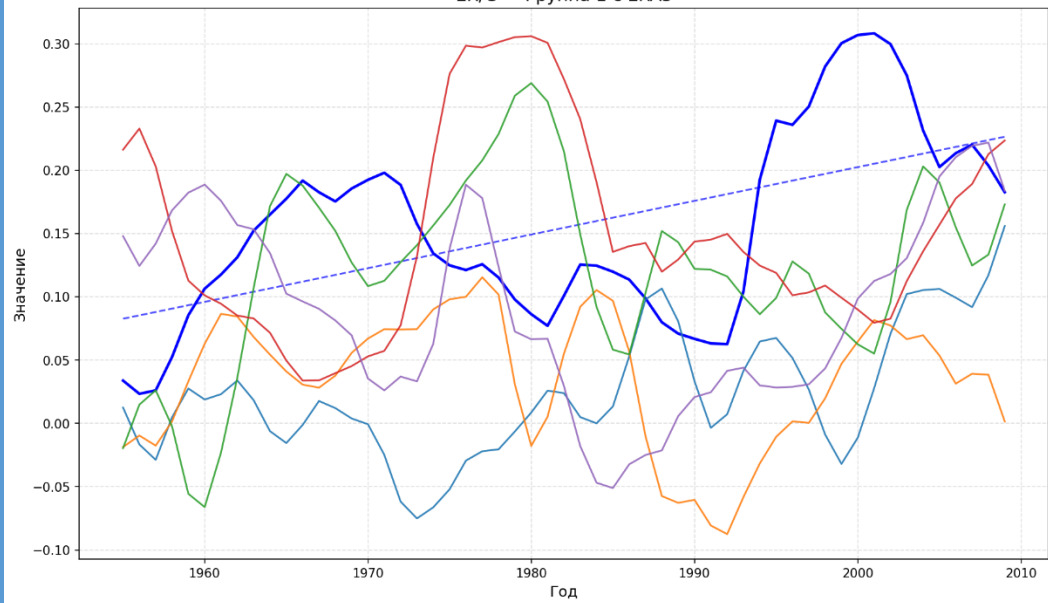
МЈО/С — Группа 2 с ERA5



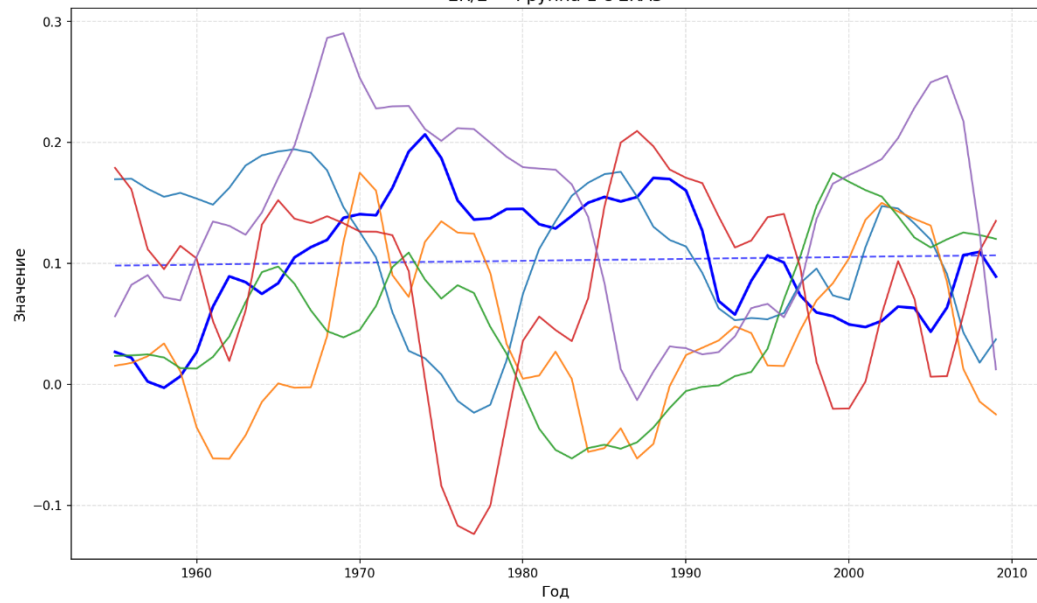
МЈО/Е — Группа 2 с ERA5



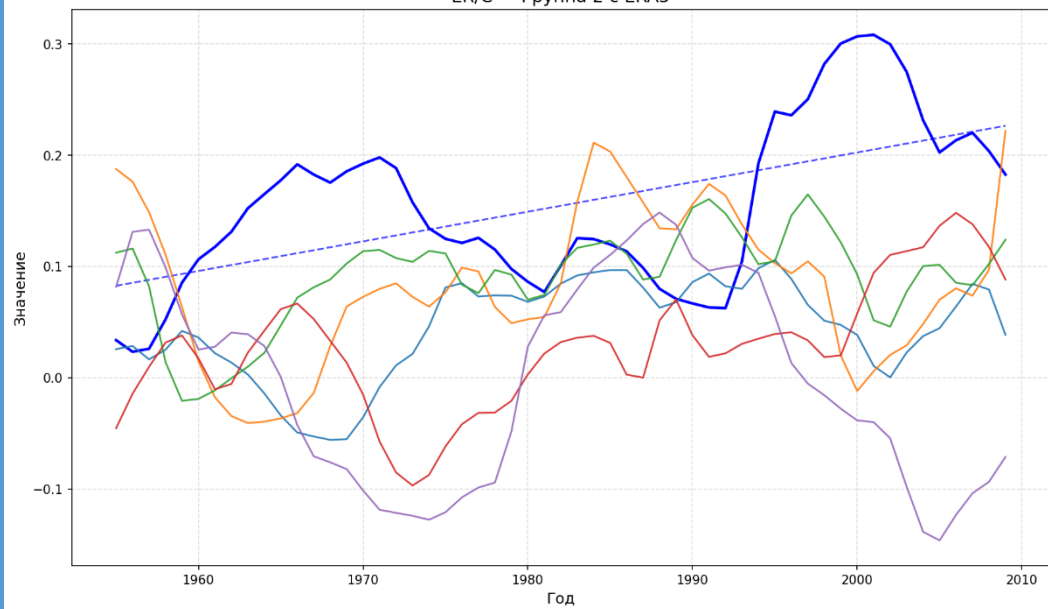
ER/C — Группа 1 с ERA5



ER/E — Группа 1 с ERA5



ER/C — Группа 2 с ERA5



ER/E — Группа 2 с ERA5

