



## **Волны жары и экстремальные осадки на территории России в меняющемся климате**

***Семенов В.А.<sup>1,2</sup>, Бабина Е.Д.<sup>2</sup>, Алешина М.А.<sup>1,2</sup>,  
Моргунова А.А.<sup>1</sup>, Черенкова Е.А.<sup>1,2</sup>, Воронцова В.С.<sup>1</sup>***

*(1) Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*

*(2) Институт географии РАН*

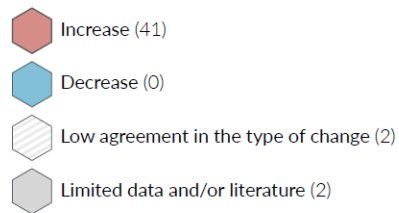
[vasemenov@ifaran.ru](mailto:vasemenov@ifaran.ru)

# Шестой оценочный доклад IPCC AR6:

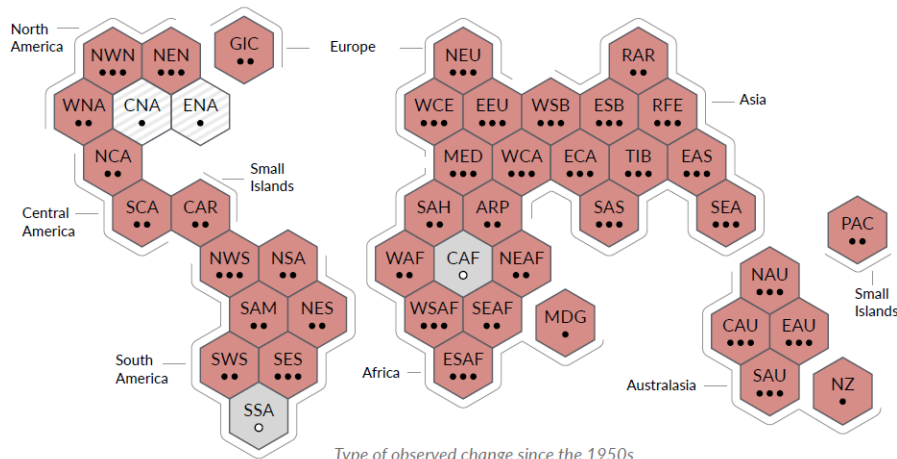
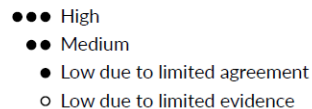
## оценка наблюдаемых изменений сильных аномалий температуры и осадков

a) Synthesis of assessment of observed change in **hot extremes** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

Type of observed change in hot extremes

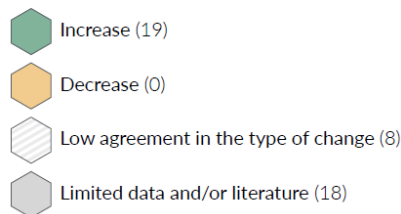


Confidence in human contribution to the observed change

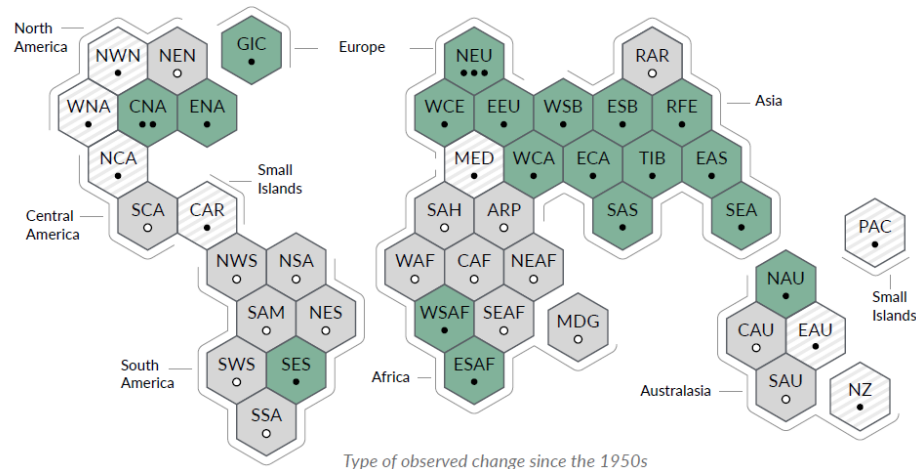
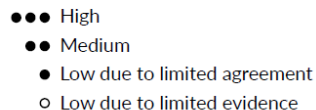


b) Synthesis of assessment of observed change in **heavy precipitation** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

Type of observed change in heavy precipitation



Confidence in human contribution to the observed change



## Глобальное потепление и ОЯ – возможные связи

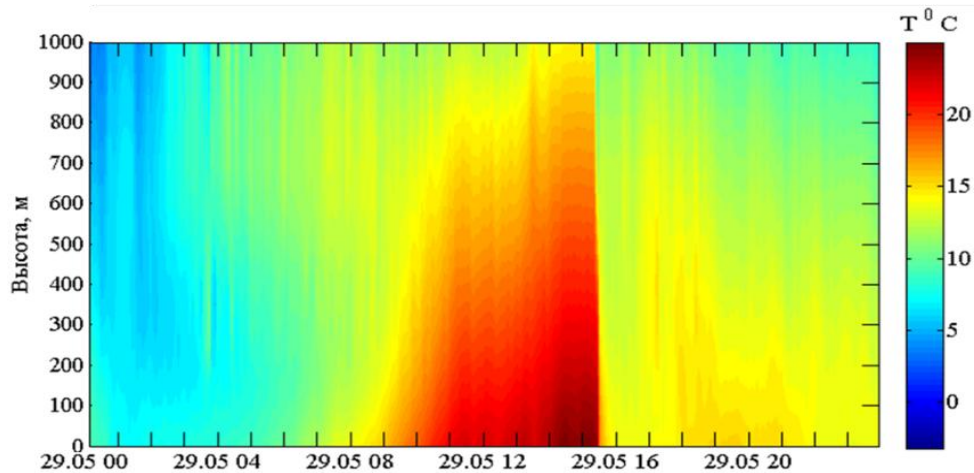
- Рост средней температуры приводит к нелинейному росту частоты превышения пороговых температур
- Рост температуры сопровождается экспоненциальным ростом влагоемкости атмосферы
- Рост температурного контраста океан-суша летом при потеплении
- Замедление зональной циркуляции в СП, меандрирующее струйное течение, больше блокингов, меридиональная циркуляция (?)
- Рост скрытой энергии в атмосфере – энергия конвективных движений
- Уменьшение стат. устойчивости атмосферы с ростом температуры в в.ш.
- Уменьшение меридионального температурного градиента – снижение интенсивности адвективных аномалий температуры
- Недостаток влаги из-за быстрого роста влагоемкости (рост отн. влажности)
- Снижение температурного контраста океан-суша зимой
- Увеличение стат. устойчивости атмосферы с ростом температуры в н.ш.

Москва, шквал в мае 2017 г.

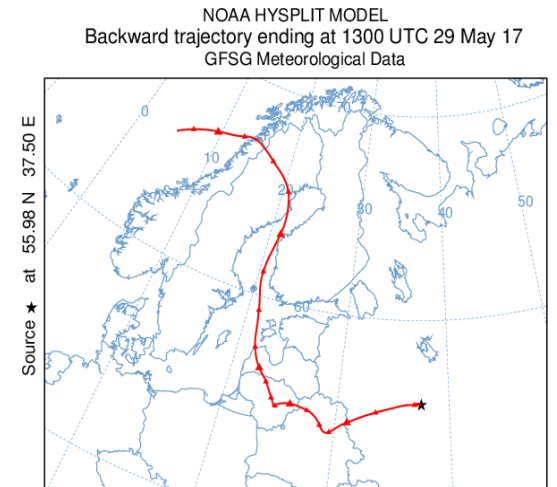
Роль температурных градиентов

# Шквал в Москве, май 2017 г. Роль градиента температуры

Резкое понижение температуры на 9 °C (с 22 °C до 13 °C)

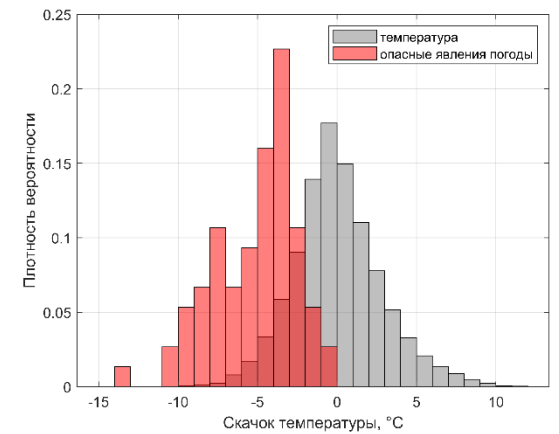
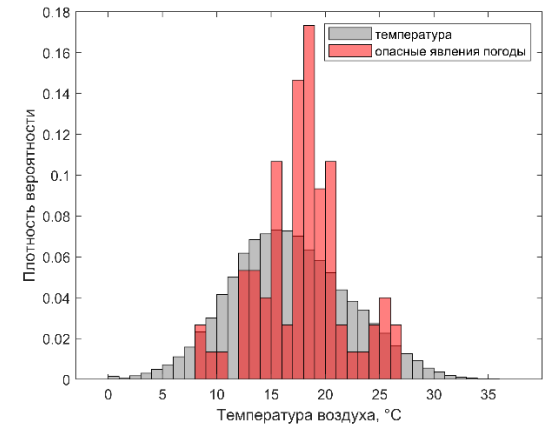
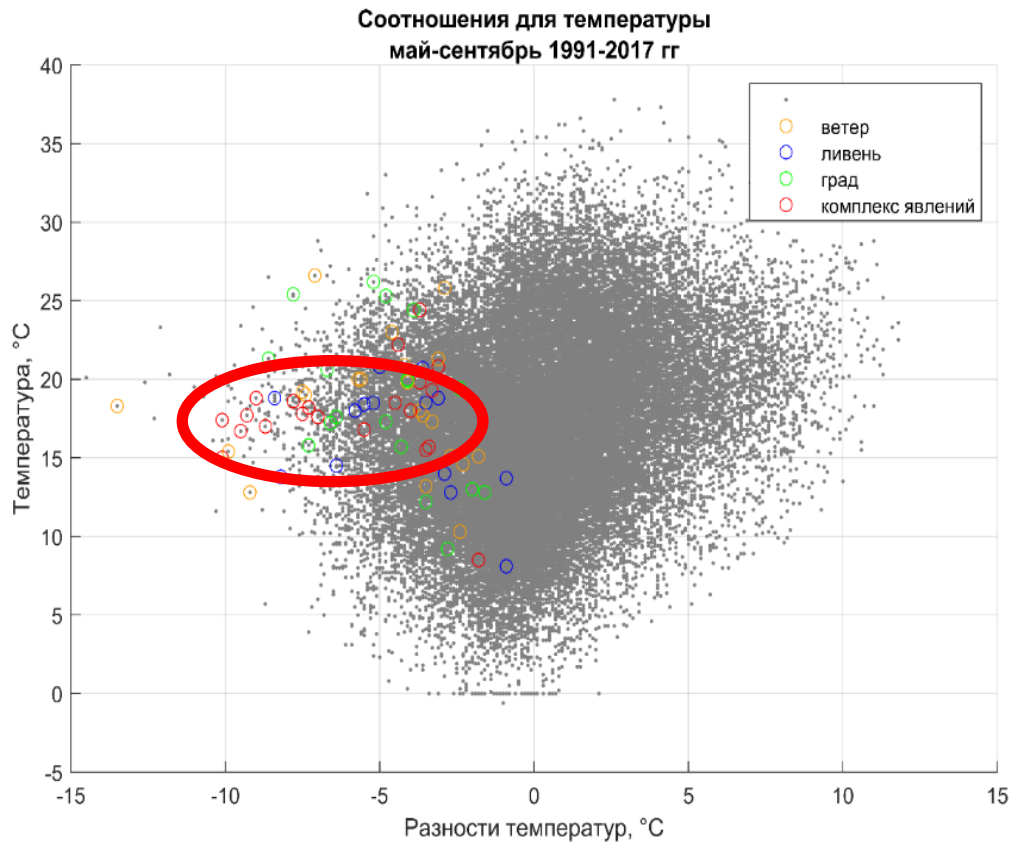


Профиль температуры воздуха, полученный с профилемера МТП-5 (Долгопрудный)



Обратная траектория воздушной массы 29.05.2017 в Москве

# Шквал в Москве, май 2017 г. Роль градиента температуры

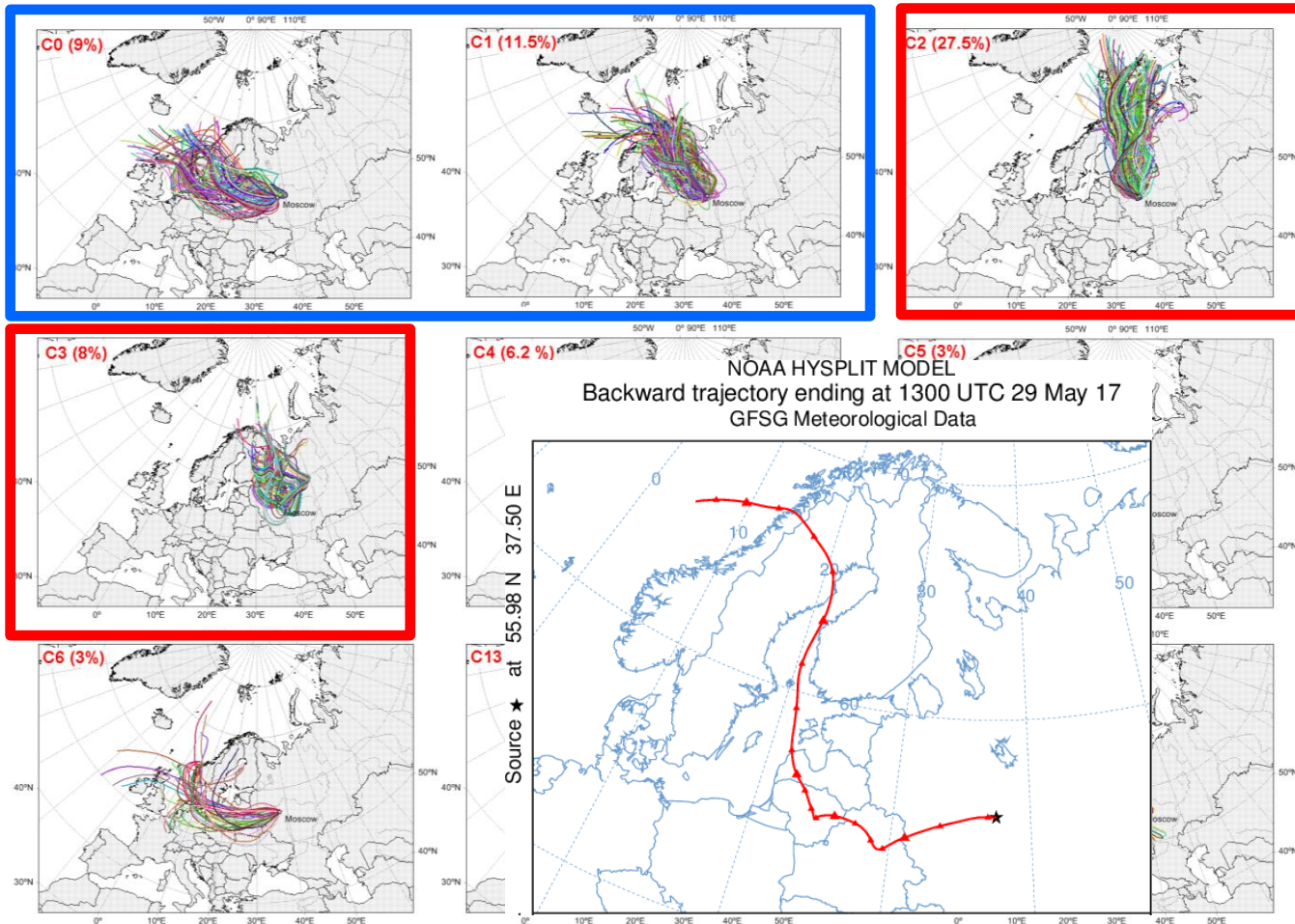


Функции распределения плотности вероятности опасных явлений погоды относительно температуры воздуха и температурных скачков, рассчитанных по 3-часовым срокам.

Дипломная работа Н. Куксовой +

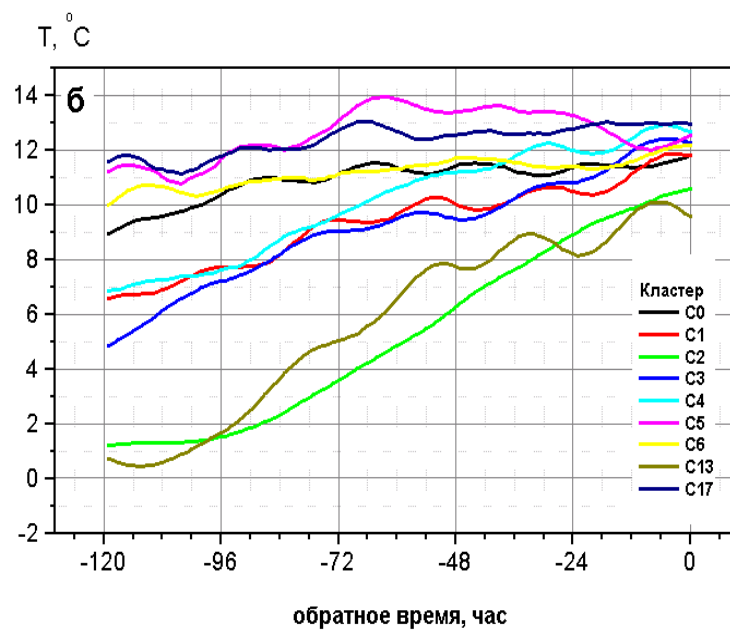
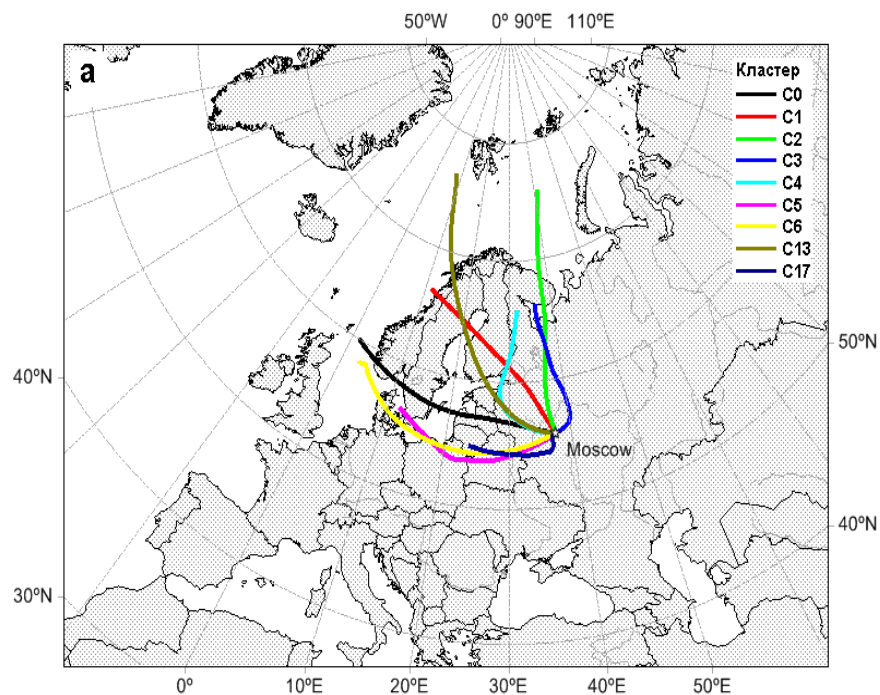
# Шквал в Москве, май 2017 г. Роль градиента температуры

Кластеры обратных траекторий, связанных с 10% самых сильных похолоданий в июне 1971-2016 гг. Отмечены: номер кластера и доля траекторий (в %), попавших в кластер

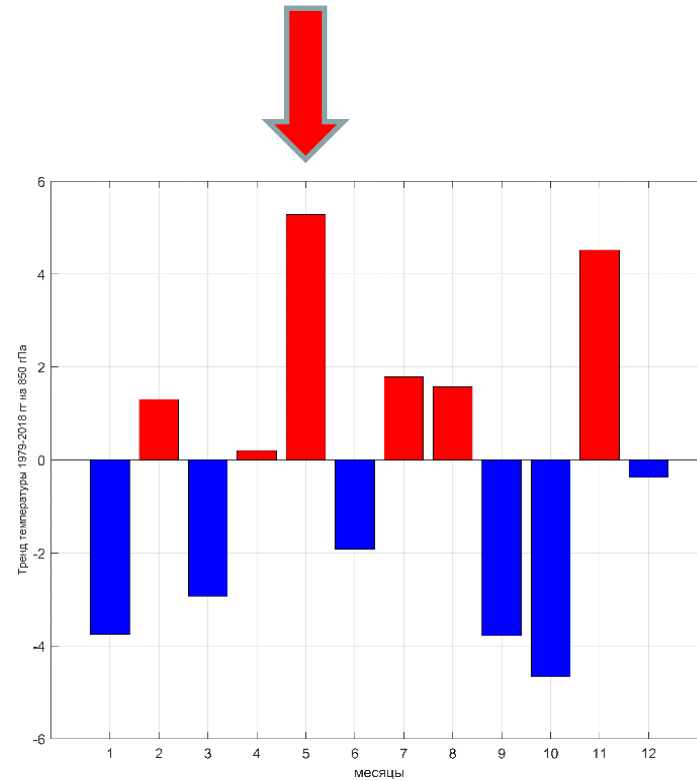
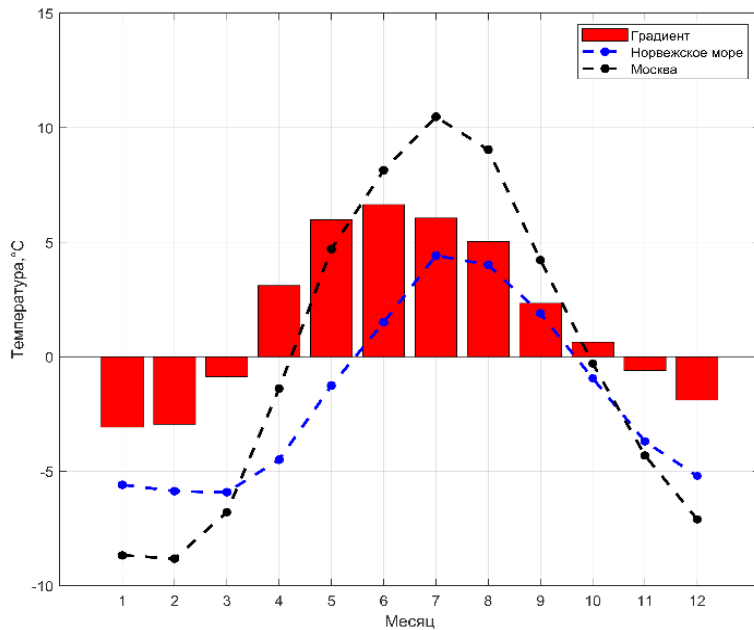


Shukurov and Semenov, 2018

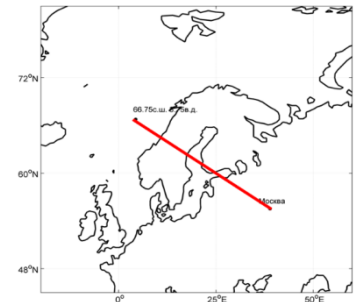
# Шквал в Москве, май 2017 г. Роль градиента температуры



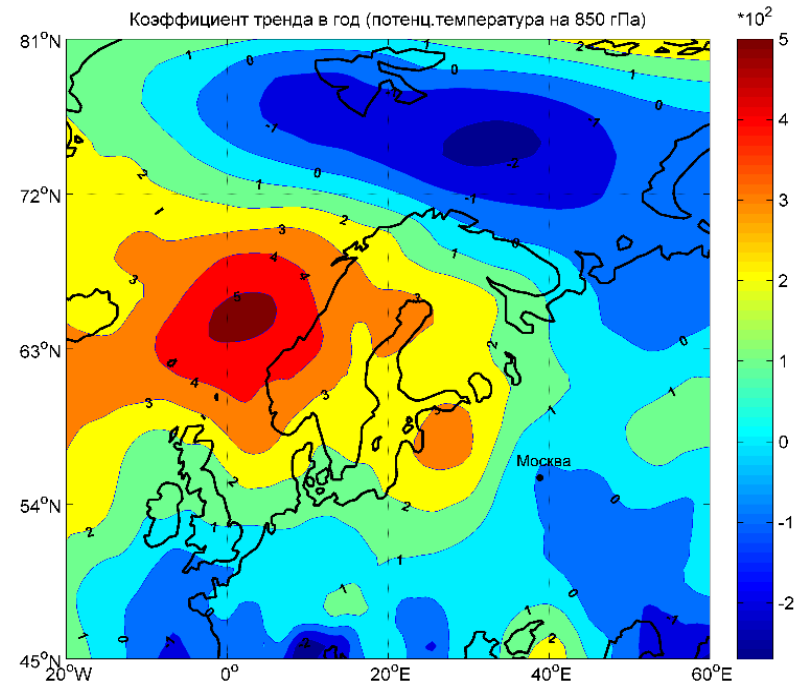
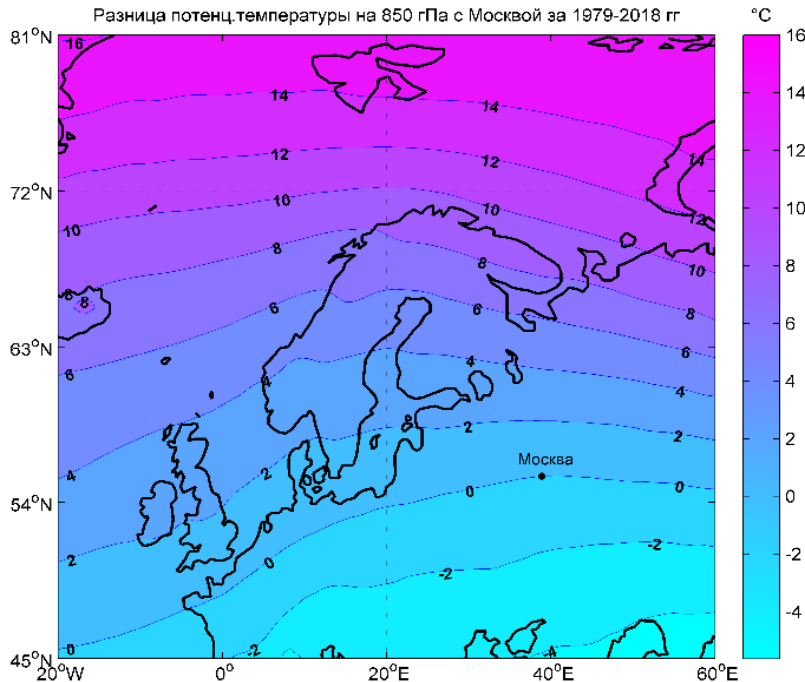
# Шквал в Москве, май 2017 г. Роль градиента температуры



Сезонный ход разницы температур воздуха на 850 гПа (°C) между Москвой и Норвежским морем и тренд этой разницы (°C/40 лет) по данным реанализа ERA5.



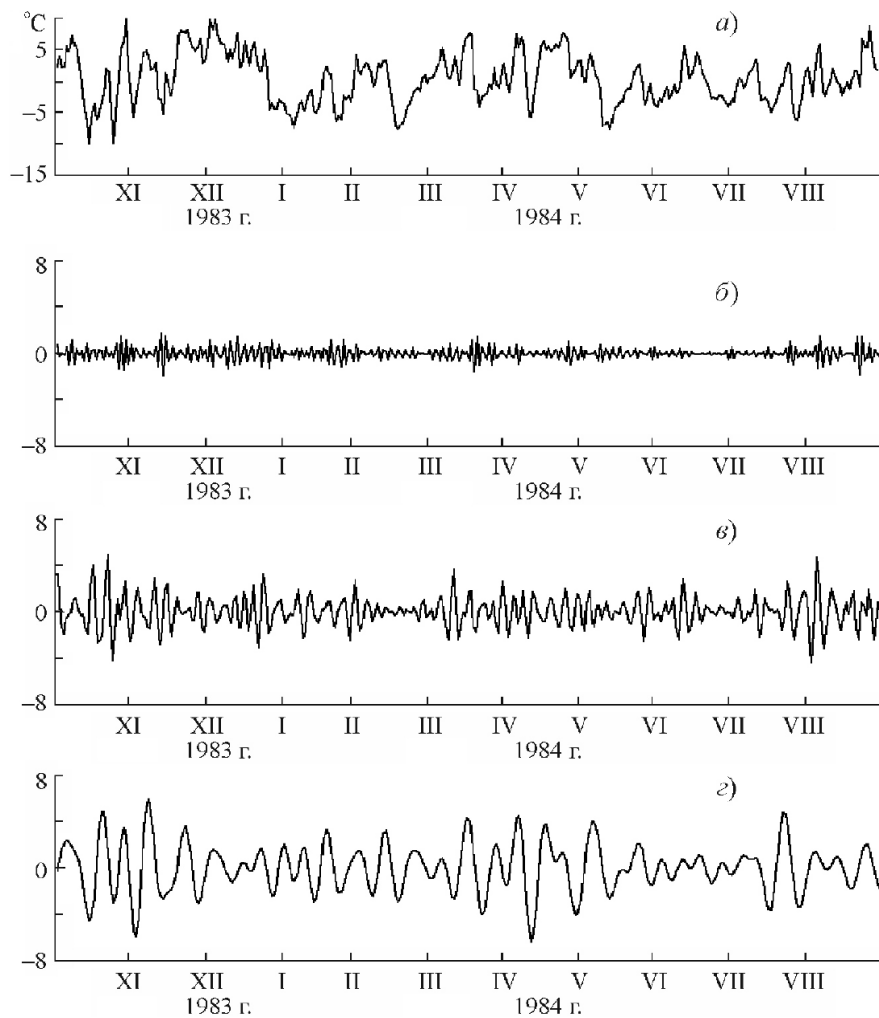
## Шквал в Москве, май 2017 г. Роль градиента температуры



Разница потенциальной температуры воздуха на уровне 850 гПа ( $^{\circ}\text{C}$ ) между Москвой и Норвежским морем в мае и тренд этой разницы ( $^{\circ}\text{C}/40$  лет) по данным реанализа ERA5.

Несмотря на в целом ослабление меридионального температурного градиента средних и высоких широтах СП, региональные отклонения от этой тенденции могут приводить к экстремальным погодным явлениям.

Как меняется изменчивость температуры в последние десятилетия?

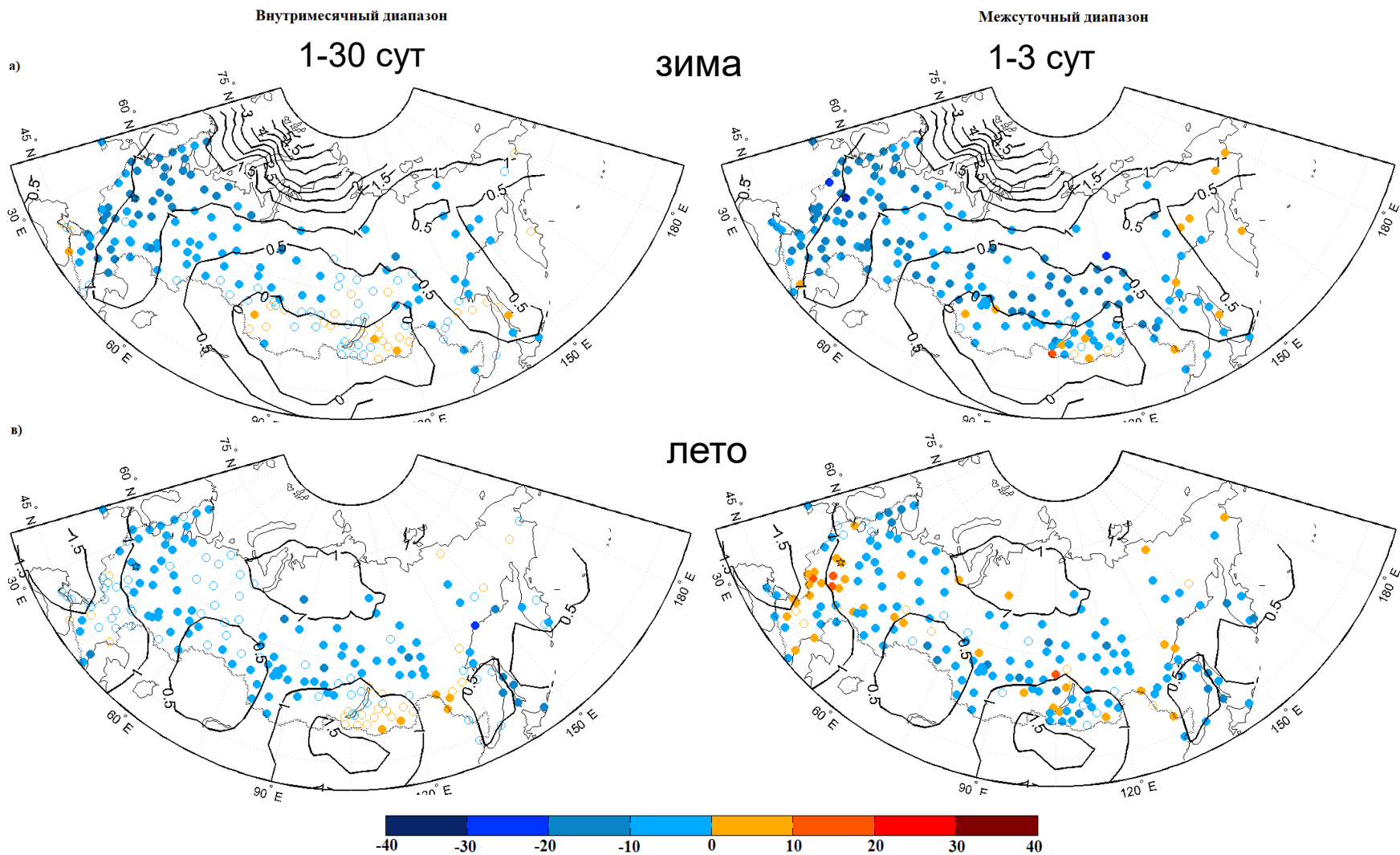


**Пример результата частотной фильтрации ряда приземной температуры воздуха (за период 1983-1984 гг.) для Москвы:**

- а) исходный ряд,
- б) фильтр  $< 3$  суток,
- в) фильтр 3-7 суток,
- г) фильтр 8-20 суток

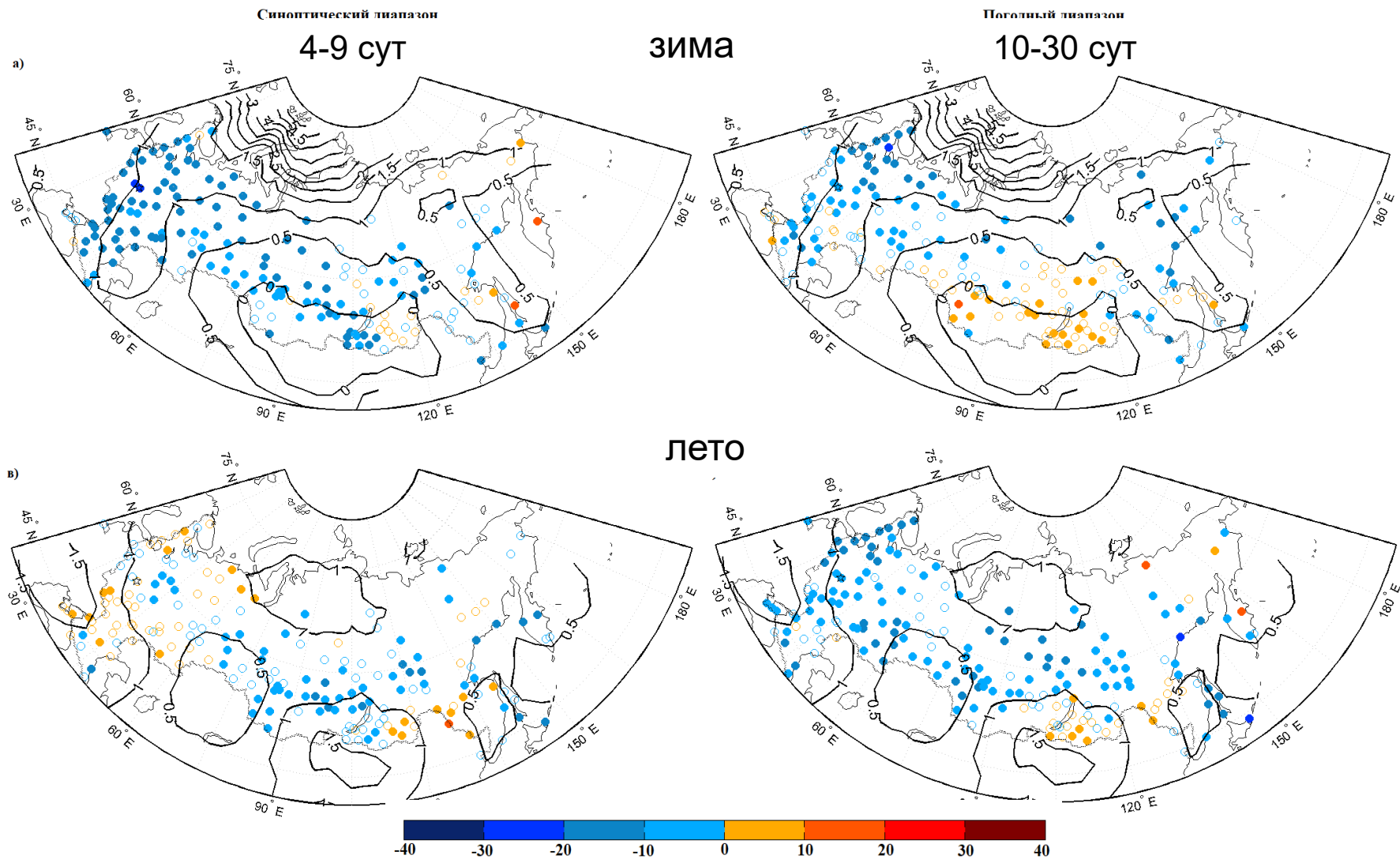
Бабина, Семенов, 2019, МиГ

# Изменения СКО суточных аномалий температуры (в %) в различных внутримесячных диапазонах в период 2000-2018 гг. относительно периода 1970-1999 гг.



Бабина, Семенов, 2019; 2022

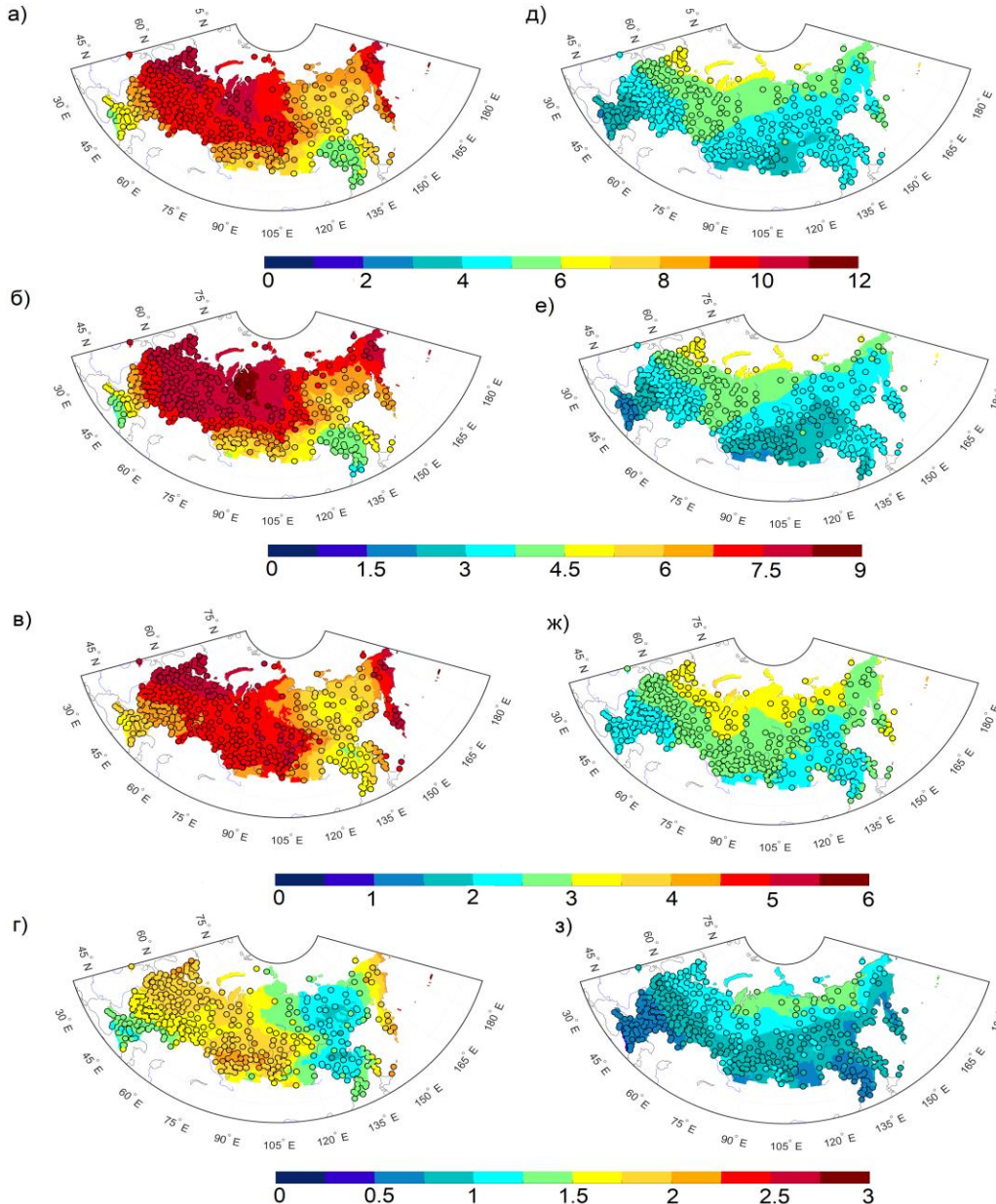
Изменения СКО суточных аномалий температуры (в %) в различных внутримесячных диапазонах в период 2000-2018 гг. относительно периода 1970-1999 гг.



Как меняется изменчивость давления в последние десятилетия?

зима

лето

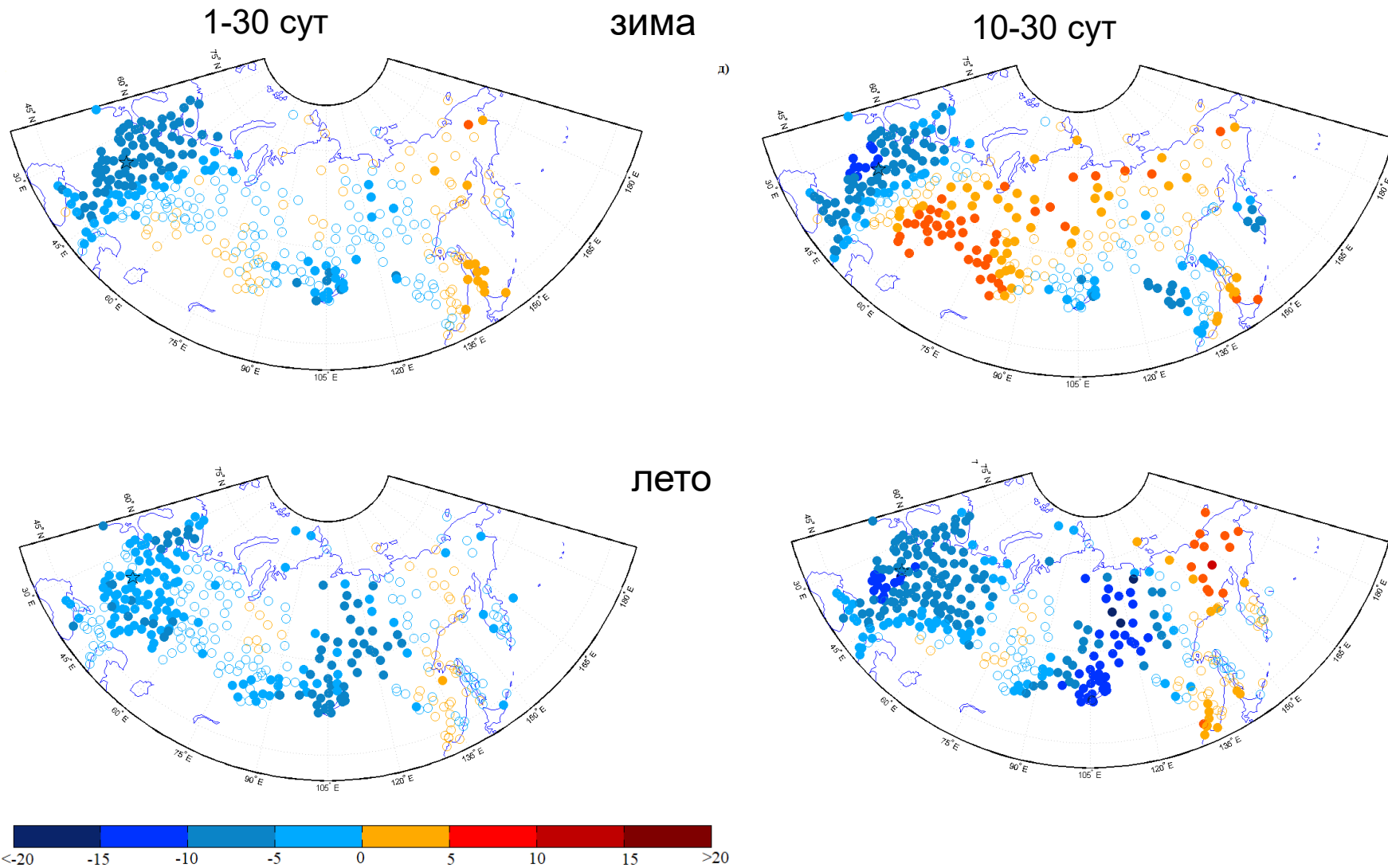


Стандартное отклонение (СКО) среднесуточного приземного давления (мб) по данным наблюдений (кружки) и реанализа ERA5 (поле) за 2000–2023 гг. во временных диапазонах изменчивости для зимы:

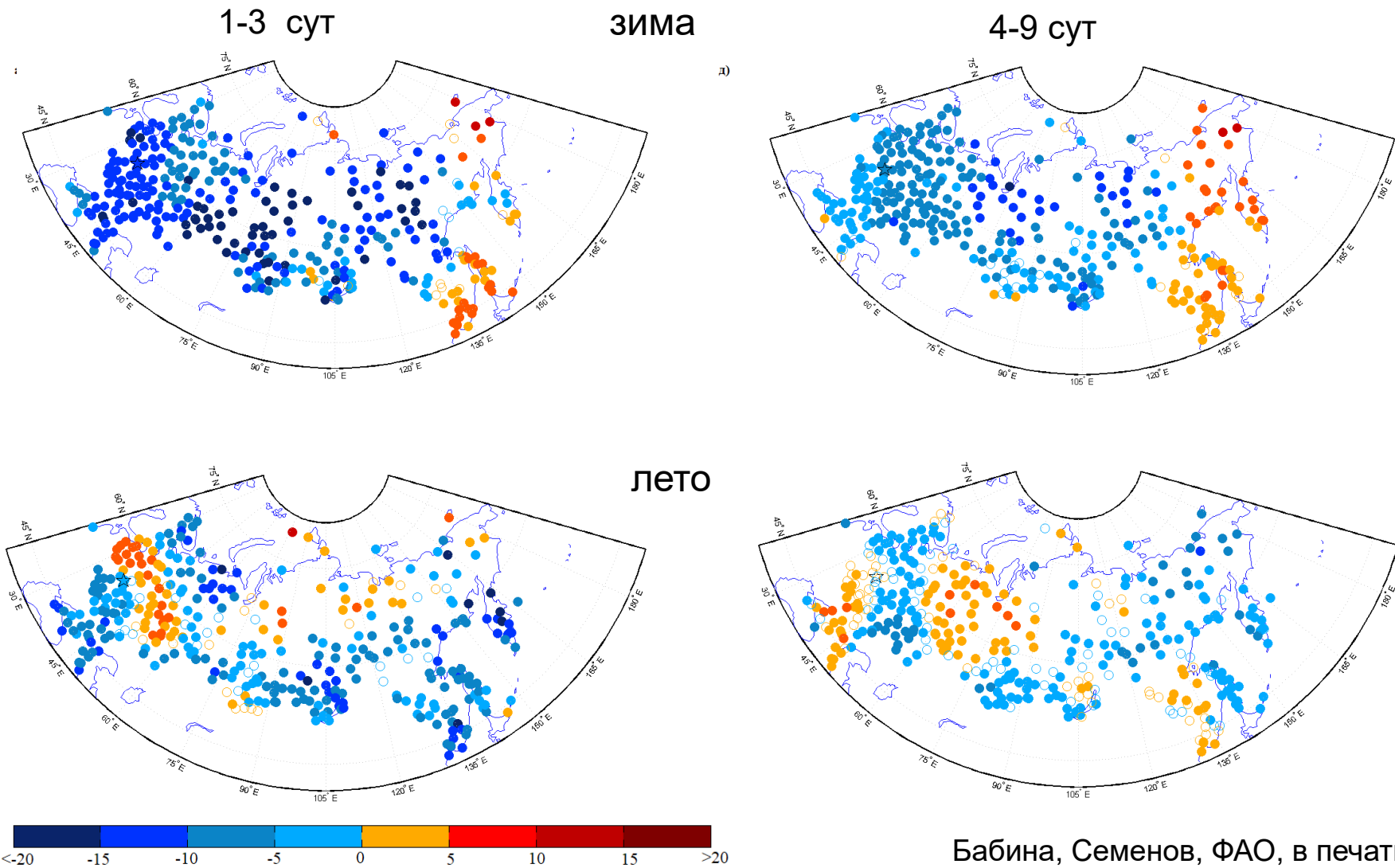
- а) <30 сут,
  - б) 10–30 сут,
  - в) 4–9 сут,
  - г) <3 сут
- и лета:
- д) <30 сут,
  - е) 10–30 сут,
  - ж) 4–9 сут,
  - з) <3 сут

Бабина, Семенов, ФАО, в печати

Изменения СКО суточных аномалий давления (в %) в различных внутримесячных диапазонах в период 2000-2018 гг. относительно периода 1970-1999 гг.



Изменения СКО суточных аномалий давления (в %) в различных внутримесячных диапазонах в период 2000-2018 гг. относительно периода 1970-1999 гг.



Бабина, Семенов, ФАО, в печати

# Экстремальные осадки и потепление

# Особенности изменений осадков с ростом температуры

Коэффициенты линейной аппроксимации связи экстремальных осадков с температурой

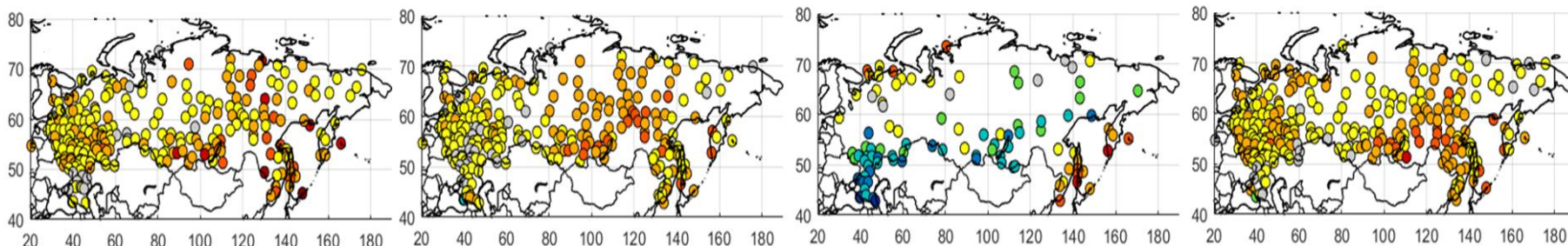
Зима

Весна

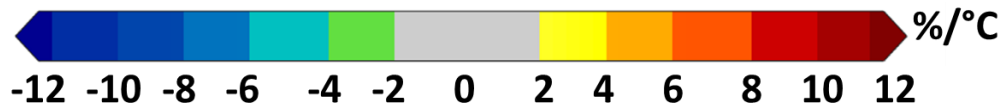
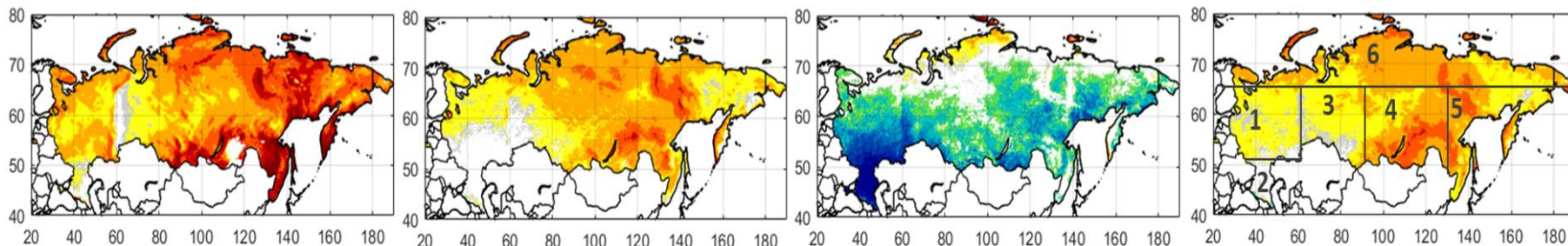
Лето

Осень

Метеостанции



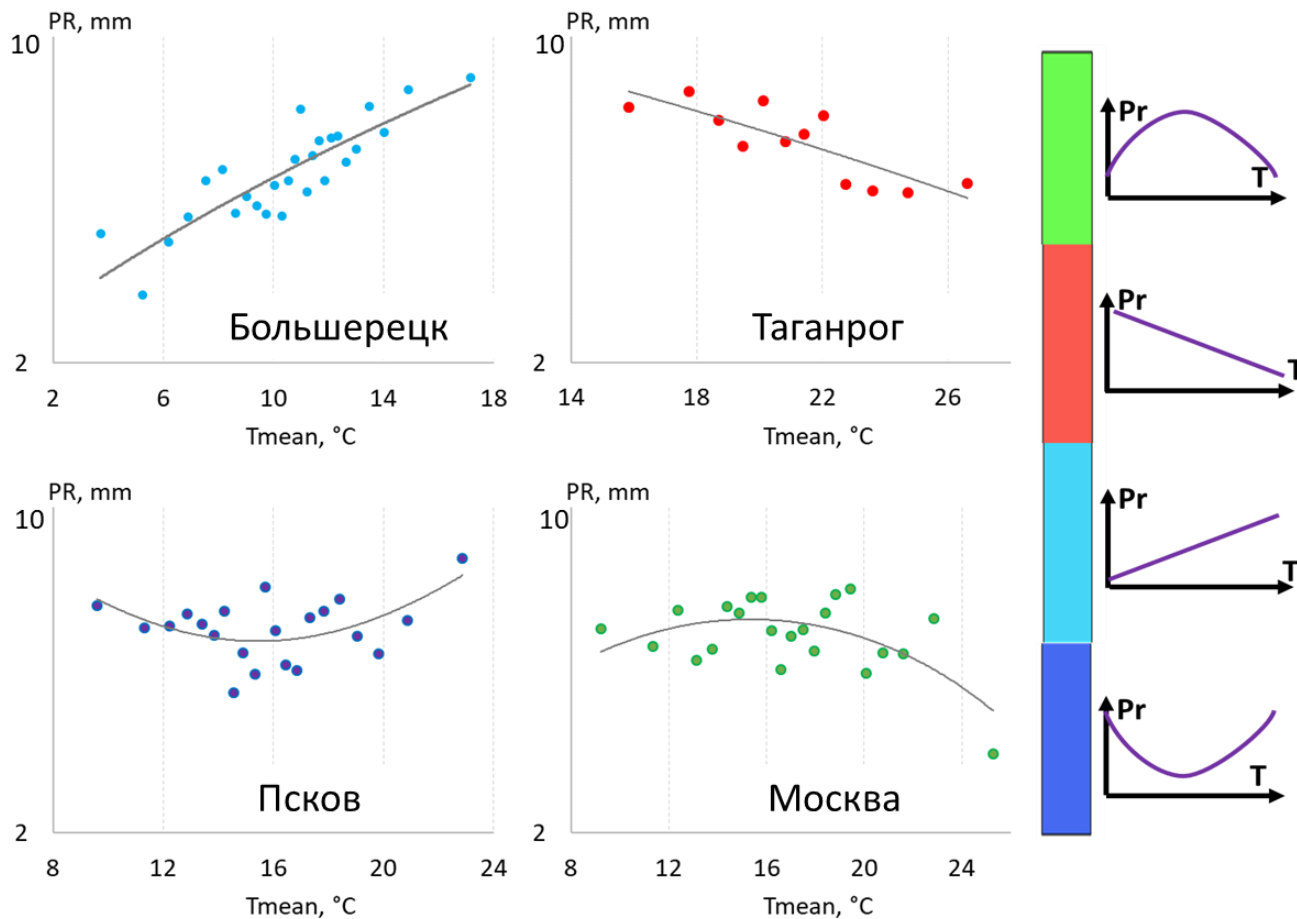
ERA5



Aleshina, Semenov, Chernokulsky, 2021, ERL

# Особенности изменений осадков на с ростом температуры

Примеры зависимостей температуры и осадков на метеорологических станциях летом



# Особенности изменений осадков с ростом температуры

## Тип зависимостей осадков от температуры

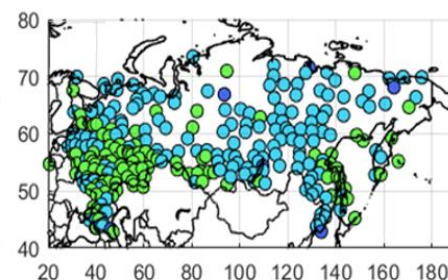
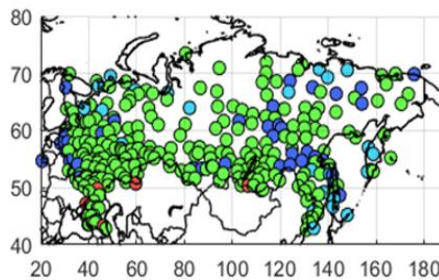
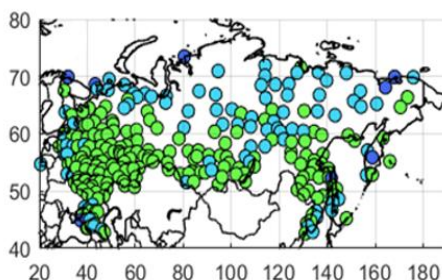
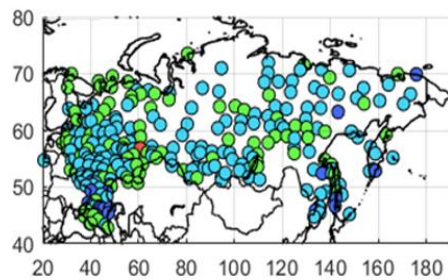
Зима

Весна

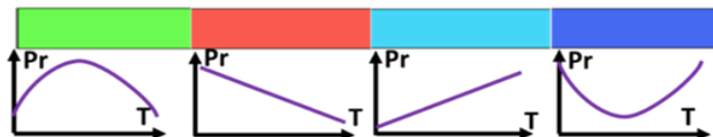
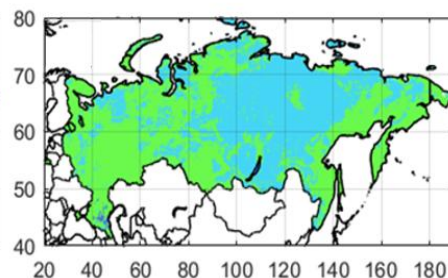
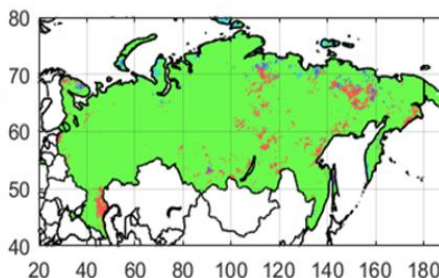
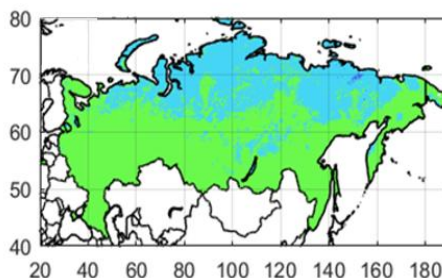
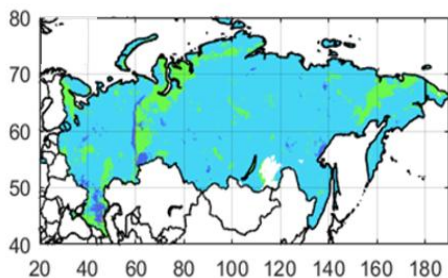
Лето

Осень

Метеостанции

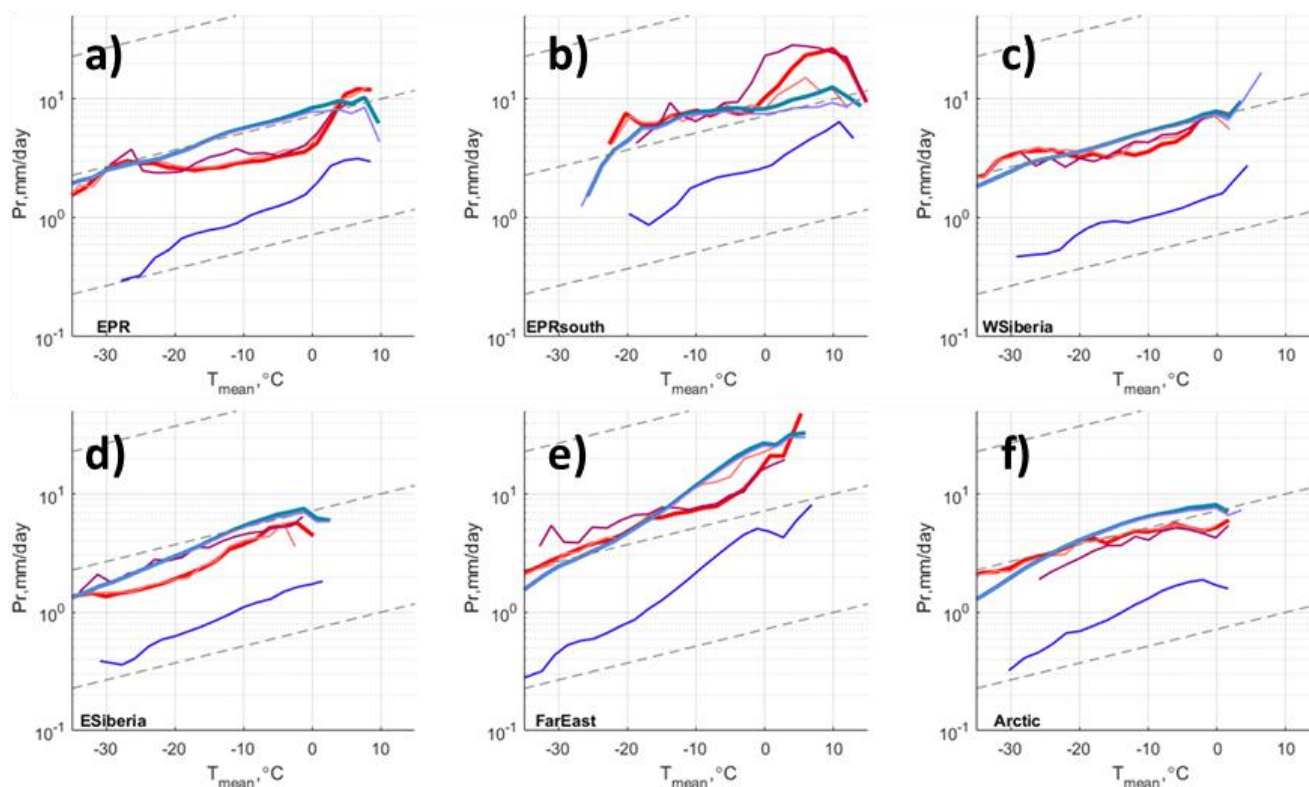


ERA5



# Особенности изменений осадков с ростом температуры

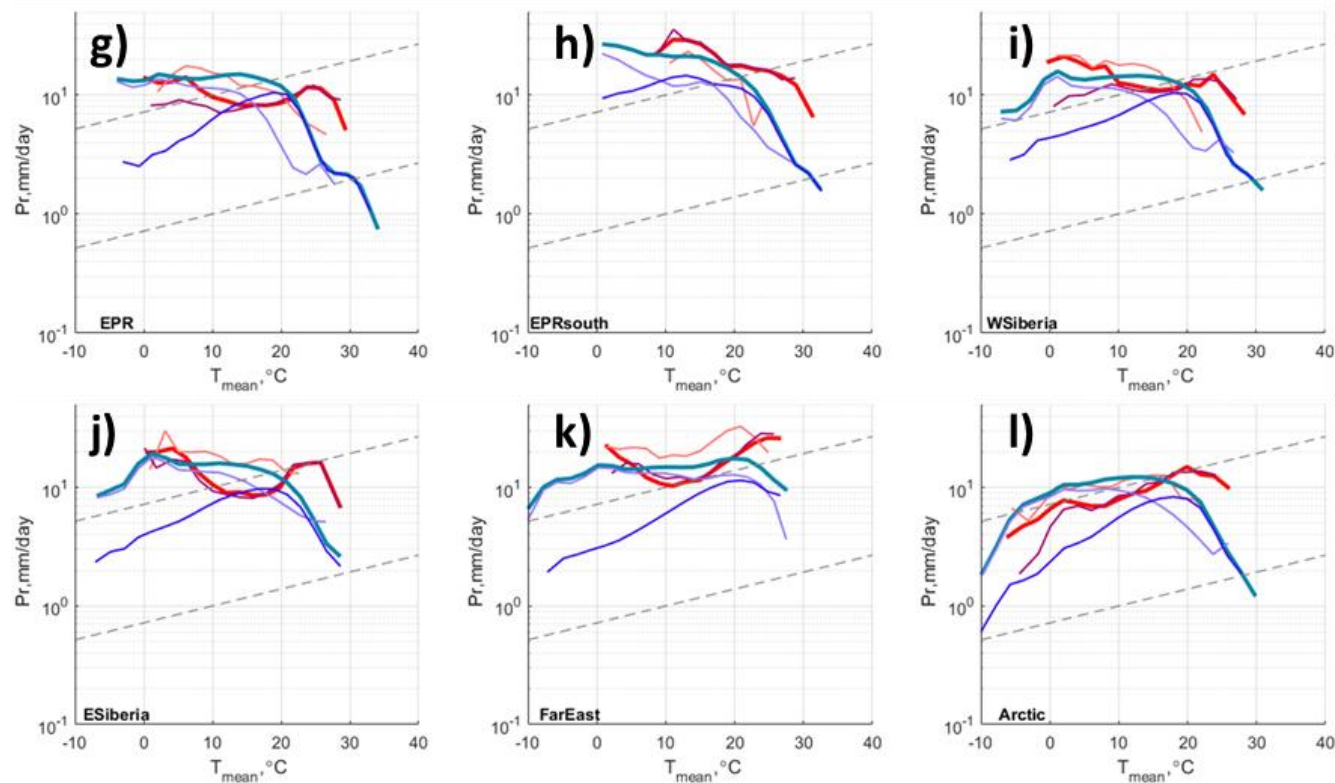
Интенсивность экстремальных осадков как функция температуры для регионов России зимой



— Станции, общ. — Станции, обложные — Станции, ливневые  
— ERA5 , общ. — ERA5 , крупномасшт. — ERA5 , конвективные

## Особенности изменений осадков с ростом температуры

Интенсивность экстремальных осадков как функция температуры для регионов России летом

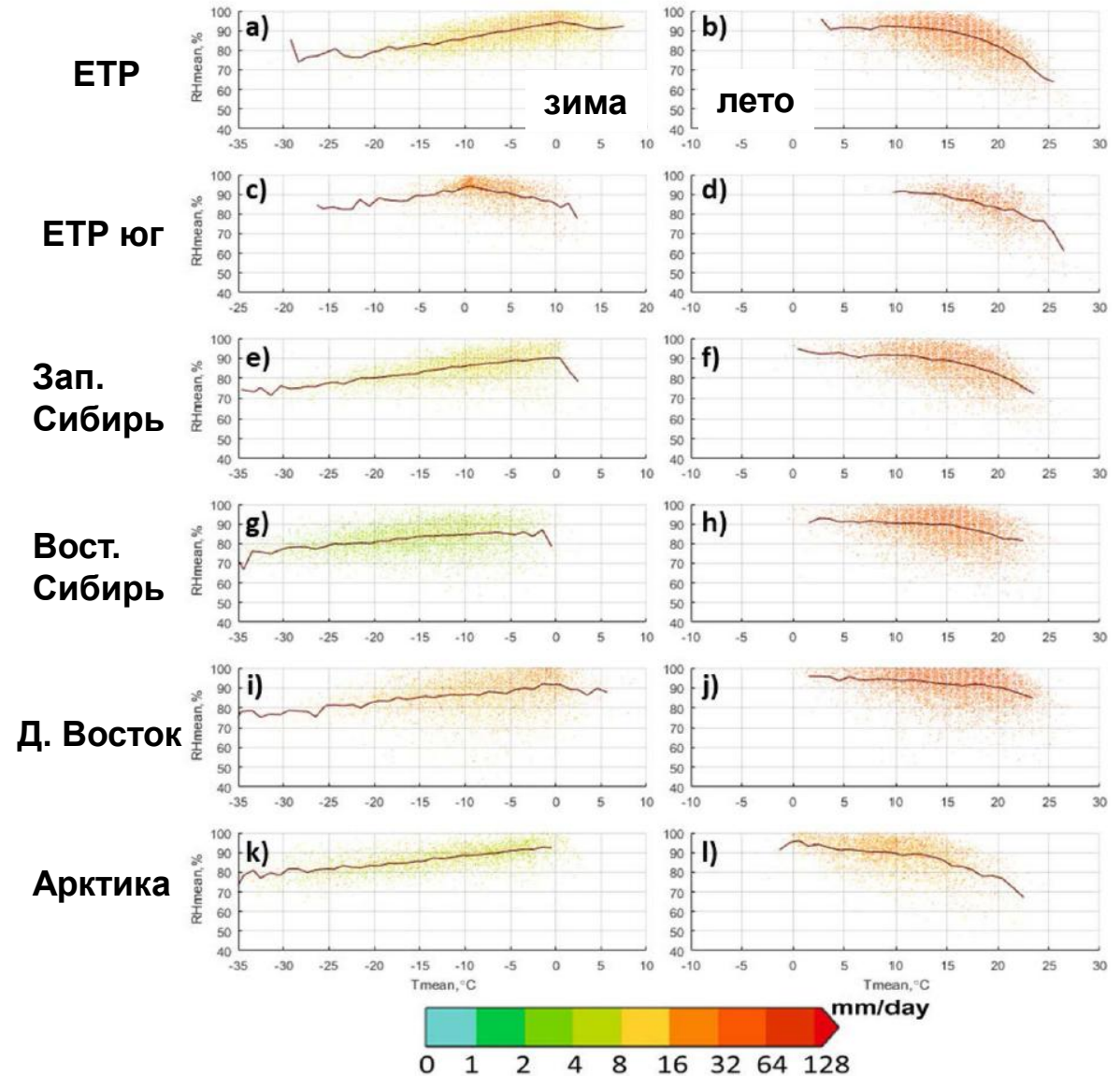


— Станции, общ. — Станции, обложные — Станции, ливневые  
— ERA5 , общ. — ERA5 , крупномасшт. — ERA5 , конвективные

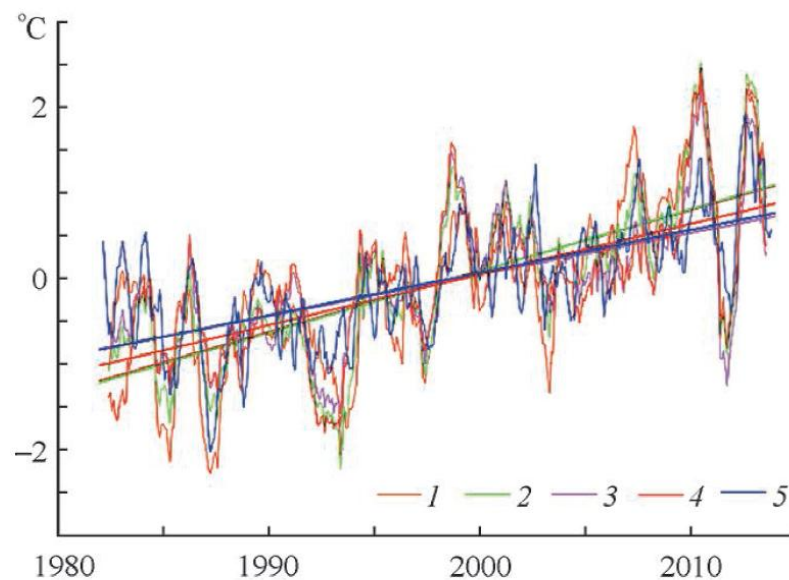
# Особенности изменений осадков с ростом температуры

Изменения относительной влажности (%) с температурой в российских регионах

Летом с потеплением относительная влажность падает

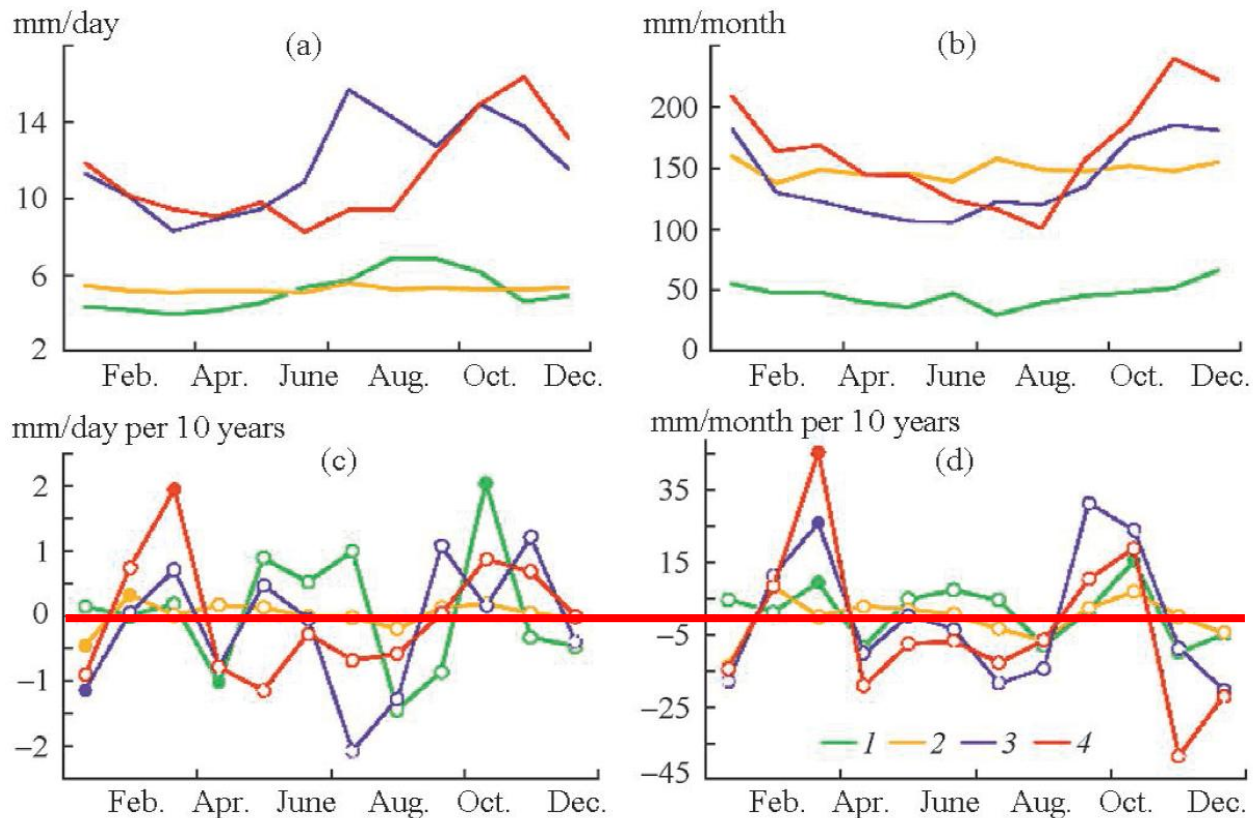


Отсутствие роста осадков в Черноморском регионе



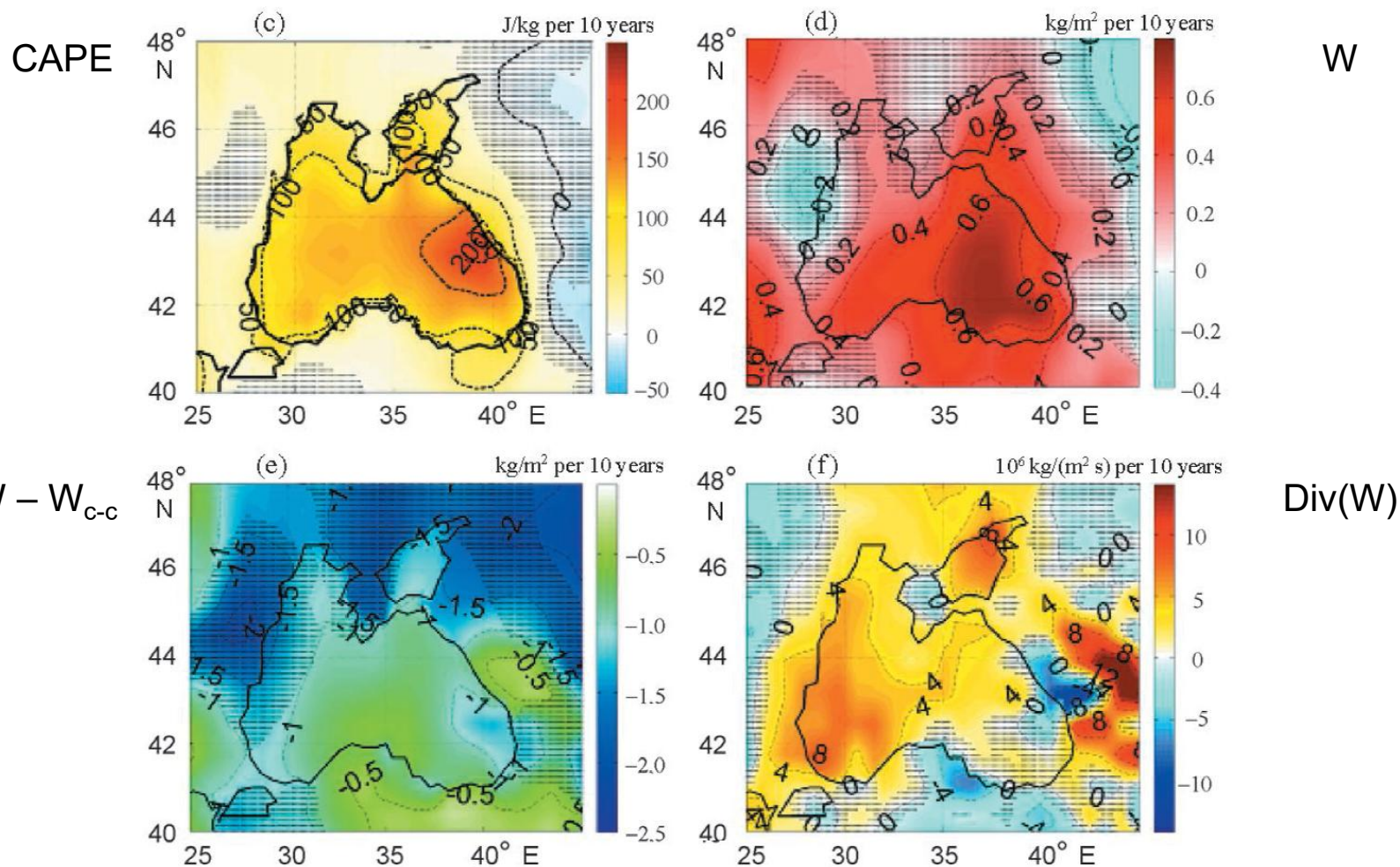
**Fig. 2.** The variations in the 11-year moving average and linear trends in the monthly mean anomalies of temperature from the data of (1) Anapa, (2) Tuapse, (3) Sochi, and (4) Krasnaya Polyana weather stations and (5) region 3 from the NOAA SST dataset over the period of 1982–2014 (the anomalies are computed relative to the period of 1982–2014).

## Климатология и тренды интенсивности и сумм летних осадков

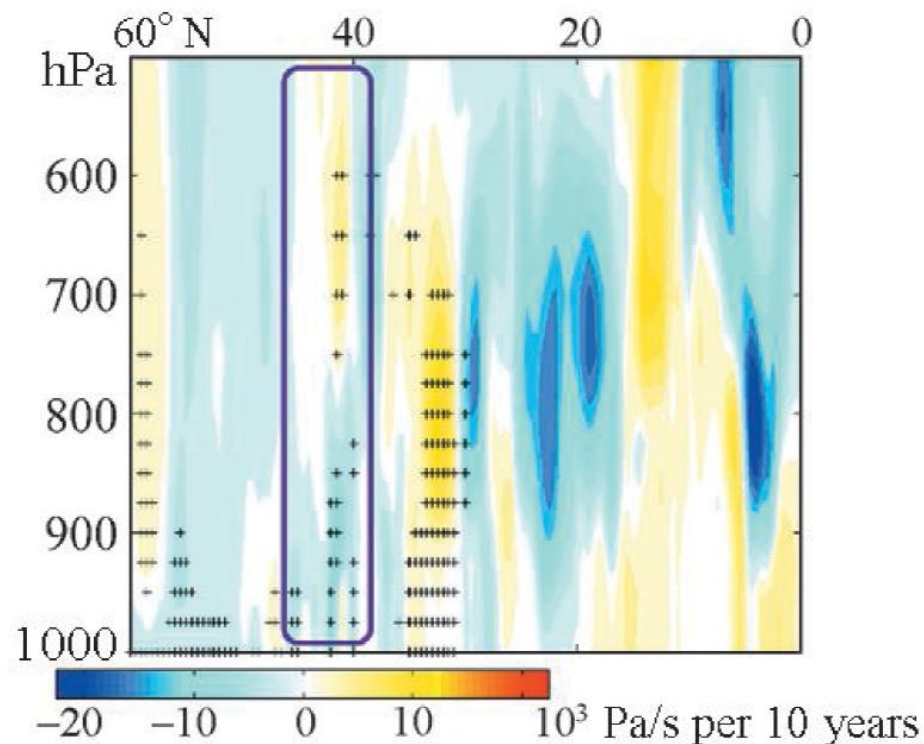


**Fig. 3.** The annual variations in (a) monthly mean precipitation intensity and (b) monthly total precipitation and the trend coefficients for (c) monthly mean precipitation intensity and (d) monthly total precipitation at (1) Anapa, (2) Tuapse, (3) Sochi, and (4) Krasnaya Polyana weather stations for the period of 1982–2014 (the significant trends are marked with the filled dots).

# Тренды CAPE, влагосодержания $W$ , разности $W - W_{c-c}$ , дивергенции влаги за период 1982-2014 по данным реанализа ERA5

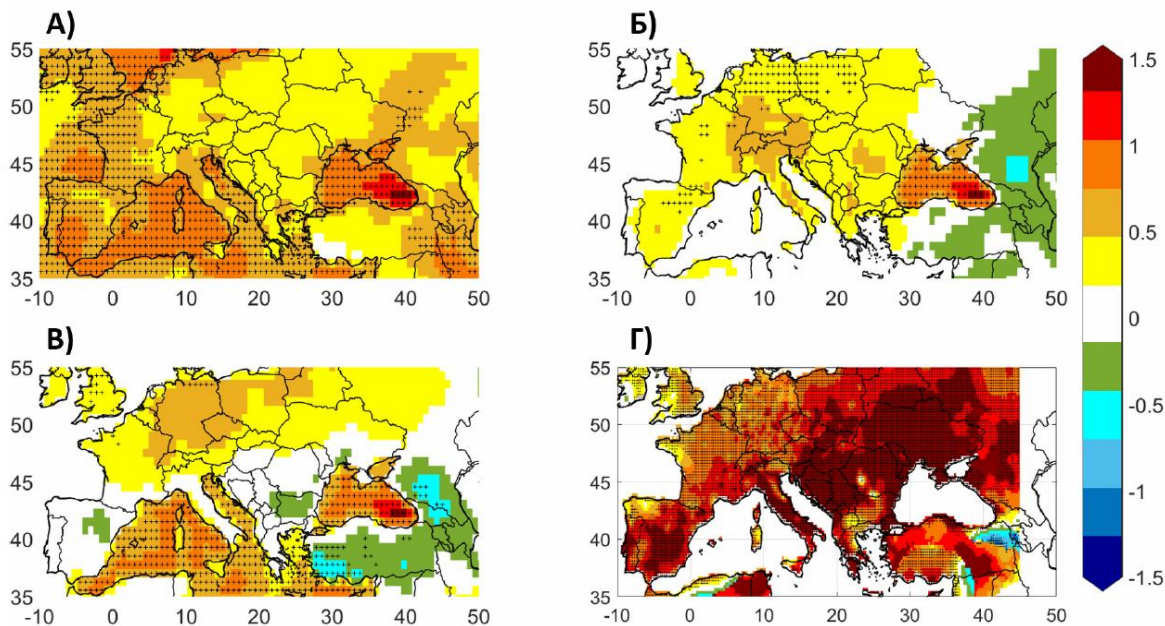
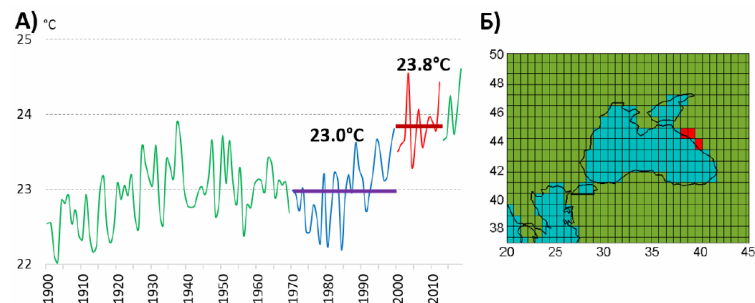


Тренды вертикальной скорости воздуха (Па/с/10 лет) летом для меридионального разреза 35-40 °в.д. за период 1982-2014 по данным реанализа ERA5

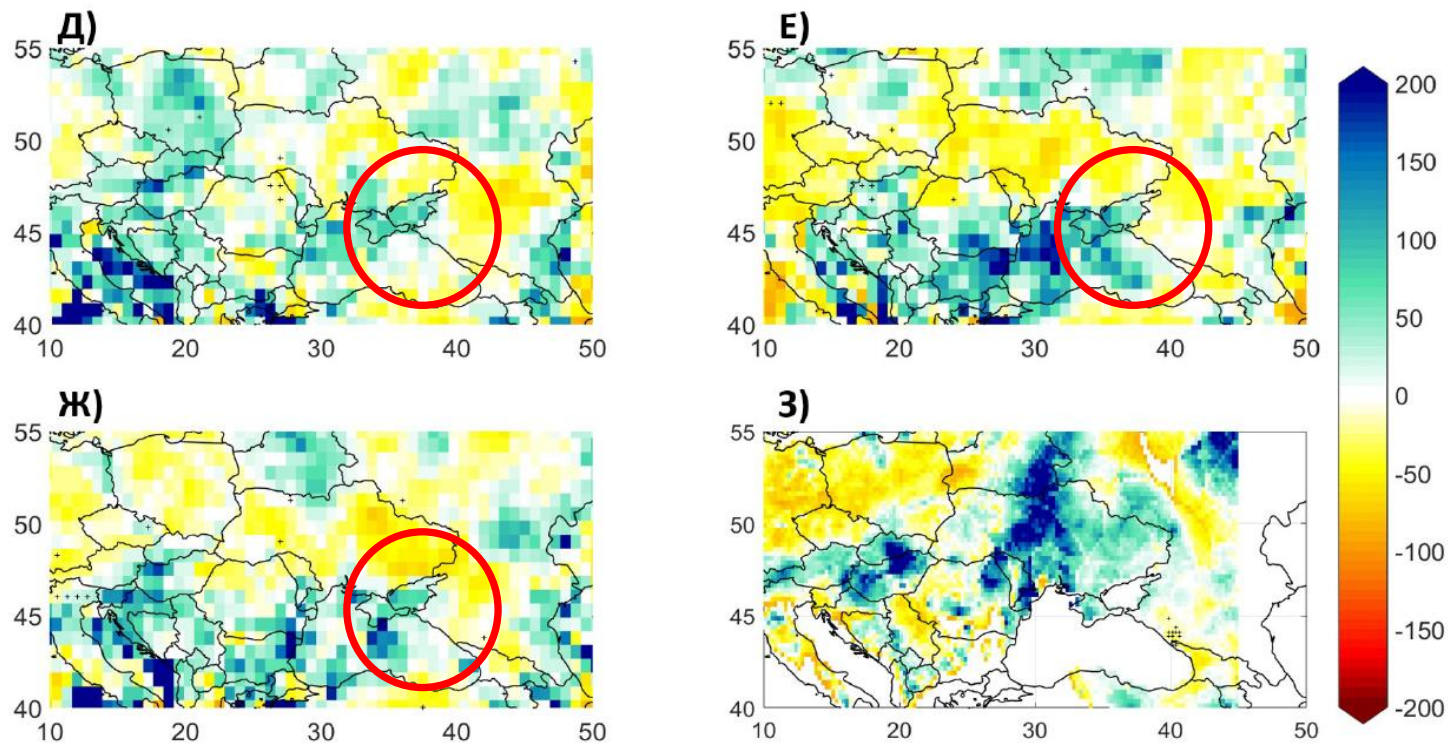


# ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ В ИЗМЕНЕНИИ ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КАВКАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДЕЛЬЮ КЛИМАТА

М.А. Алешина <sup>1),2)\*</sup>, В.А. Семенов <sup>1),2)</sup>, А.В. Чернокульский <sup>2)</sup>



**Рисунок 2.** Разности средней по ансамблям приповерхностной температуры воздуха в летний сезон между экспериментами (А) – (ТО – ХО), (Б) – (ТЧМ – ХО), (В) – (ТЧМ/СМ – ХО); (Г) – разность температур (2000-2012 гг.) – (1970-1999 гг.) по данным E-OBS. Значимые разности (на уровне 0.05) показаны точками

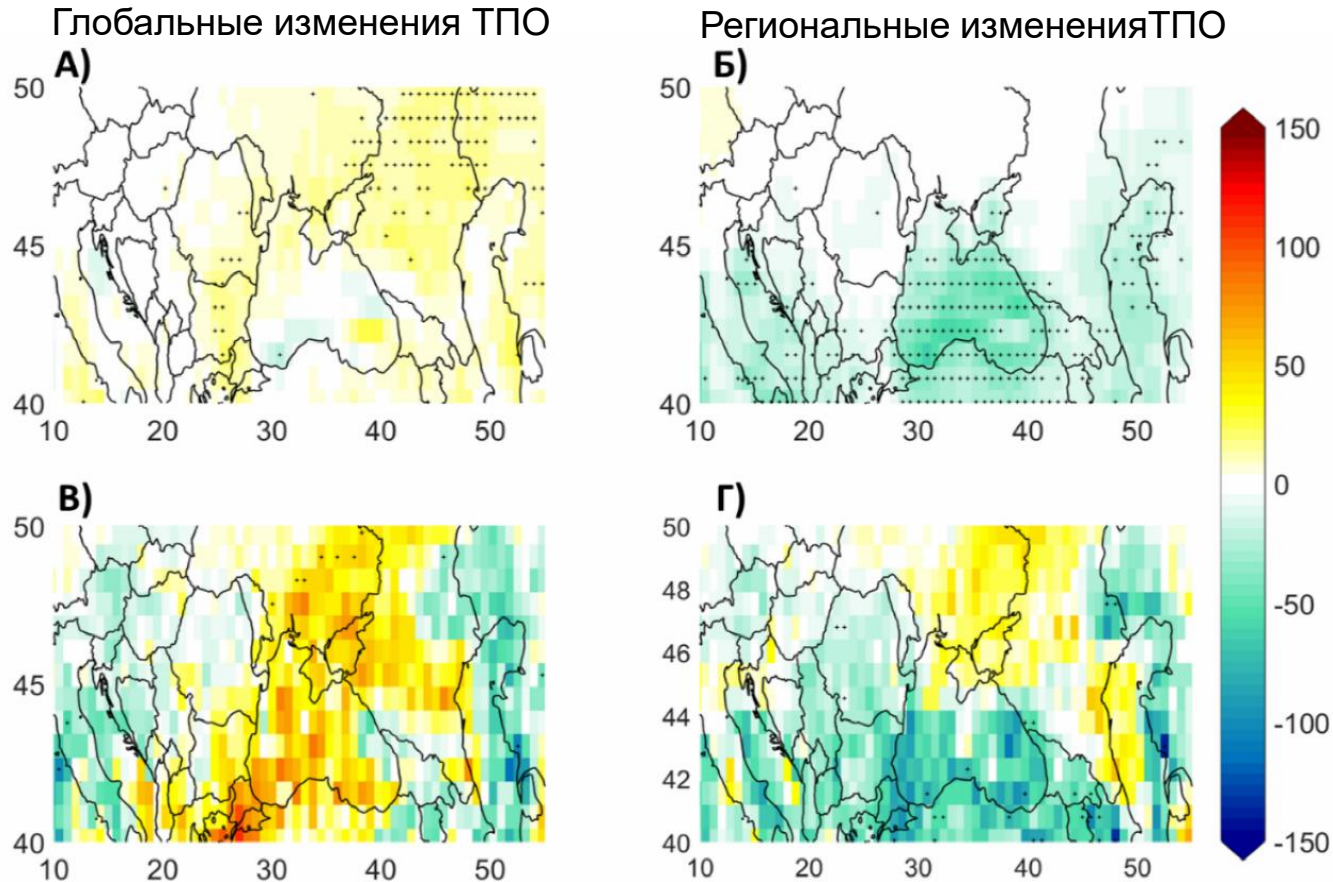


**Рисунок 3.** Средние (по ансамблю) разности между экспериментами для:  
 (А – Г) интенсивности всех осадков и (Д – З) экстремальных осадков на Черноморском  
 побережье (в %)

*А, Д – (ТО – ХО), Б, Е – (ТЧМ – ХО), В, Ж – (ТЧМ/СМ – ХО), Г, З – разность по данным E-OBS  
 для периодов (2000-2012 гг.) – (1970-1999 гг.).*

*Значимые разности (на уровне 0.05) показаны точками*

## Изменения CIN (Дж/кг) в модельных экспериментах, средние за лето и при экстремальных осадках



**Рисунок 5.** Средние разности между экспериментами для средних значений CIN (А, В) и при экстремальных осадках (В, Г) (в Дж/кг)

*А, В – (ТО – ХО), Б, Г – (ТЧМ/СМ – ХО). Значимые разности (на уровне 0.05) показаны штриховкой*

# Изменение характеристик осадков в летний период в Сочи на разных временных масштабах в 1980—2023 годы

М. А. Алешина<sup>\*, \*\*</sup>, В. А. Семенов<sup>\*, \*\*</sup>,  
 В. С. Воронцова<sup>\*, \*\*</sup>, А. В. Чернокульский<sup>\*, \*\*</sup>,  
 М. Г. Акперов<sup>\*, \*\*</sup>, Н. В. Швець<sup>\*\*\*</sup>

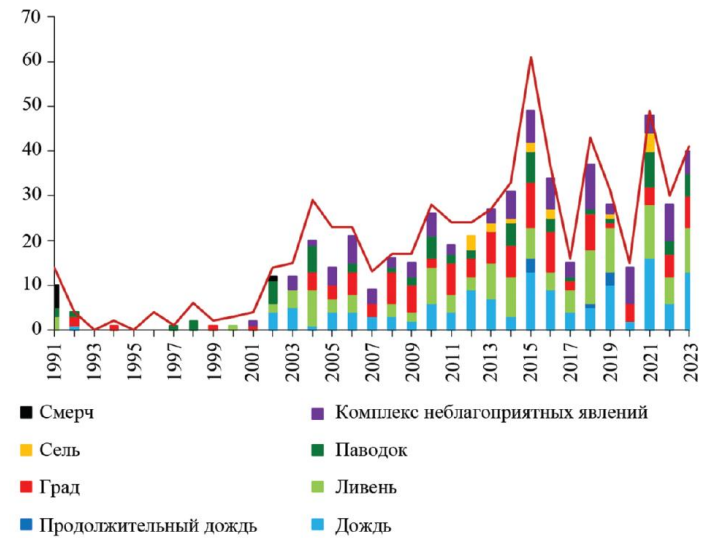
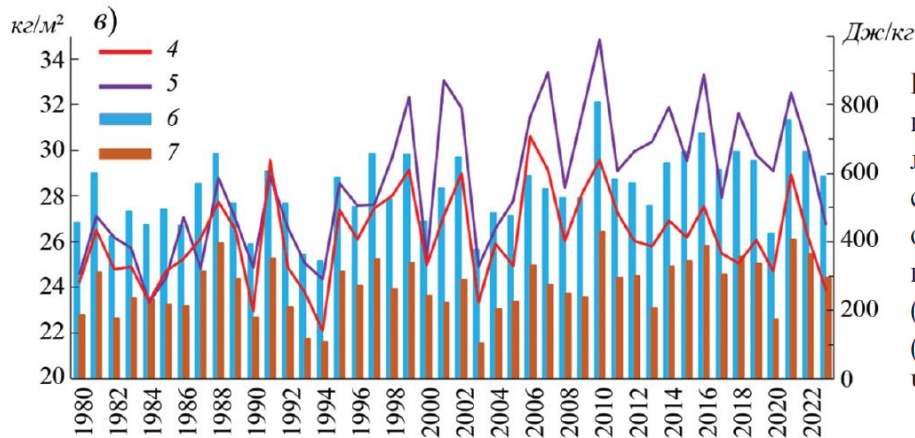
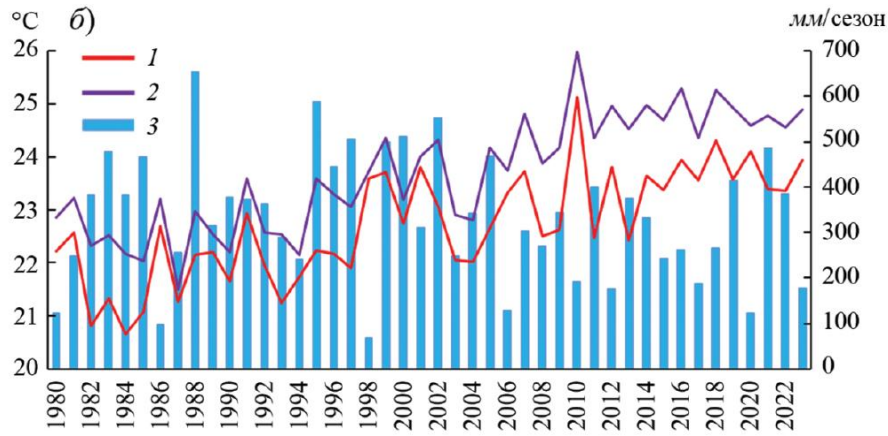


Рис. 2. Высота над уровнем моря в реанализе ERA5 в регионе исследования (а; прямоугольник — область для расчета значений величин в реанализе ERA5 для суши и моря, звезда — расположение г. Сочи); изменения средних для лета значений приземной температуры воздуха (1) и сумм осадков (2, шкала справа) на метеостанции Сочи, средняя температура поверхности северо-восточной части Черного моря в реанализе ERA5 (3) (б), а также средние за летний сезон значения влагосодержания над сушей (4) и над морем (5) и CAPE над сушей (6) и над морем (7, шкала справа) в Черноморском регионе по данным реанализа ERA5 в 1980—2023 гг. (в).

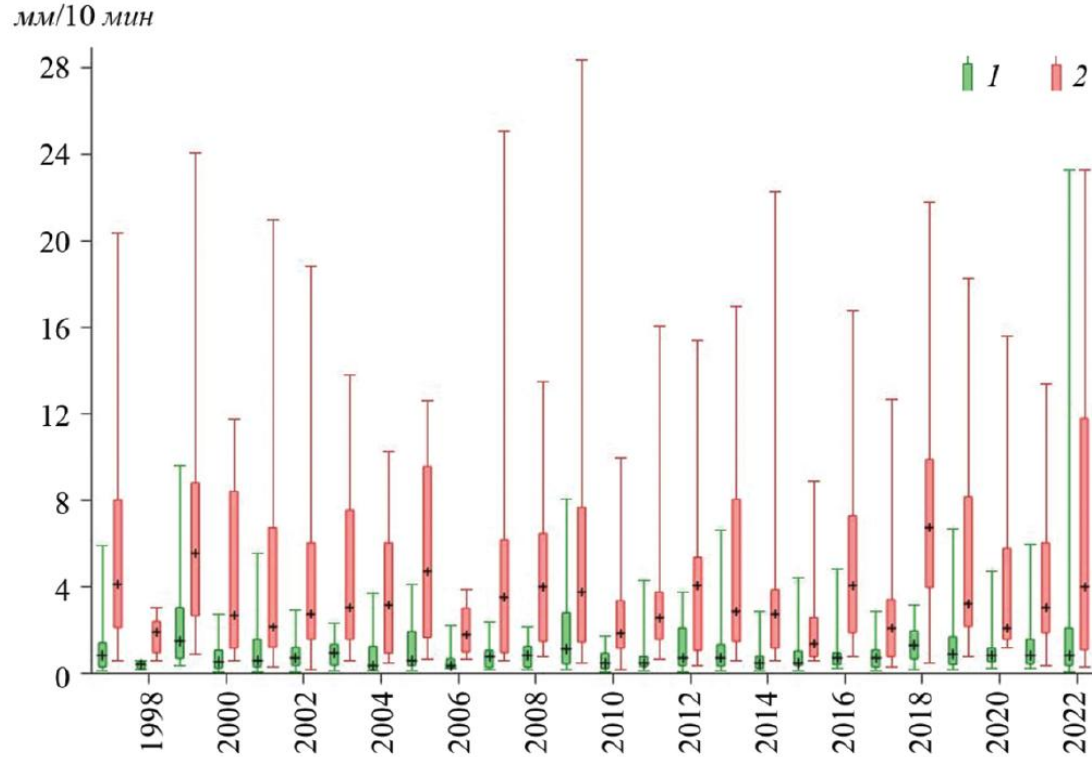
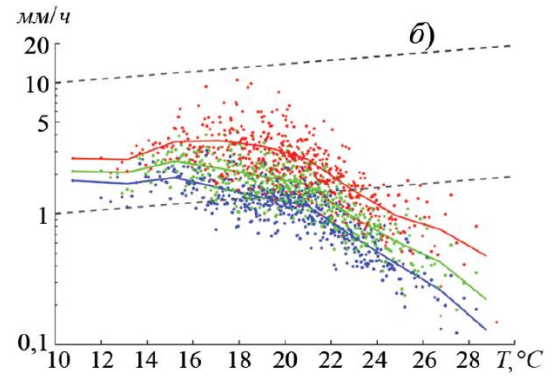
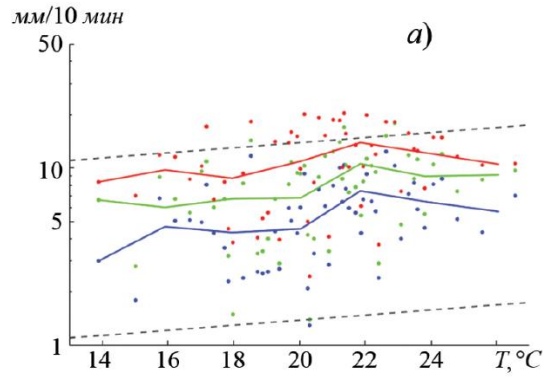


Рис. 3. Характеристики средней (1) и максимальной (2) интенсивности осадков по данным pluвиографа на станции Сочи летом в 1997—2022 гг.: минимальные и максимальные значения за сезон — нижние и верхние “усы”, значения 25-го и 75-го квартилей — нижние и верхние границы боксов соответственно; точками показаны медианные значения характеристик.

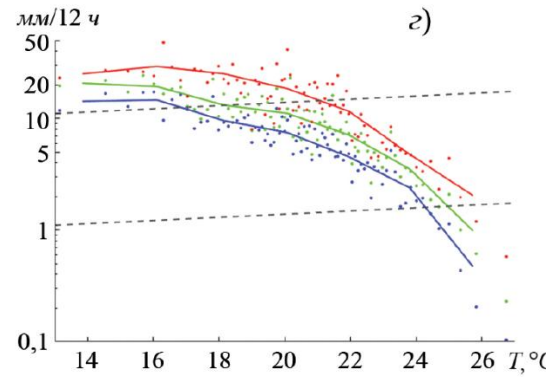
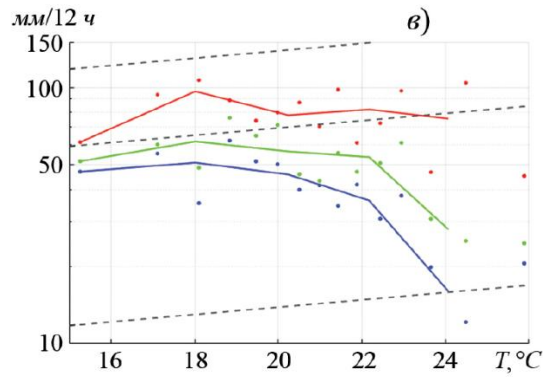
Алешина и др., 2025, МиГ

плювиограф



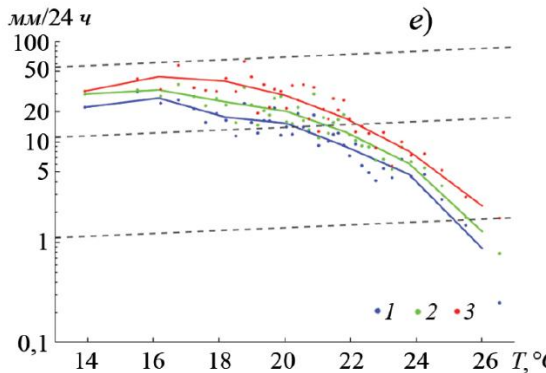
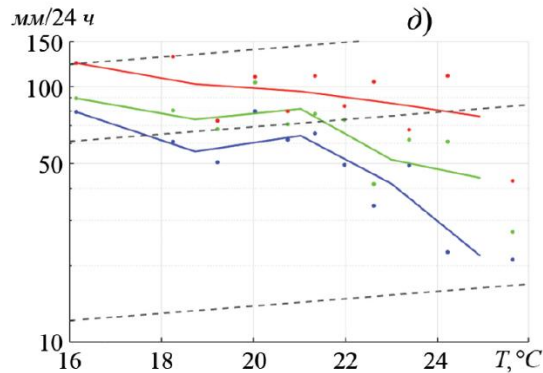
ERA5, 1ч

станция, 12ч



ERA5, 12ч

станция, 24ч



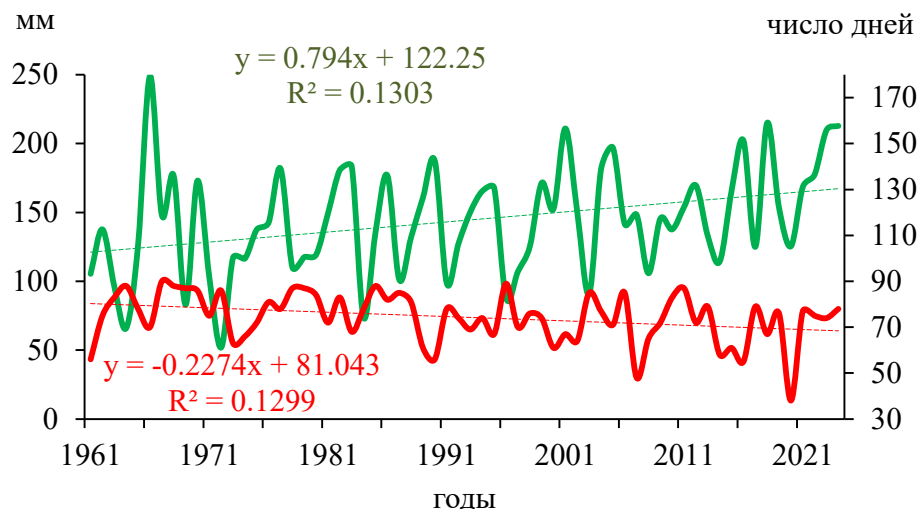
ERA5, 24ч

Значения 95-го (1), 97,5-го (2) и 99-го (3) процентилей осадков

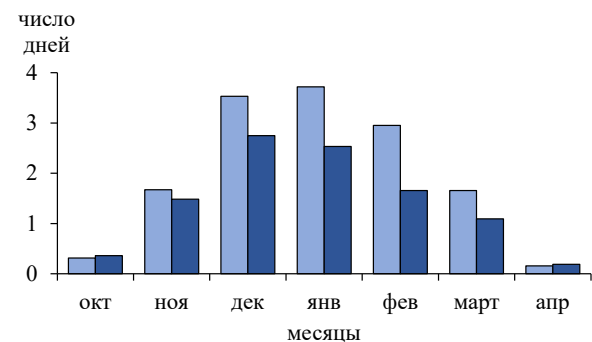
Московские снегопады зимы 2025/26 года -  
тенденция или случайность?

# Современные и прогнозируемые изменения повторяемости умеренных и сильных снегопадов в Москве

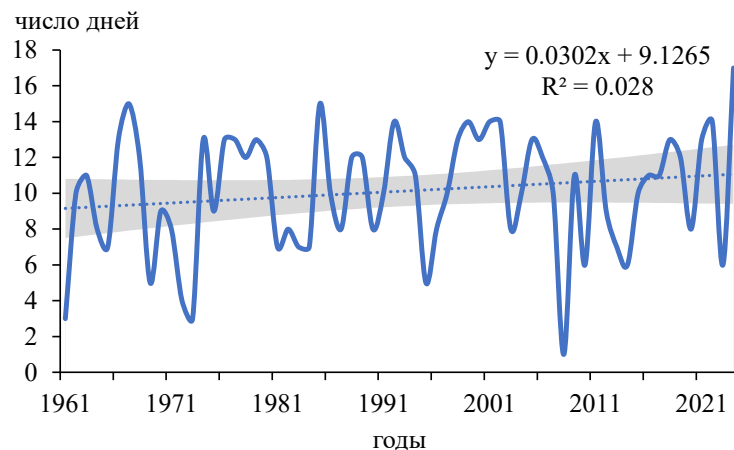
**Осадки** и **число дней с отрицательными температурами** зимой



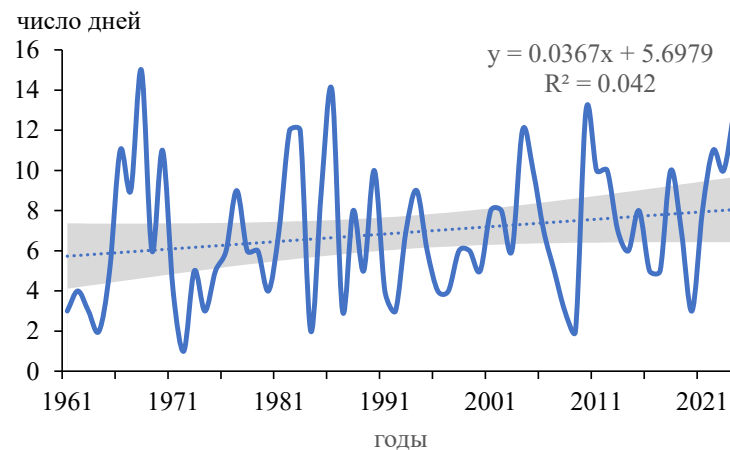
Климатология числа дней со снегопадами **умеренной** и **сильной** интенсивности



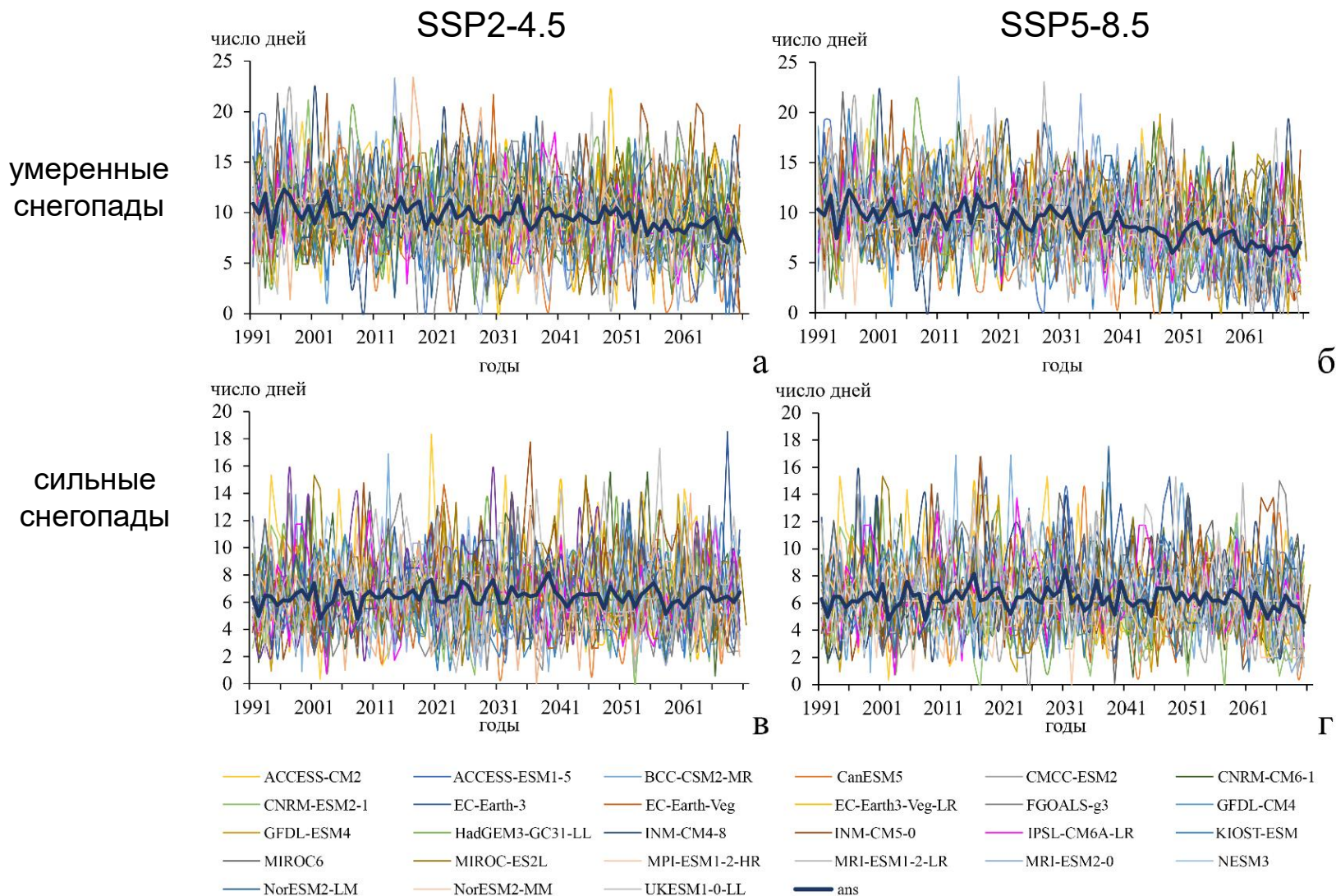
Число дней со снегопадами умеренной интенсивности



Число дней со снегопадами сильной интенсивности



# Число дней со снегопадами умеренной и сильной интенсивности в моделях CMIP6



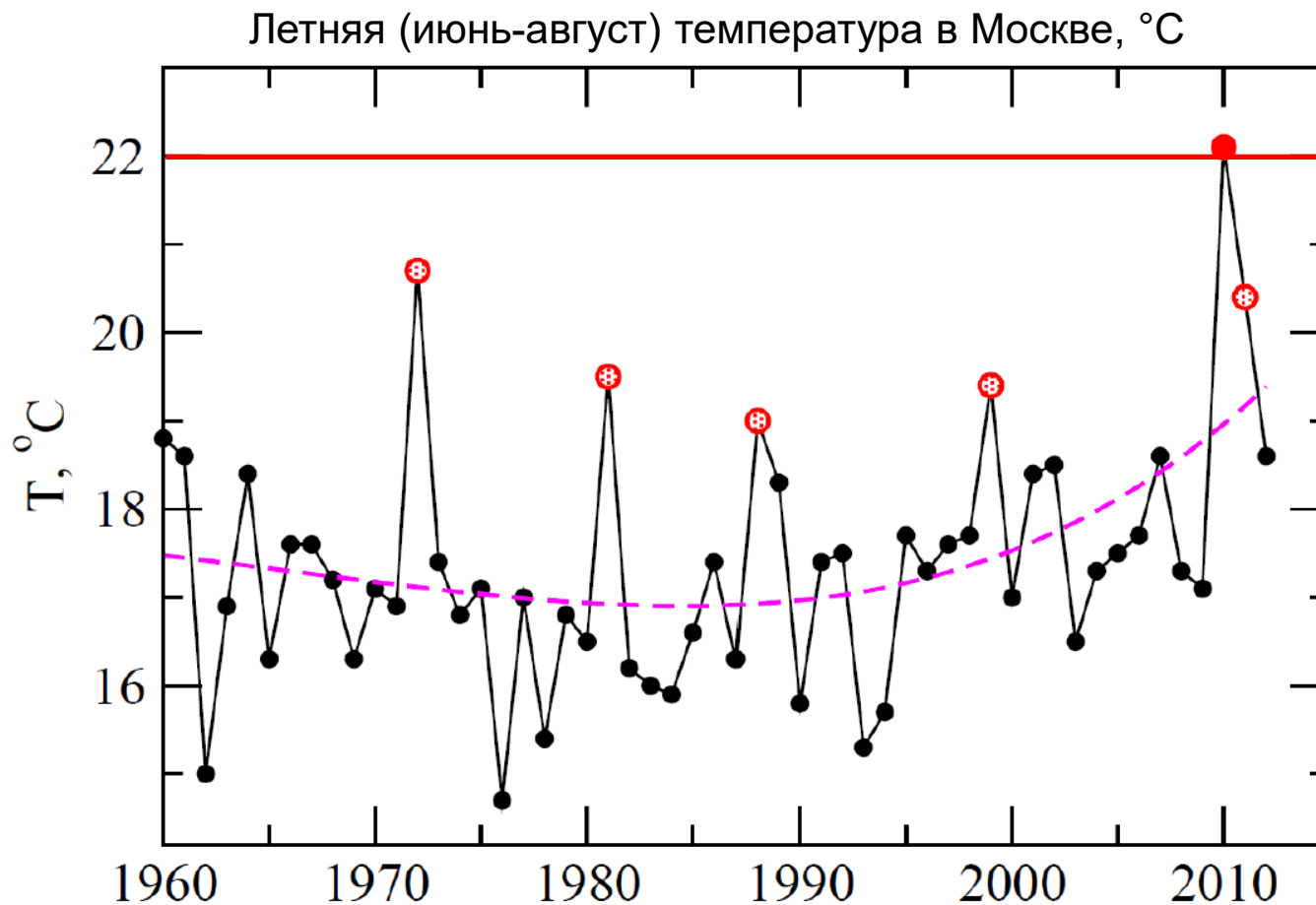
Семенов, Черенкова, Чернокульский, ДАН, пр.к печати

Волна жары 2010 года:

факторы формирования экстремальных температур

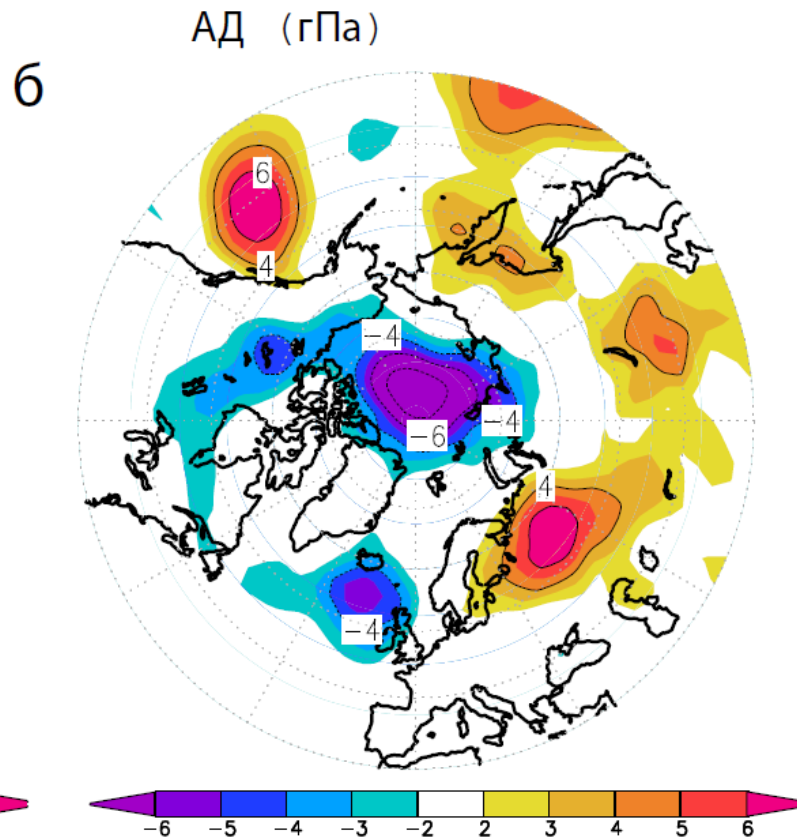
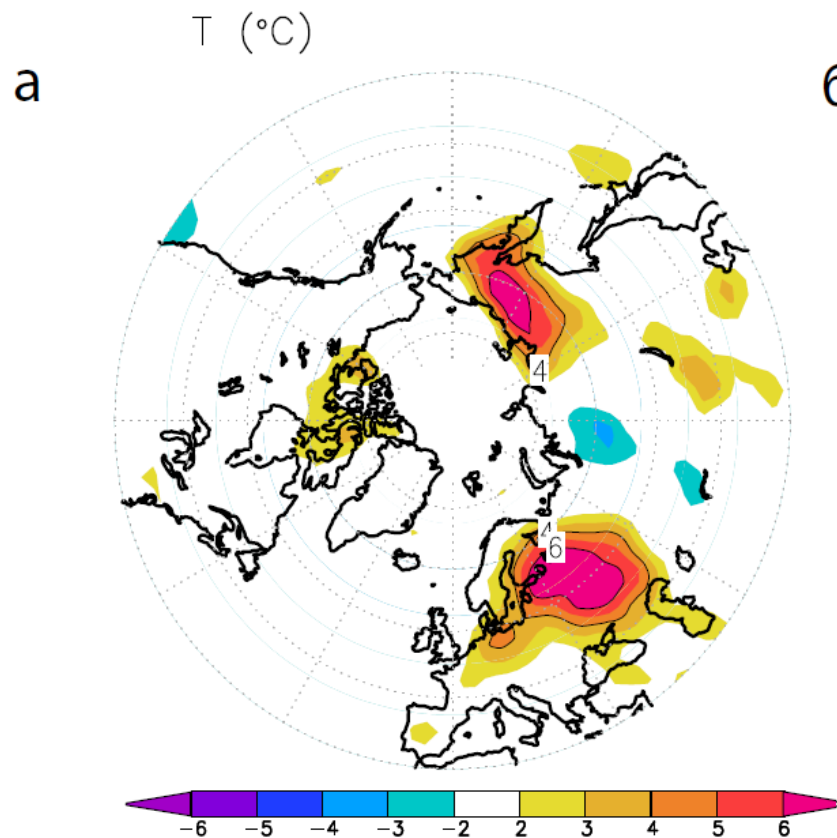
## Летние волны жары (московская жара 2010 г.)

Волна жары в московском регионе в 2010 г. – яркий пример экстремального явления



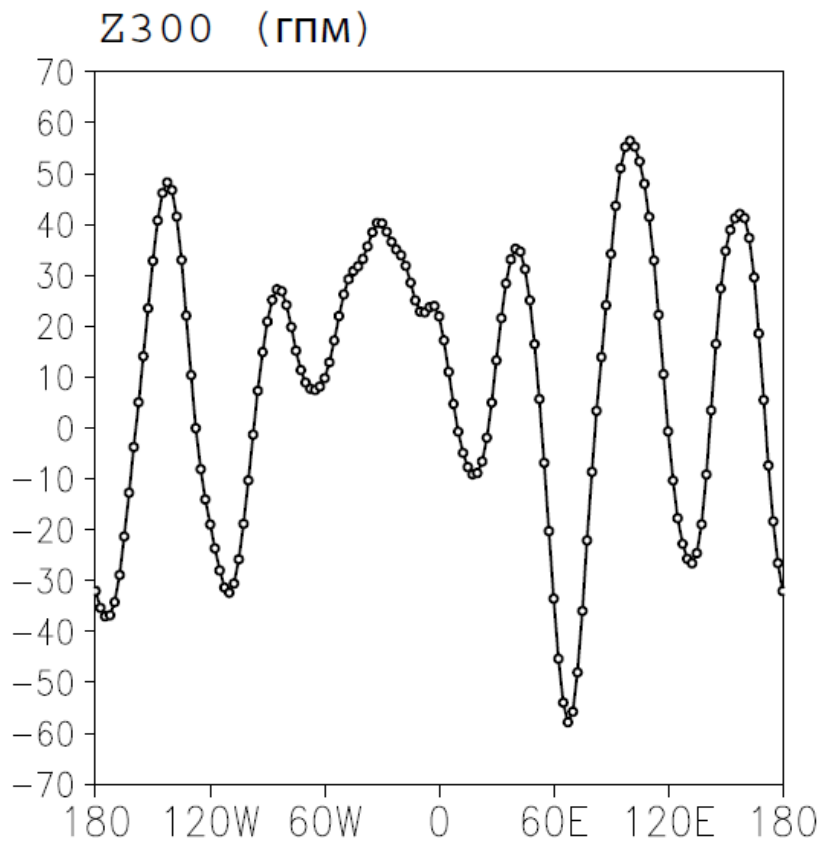
# Летние волны жары (московская жара 2010 г.)

Аномалия т-ры и давления воздуха в июле 2010 г.

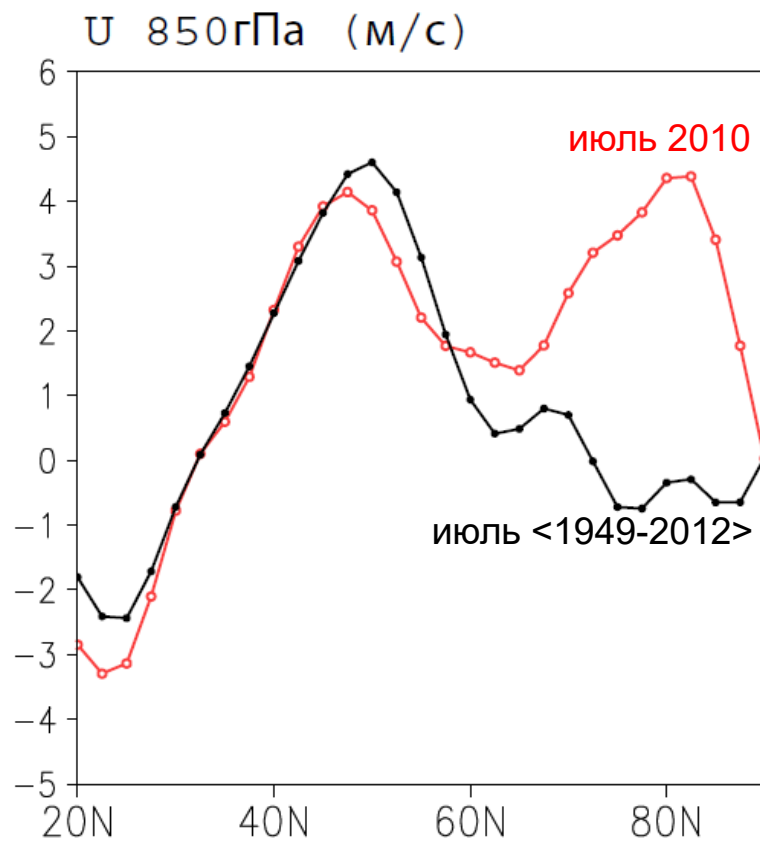


# Летние волны жары (московская жара 2010 г.)

Стационарная волна  $m=6$   
( $40^\circ$  с.ш., июль 2010 г.)

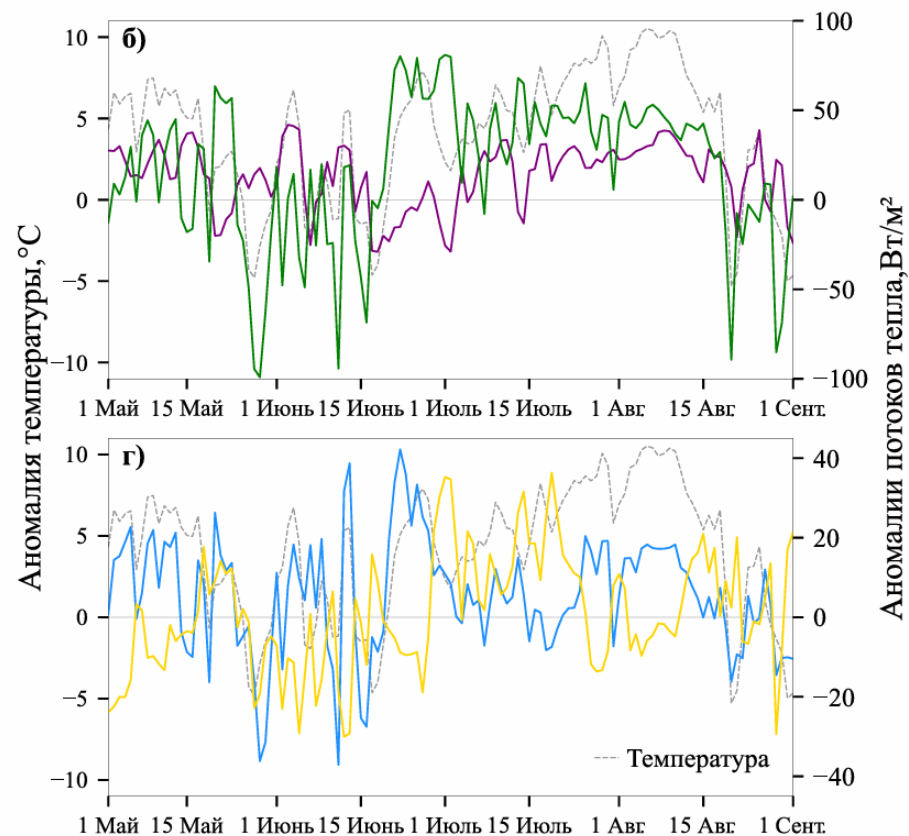
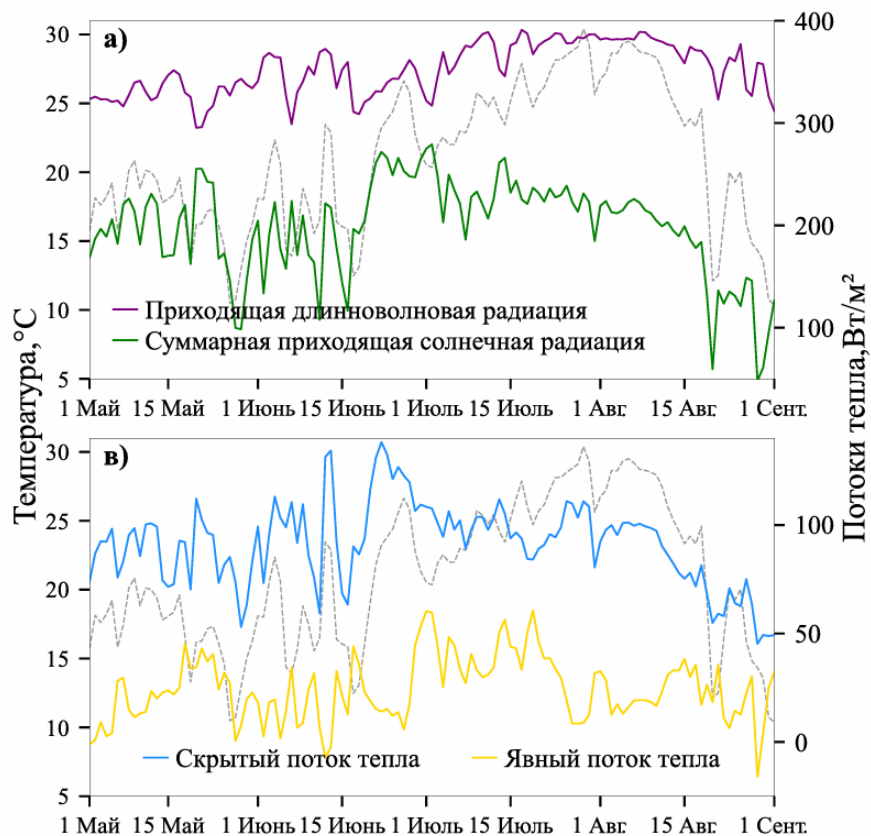


Бимодальное распределение  
зональной скорости

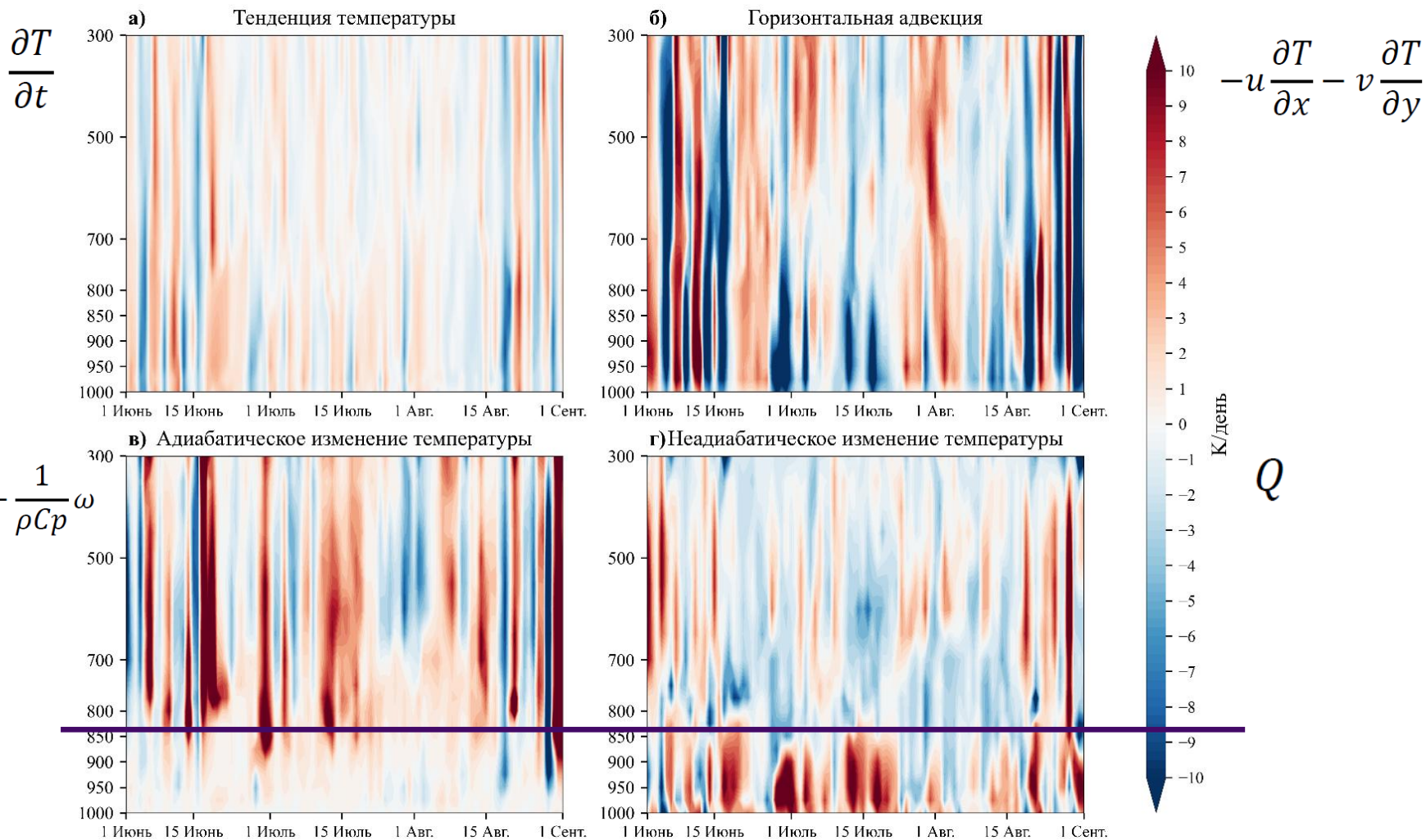


Семенов 2013

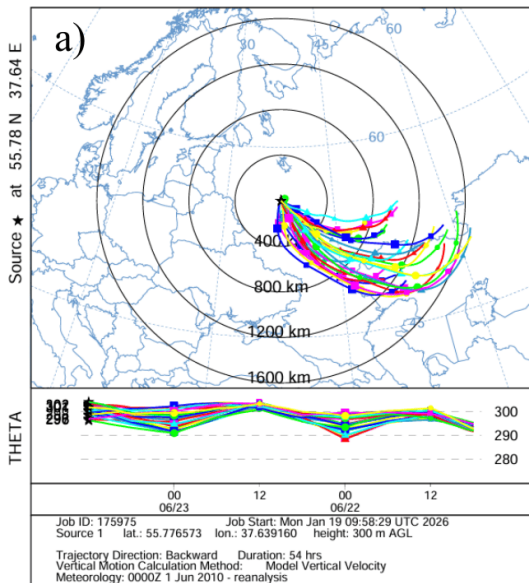
Потоки (и аномалии) суммарной **коротковолновой**, **приходящей длинноволновой** радиации, **скрытого** и **явного** тепла во время волны тепла 2010 г. (Вт/м<sup>2</sup>)



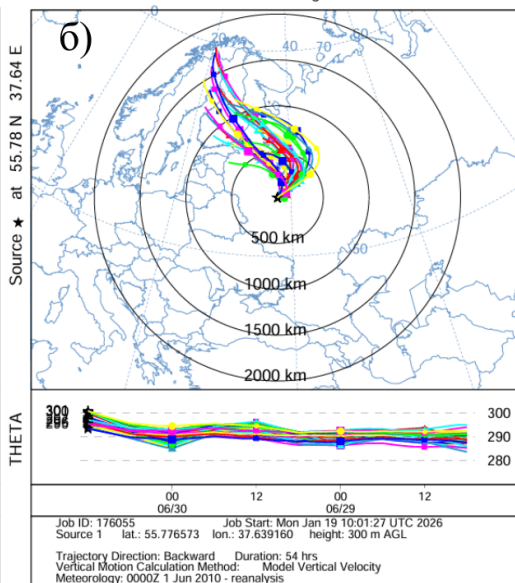
# Компоненты уравнения тенденции температуры (К/день) во время волны тепла 2010 г.



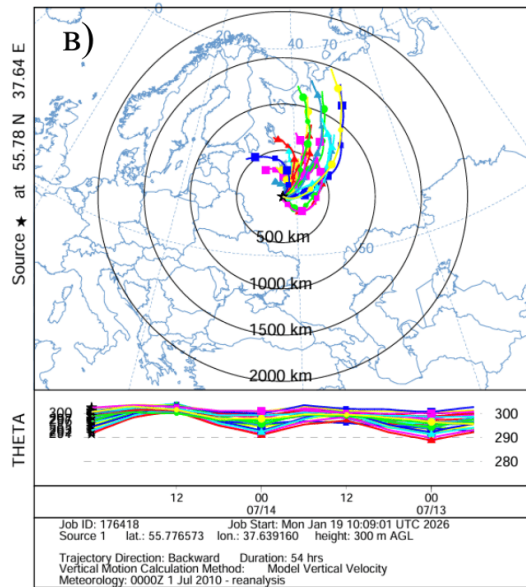
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1200 UTC 23 Jun 10  
CDC1 Meteorological Data



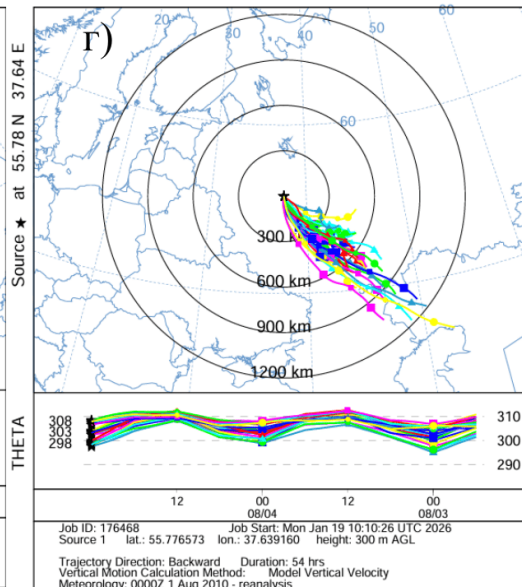
NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1200 UTC 30 Jun 10  
CDC1 Meteorological Data



NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 0000 UTC 15 Jul 10  
CDC1 Meteorological Data



NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 0000 UTC 05 Aug 10  
CDC1 Meteorological Data



Моргунова, Семенов, ФПК, на  
рецензировании

**Спасибо за внимание!**

