

# Глобальное потепление и аномальная погода начала XXI века

В.А. Семенов

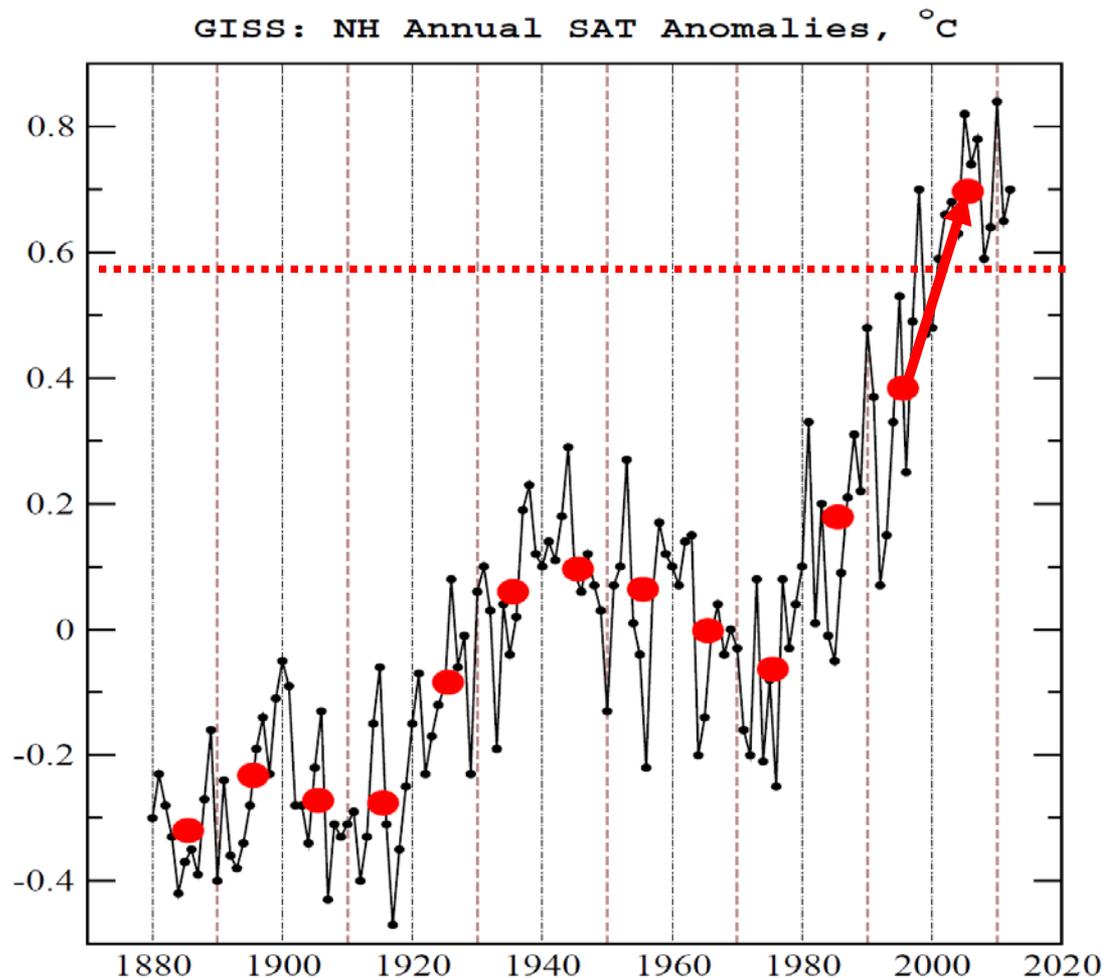
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

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

## Содержание

- Особенности глобального потепления последних десятилетий
- Что такое экстремальные явления и аномальная погода?
- Аномальная погода XXI века
- Связь глобального потепления с экстремальными явлениями
- Аномально холодные зимы
- Летние волны жары
- Наводнение в Крымске: пример перехода в новый динамический режим
- Выводы

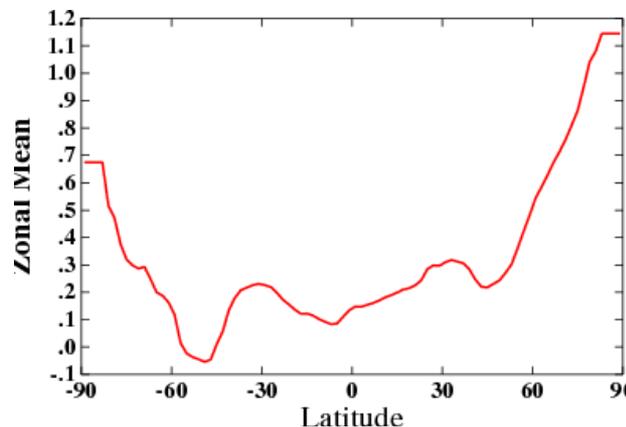
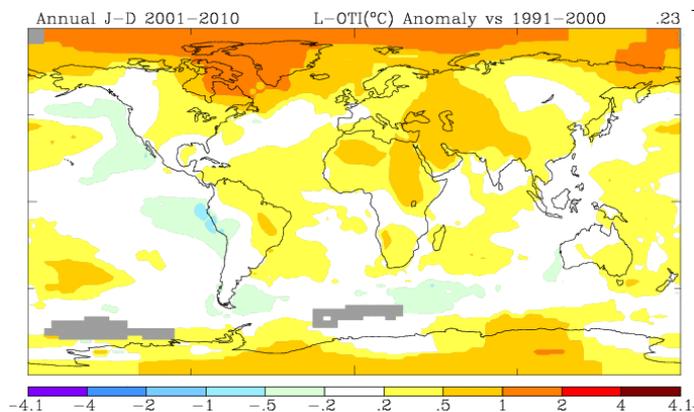
# Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры Северного полушария (°C) по данным GISS <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>



**Первое десятилетие 21 века самое теплое**

**Прирост температуры самый быстрый**

## Арктическое усиление: ускоренный рост температуры в высоких широтах СП

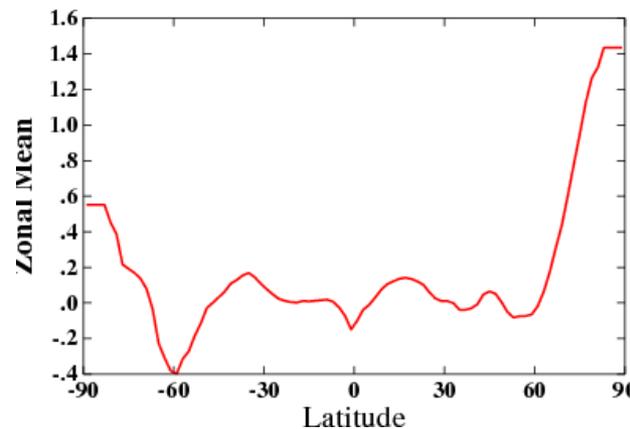
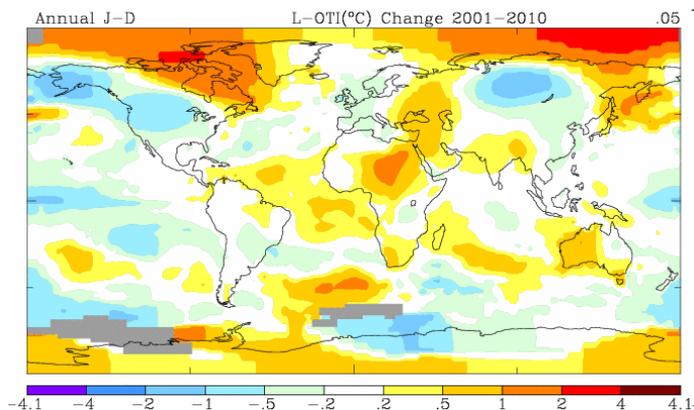


(2001-2010) –  
(1991-2000)

Гл.: 0.23

СП: 0.31

**Арк: 0.76**



**тренд**  
**2001-2010**

Гл.: 0.05

СП: 0.10

**Арк: 0.55**

В 21 веке глобальная температура не растет. **Арктика продолжает нагреваться!**

Терминология: экстремальные явления, аномальные явления, редкие явления

Что такое экстремальное событие (явление)?

Экстремальное событие - это событие, при котором величина характеристики климата (или погоды) находится выше (или ниже) определенного порога, лежащего на верхнем (или нижнем) краю диапазона изменений этой характеристики.

(Special Report on Extreme Events, IPCC, 2012)

Экстремальные события происходят редко, но редкие события не обязательно являются экстремальными

~~$T = \pi \text{ } ^\circ\text{C}$  Суточный ход температуры  $= \theta \text{ } ^\circ\text{C}$~~  редкие но не экстремальные события

Аномальное событие – это экстремальное событие в рамках некоторого выбранного периода времени

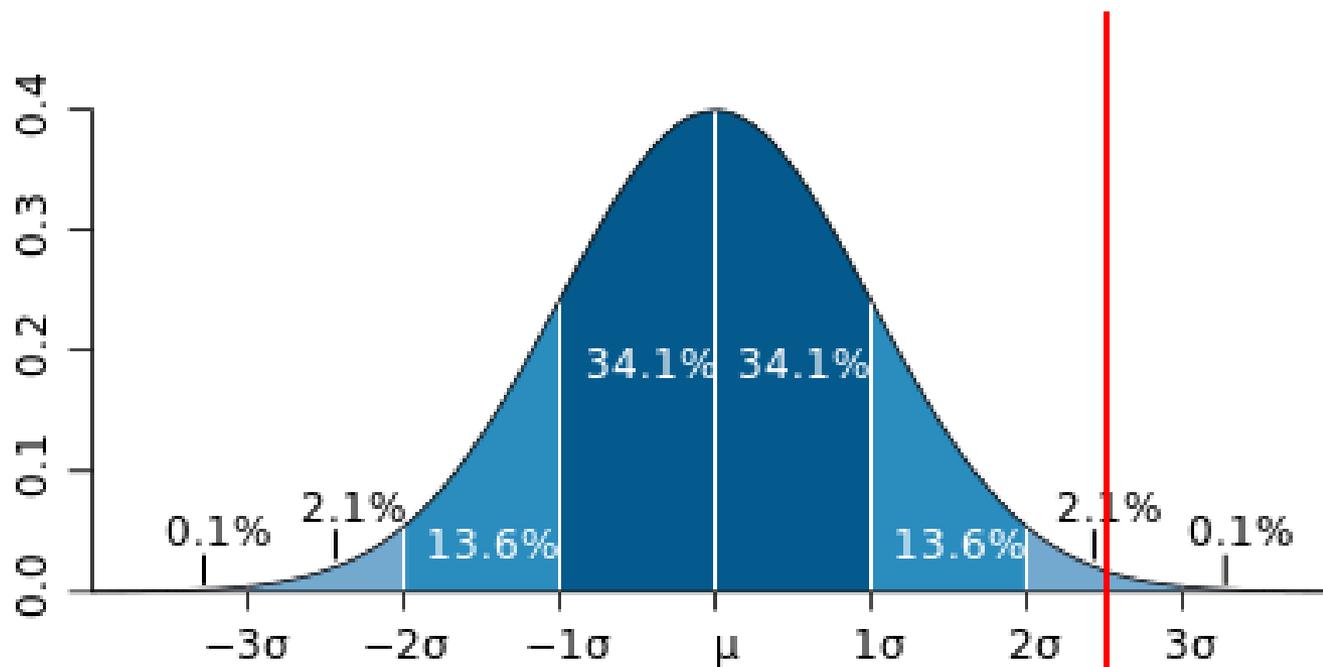
В отличие от экстремального события, которое определяется на основе наиболее репрезентативной выборки данных, аномальное событие считается относительно любой выборки, которую мы хотим использовать для некоего климатического периода

Точного определения экстремального события нет. Различия в формулировках, в том числе, связаны с вероятностным или пороговым определением, связи с последствиями экстремального явления.

Экстремальное событие:

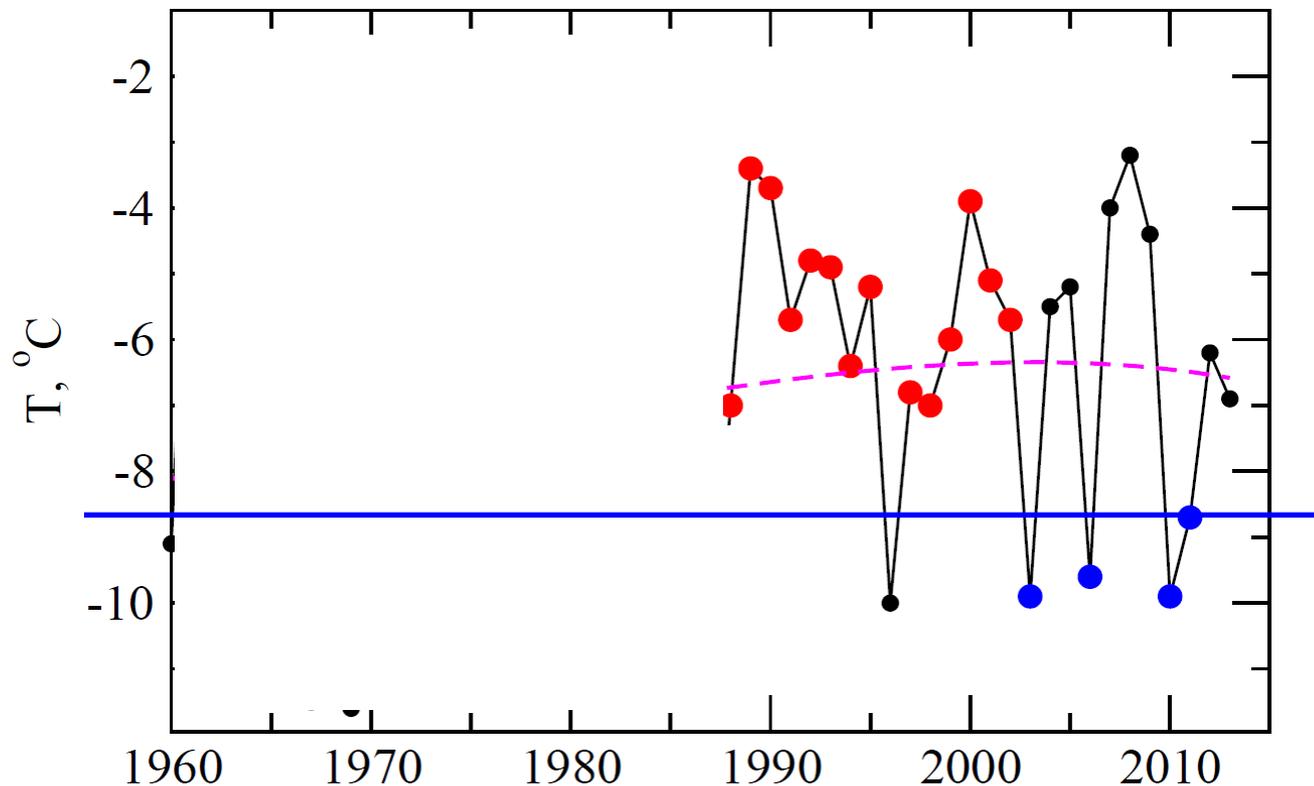
Не событие с вероятностью реализации 10%

Обычно, это событие с вероятностью не более 1%



# Аномальные и экстремальные события

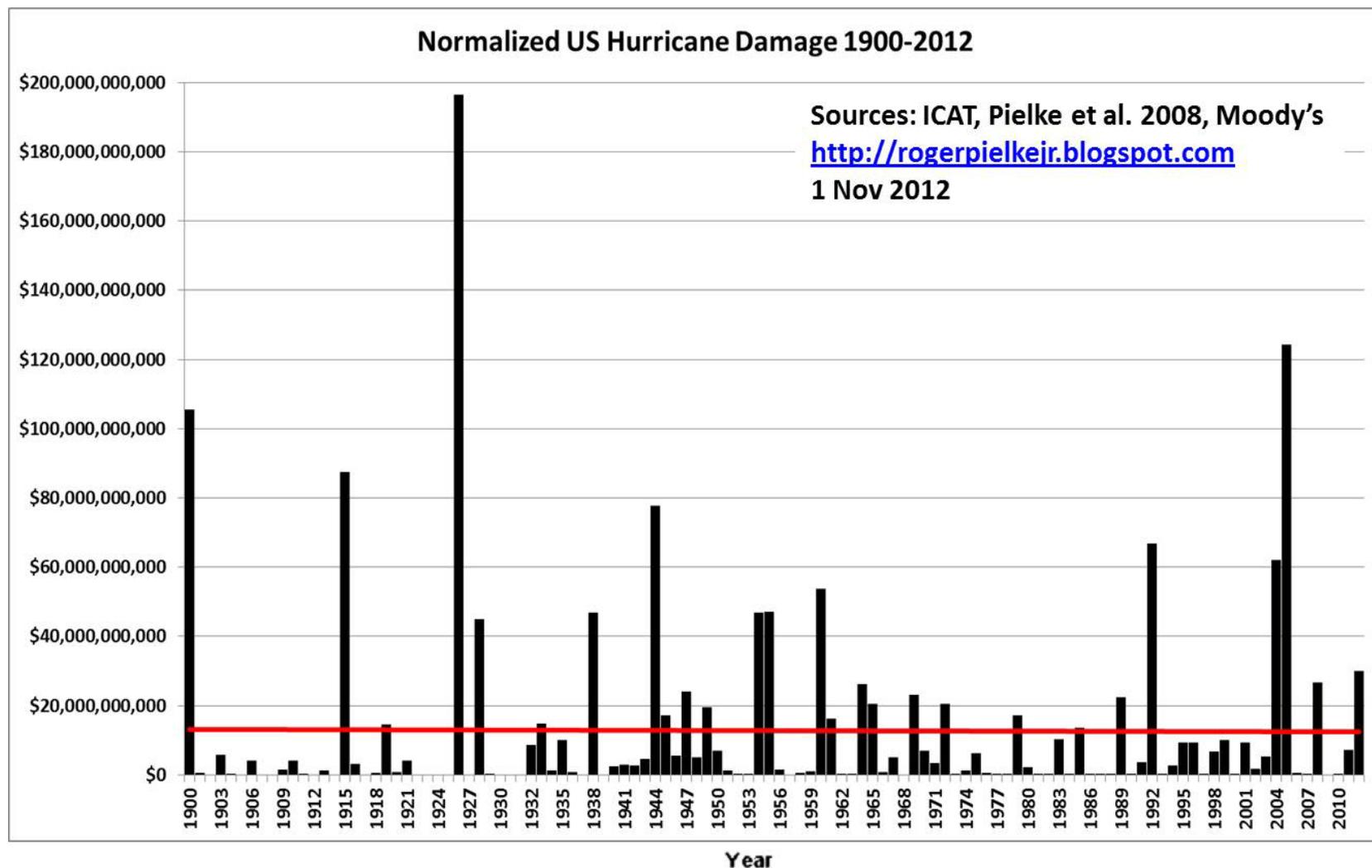
Температура зимой в Москве, °C



# Концепция взаимосвязи риска природных бедствий, их последствий для общества, адаптации и управления риском (IPCC SREX)



## Ущерб от ураганов на восточном побережье США



# Аномальная погода 21 века (на территории Евразии)

## Аномалии температуры

2003 - самое жаркое лето (за 500 лет) в Западной Европе

2007 - самое жаркое лето в Греции (с 1891 г.)

2010 - самое жаркое лето в европейской части России (за 500 лет)

«Холодные зимы 21 века» 2005/6 – во многих регионах Европы и России рекордно холодные зимы с 1970-х гг., 2009/10 – самая холодная зима в Британии с 1981 г., 2010/11 – самый холодный декабрь в Британии с 1910 г....

## Аномалии гидрологического цикла

2000 - Англия и Уэльс – самая влажная осень с 1766 г.

2002 – самое большое значение ежедневных осадков в Германии с 1901 г., наводнения в Дрездене и Праге

2010 – рекордные значения осадков и наводнение в Пакистане

2013 – наводнение на Амуре

2012 – экстремальные осадки (макс. с 1931 г.) и наводнение в Крымске

2013 – наводнение в Чехии и на юге Германии

2014 – наводнение в Сербии и Болгарии

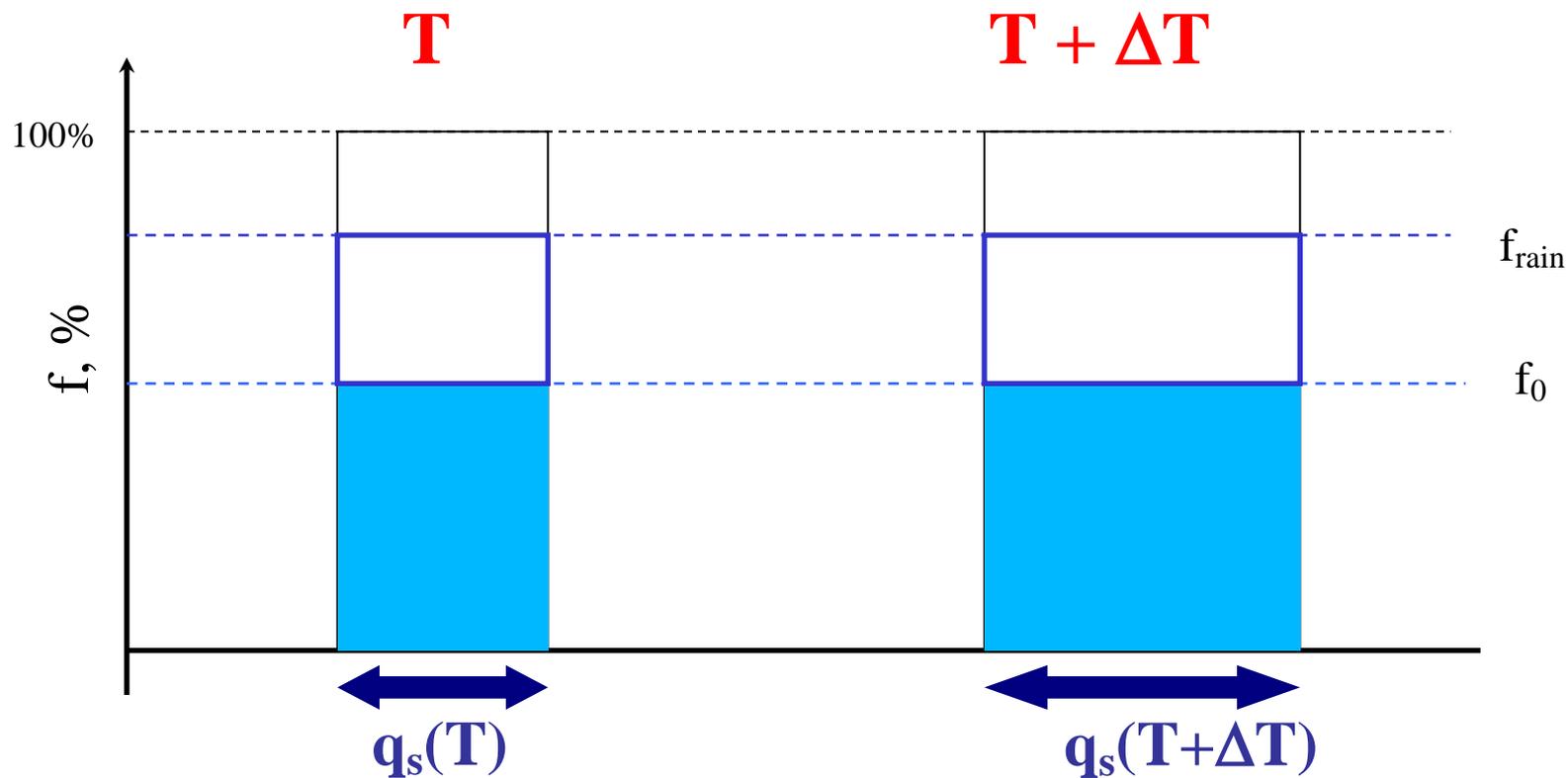
## Вихревая активность

Циклоническая активность

Торнадо

# Как глобальное потепление может влиять на частоту и магнитуду экстремальных явлений?

## Осадки



$q_s(T) \sim \exp(-C/T)$ , примерно 7% на  $1^\circ\text{C}$

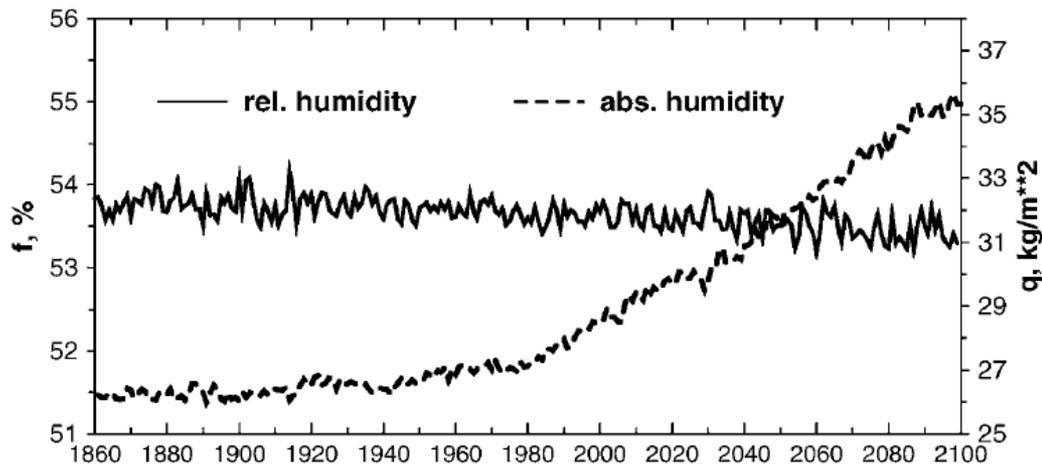
# Как глобальное потепление может влиять на частоту и магнитуду экстремальных явлений?

## Осадки

Потепление = увеличение испарения и абсолютной влажности насыщения

При потеплении должна увеличиваться интенсивность осадков  
– количество осадков во время дождя

Абсолютная и относительная влажность в климатической модели в эксперименте с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере (*Semenov and Bengtsson 2002*)

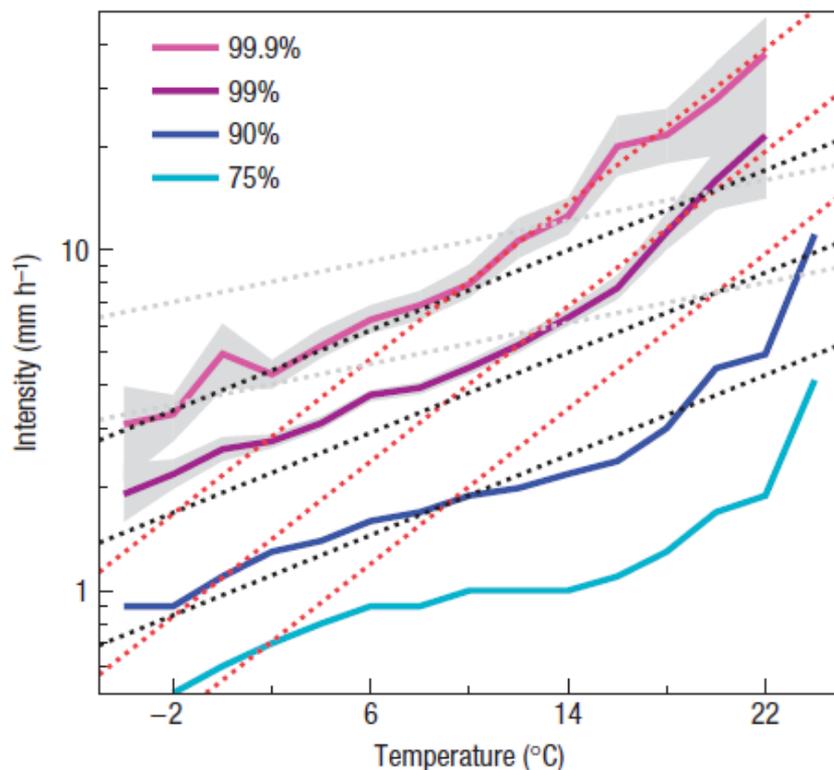


**Насколько  
быстро растет  
интенсивность  
экстремальных  
осадков?**

# Как глобальное потепление может влиять на частоту и магнитуду экстремальных явлений?

## Осадки

Интенсивность конвективных осадков растет с температурой быстрее, чем влажность насыщения

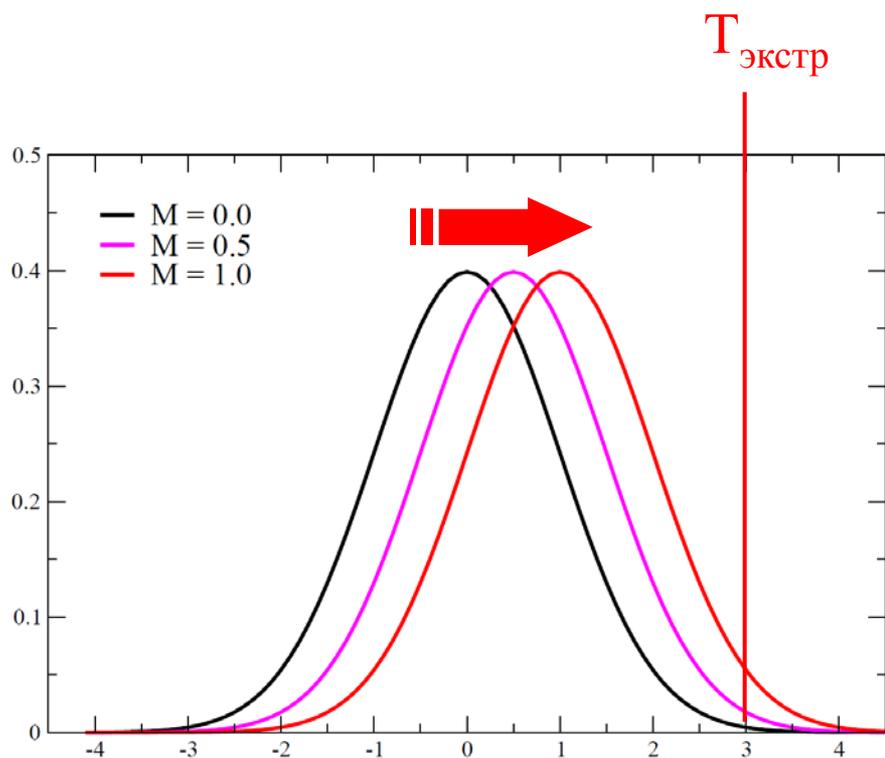


Зависимость интенсивности часовых осадков для различных перцентилей от температуры (Lenderink and Meijgaard 2008; Berg et al. 2013)

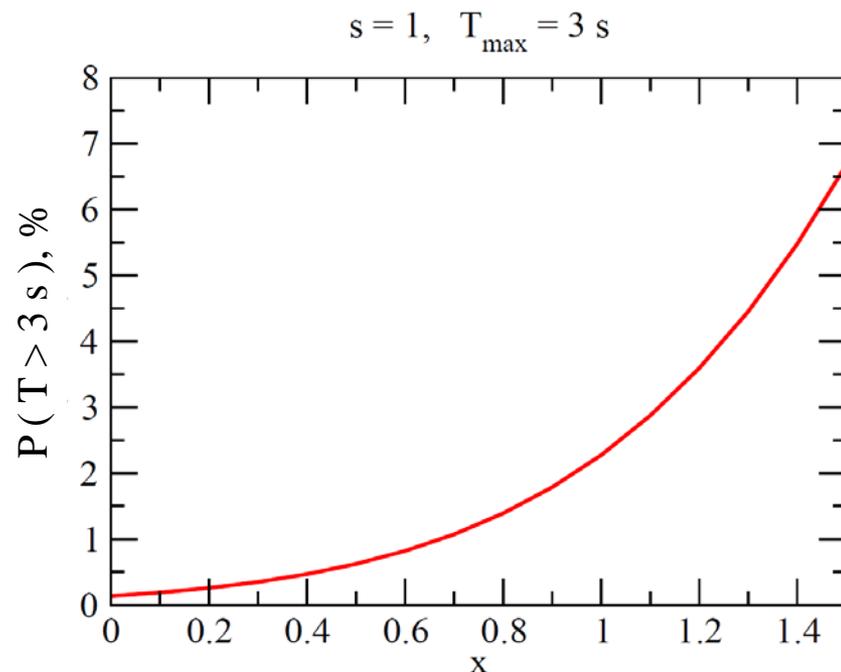
**Причина –  
«динамические факторы»**

# Как глобальное потепление может влиять на частоту и магнитуду экстремальных явлений?

## Температура



Увеличение вероятности превышения  $T = 3$  s при увеличении средней т-ры на  $x$

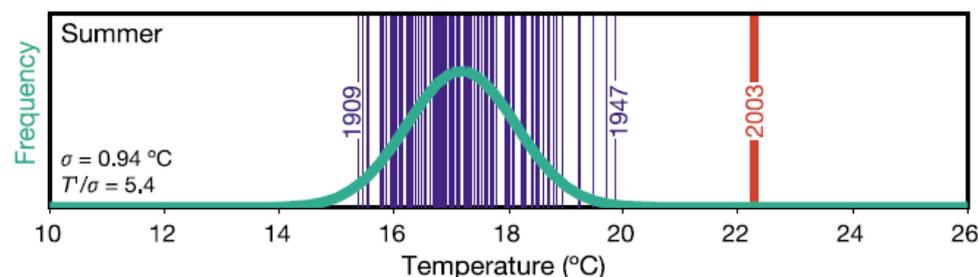


Даже при неизменной изменчивости, увеличение средней температуры приводит к нелинейному увеличению вероятности превышения экстремальных пороговых значений

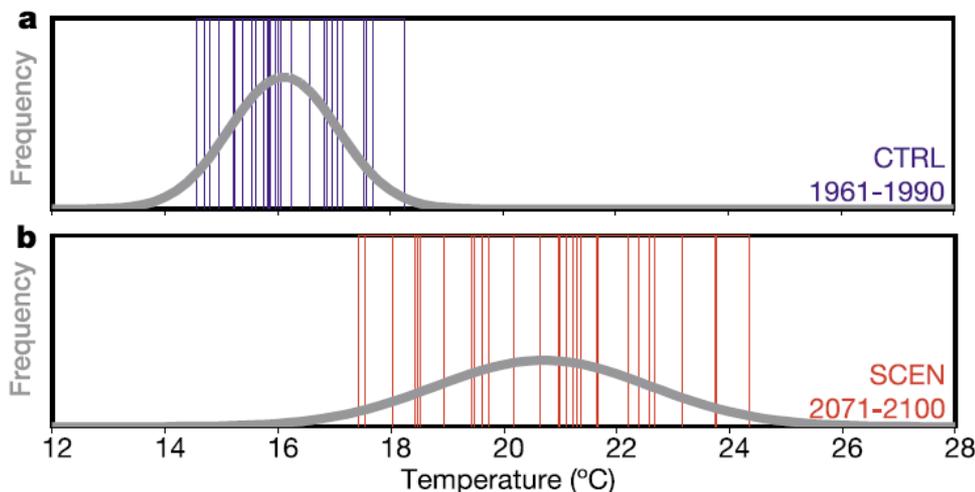
# Как глобальное потепление может влиять на частоту и магнитуду экстремальных явлений?

## Температура

Schaer et al. 2004: при потеплении может расти изменчивость температуры



Вероятность волна тепла в Европе в 2003 году ничтожно мала



Региональная модель климата показывает значительное увеличение изменчивости летней т-ры в Европе при увеличении средней т-ры

**Причина –  
«динамические факторы»**

- Увеличение средней температуры должно в целом приводить к увеличению вероятности экстремально высоких температур

Сдвиг функции плотности вероятности не может объяснить наблюдавшиеся в 21 веке волны жары

Почему увеличилась вероятность аномально холодных зим?

- Потепление, увеличение испарения и «влагоемкости» атмосферы должны приводить в целом к росту интенсивности осадков

Величина экстремальных осадков во многих регионах растет с потеплением быстрее, чем рост в соответствии с зависимостью Клапейрона-Клаузиуса

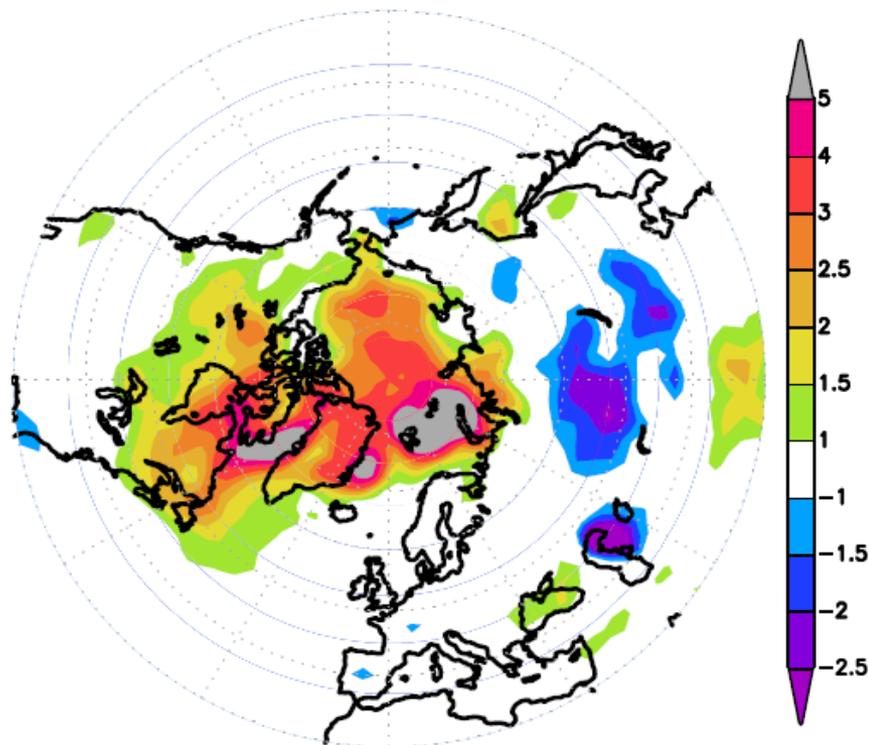
# Аномально холодные зимы 21 века

period	Hamburg “cold yrs” < 0 °C		Moscow “cold yrs” < -8 °C	
	N	Prob.	N	Prob.
1950-1987	11	0.29	18	0.47
1988-2002	1	0.07	1	0.07
2003-2013	3	0.21	4	0.36

## Аномально холодные зимы 21 века

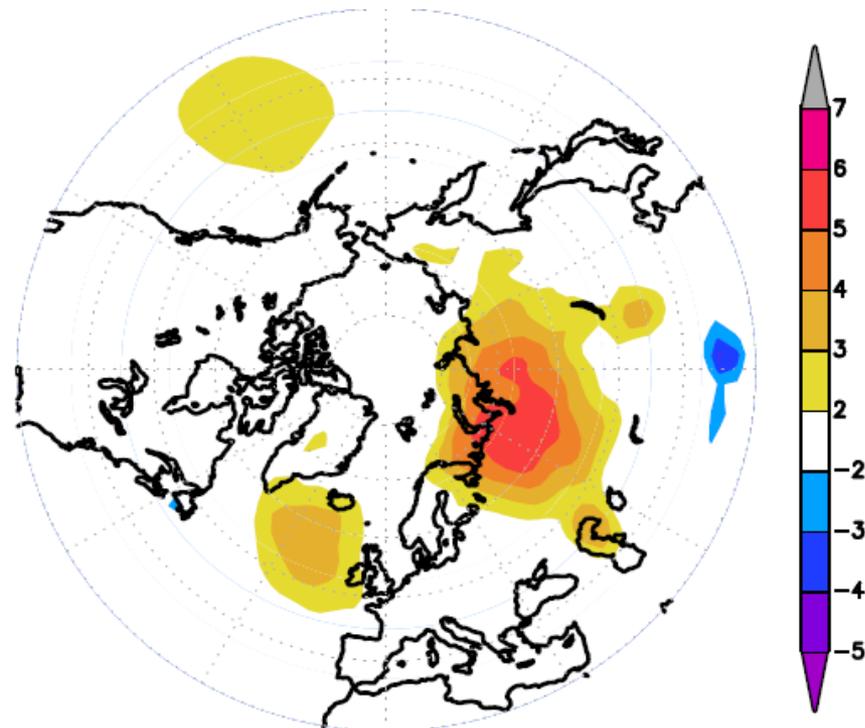
Зимние аномалии т-ры и давления воздуха для периода 2005-2012  
(данные реанализа NCEP)

T, °C



**“Hot Arctic – Cold Continent”**

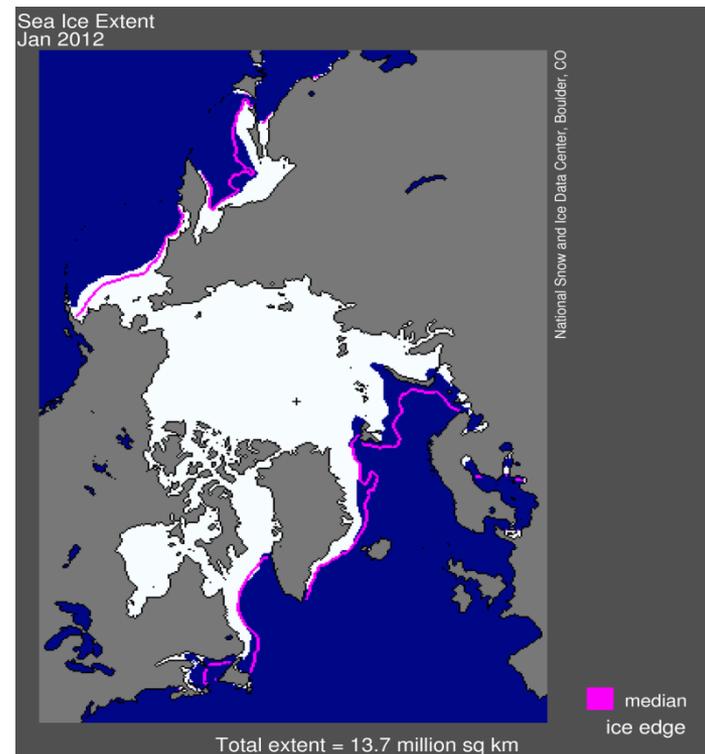
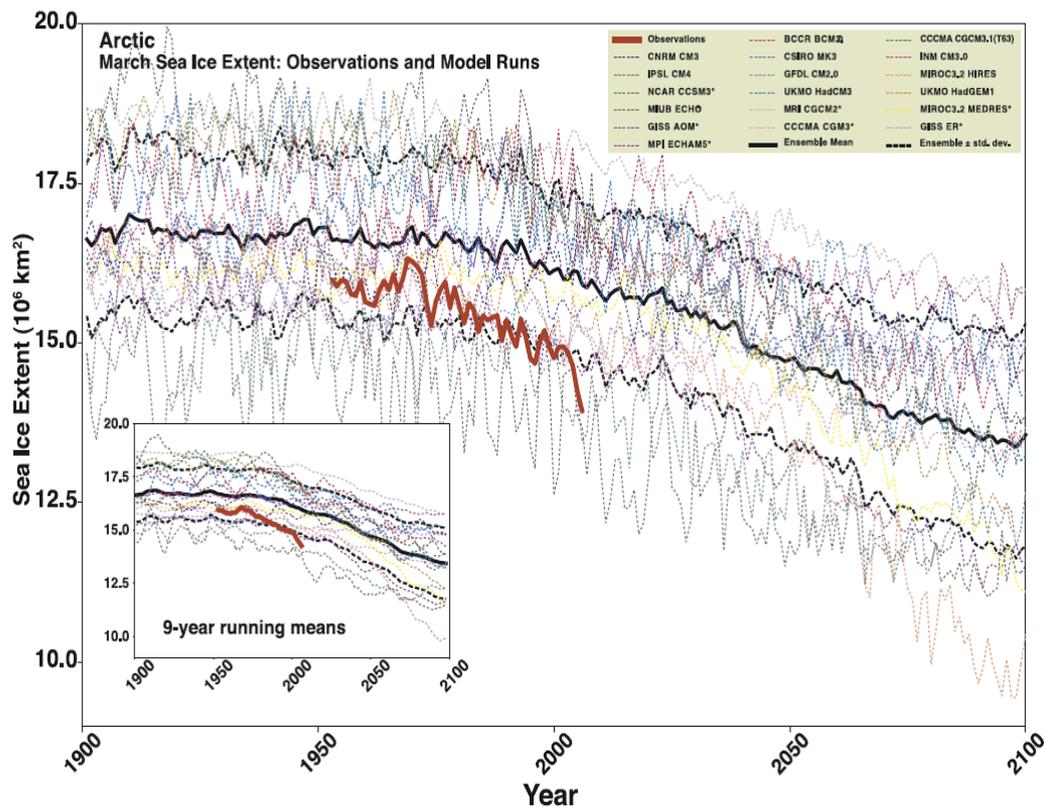
P, hPa



**“Barents Anti-cyclone”**

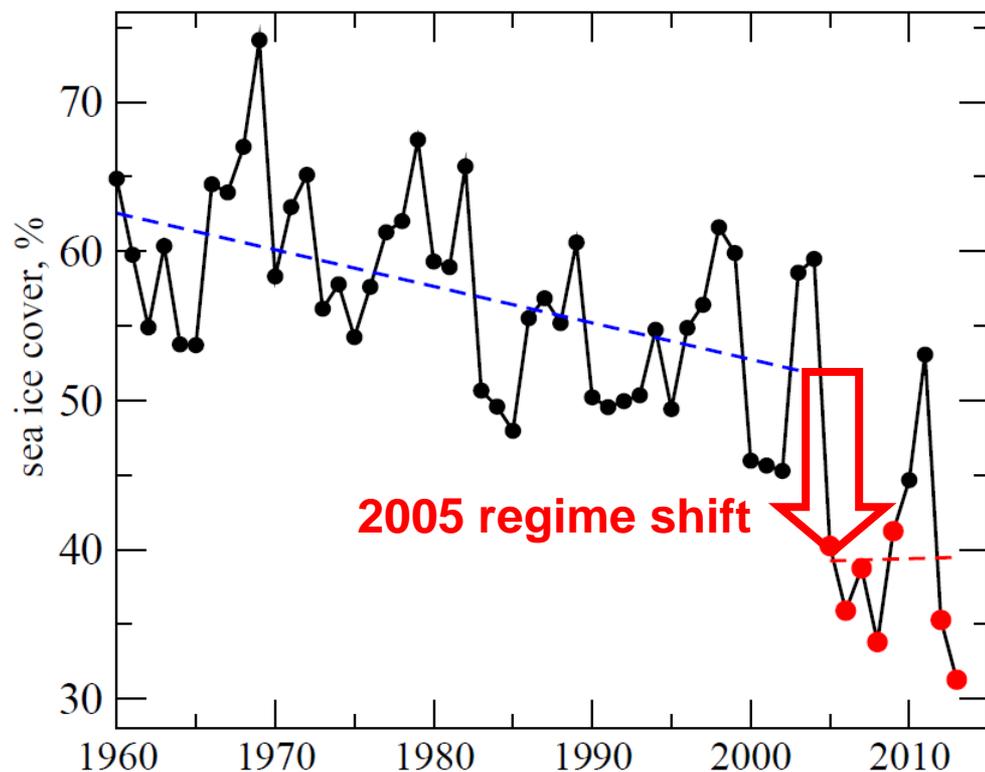
# Аномально холодные зимы 21 века Изменения морских льдов в Арктике

Площадь морских льдов в марте: наблюдения и модели (Stroeve et al. 2007)



## Аномально холодные зимы 21 века

Доля покрытия Баренцева моря морским льдом зимой (%)



**Если связь между резким уменьшением ледовитости и аномально холодными морозами?**

## Аномально холодные зимы 21 века

### ECHAM5 AGCM

6 x 100 yr simulations

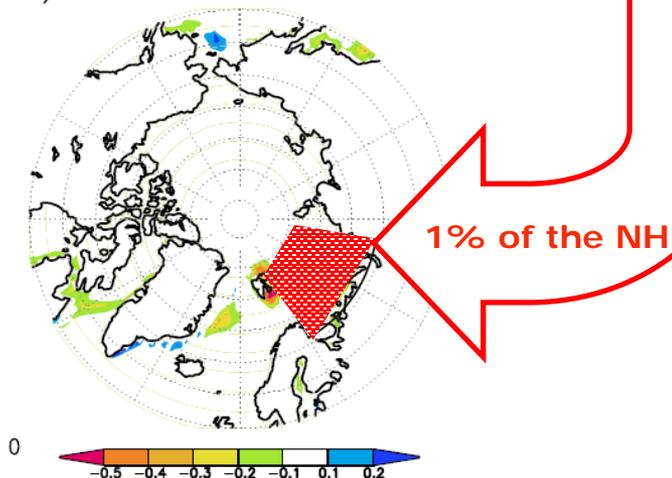
Same boundary forcing (SST/SIC)  
**except for Barents and Kara Seas**  
(see the sector), where the SIC In  
wintertime (Nov-Apr) set to

1%,20%,40%,60%,80%,100%

*(Petoukhov and Semenov 2010)*

ECHAM5 results: winter **SAT** in  
**Eastern Europe** and **SLP** over the  
**Barents Sea** as a function of Barents  
SIC

f) ice anom. 2006–2007

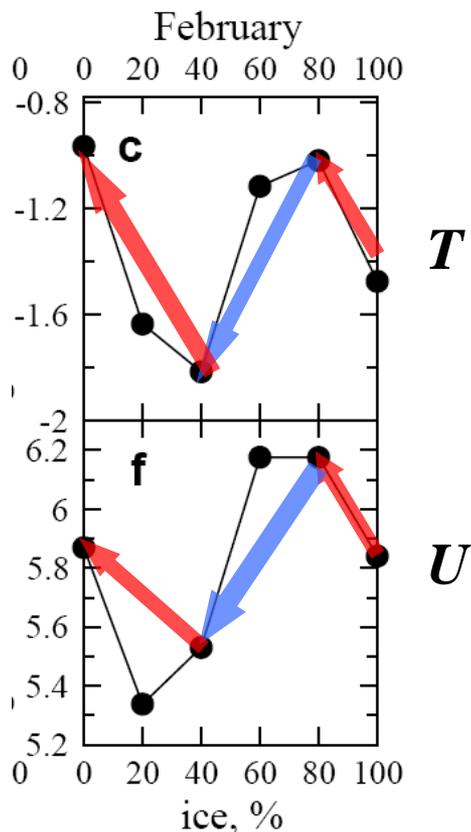


**Нелинейный отклик атмосферной циркуляции  
на уменьшение КМЛ**

# Аномально холодные зимы 21 века

## Нелинейный отклик в модельных экспериментах

Европа (10-30E, 45-55N)



ice decreases

SAT  
wind  
Z850

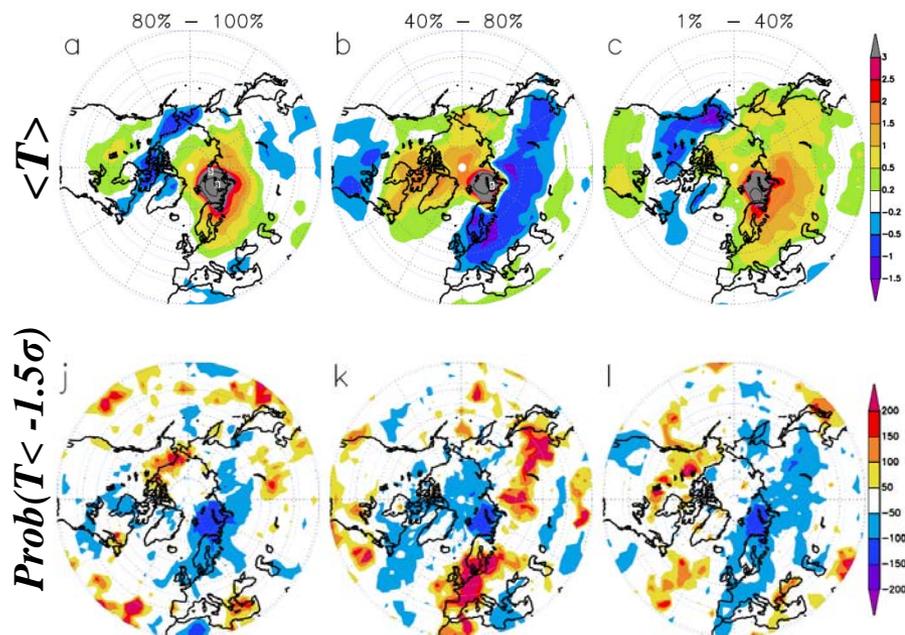
ice decreases

# Аномально холодные зимы 21 века

## Нелинейный отклик в модельных экспериментах

Вместе с небольшими изменениями средней температуры, вероятность аномально низких ( $T < -1.5\sigma$ ) значений увеличивается более чем в 3 раза

Положительная (антициклоническая) аномалия давления при определенной величине уменьшения площади льда

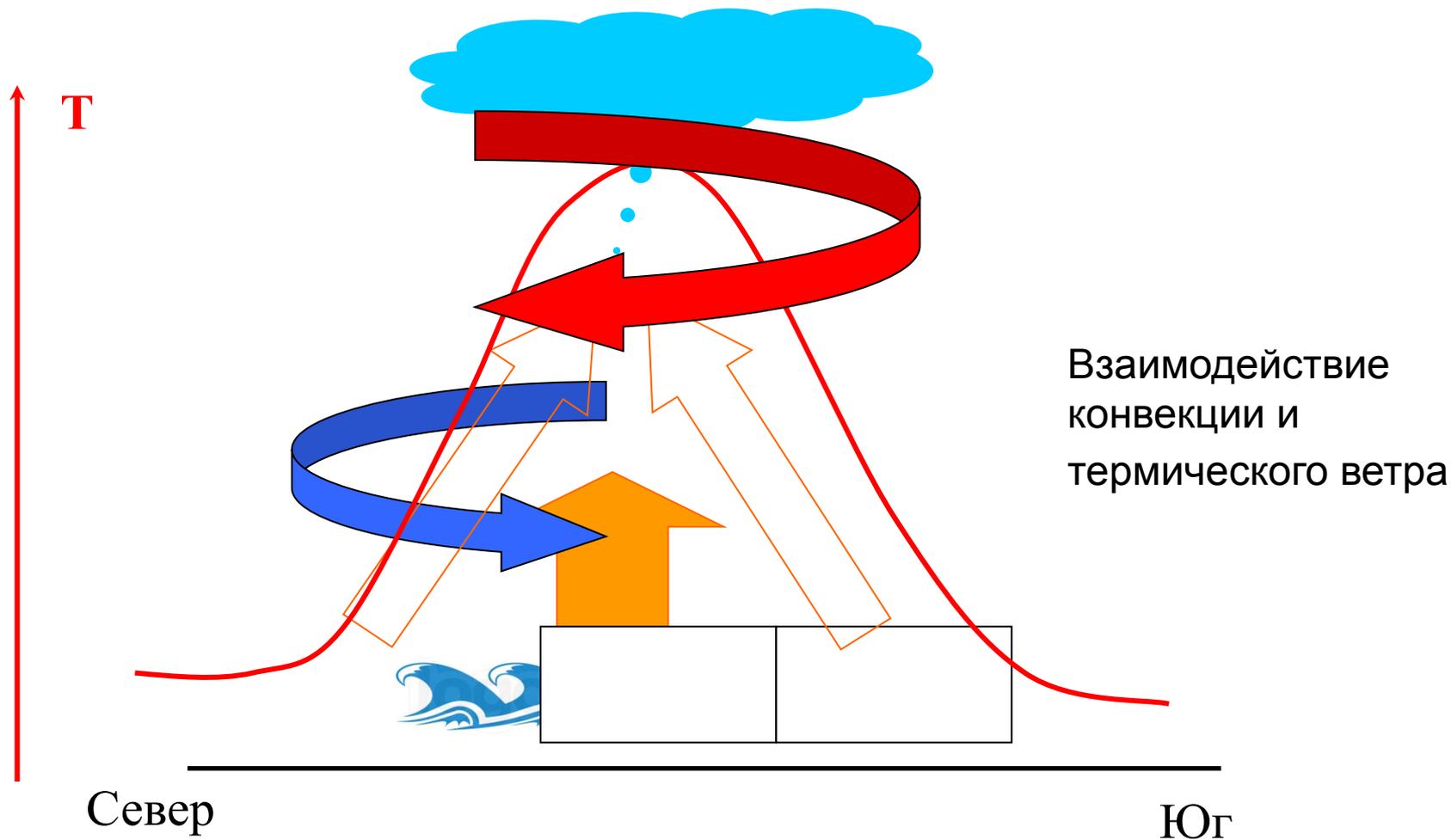


ice decreases

ice decreases

# Аномально холодные зимы 21 века

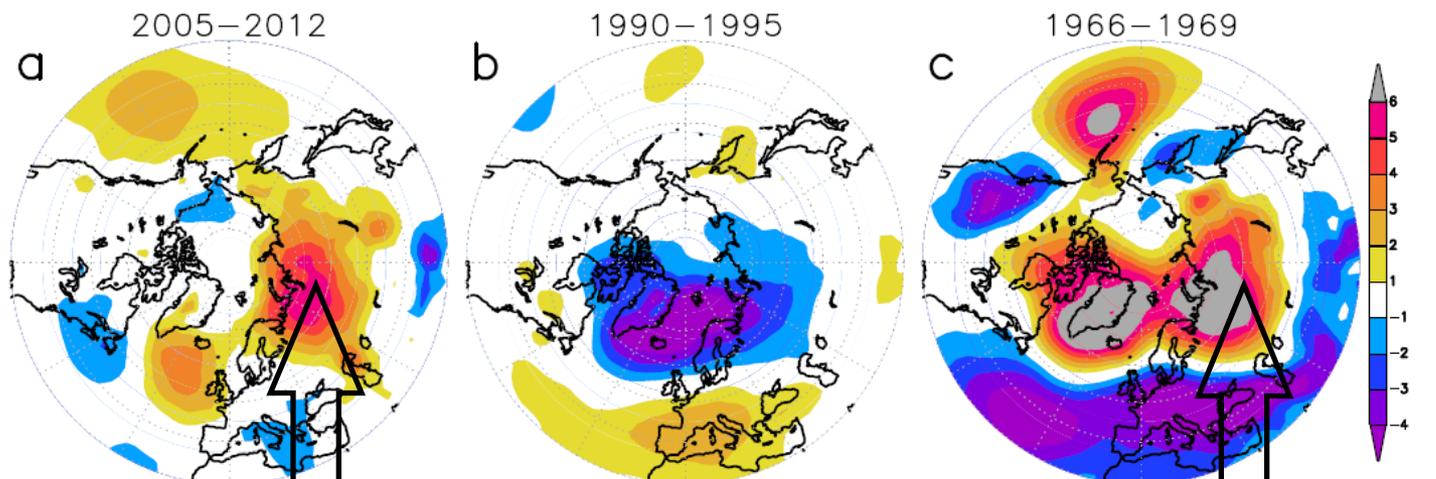
## Механизм нелинейного отклика



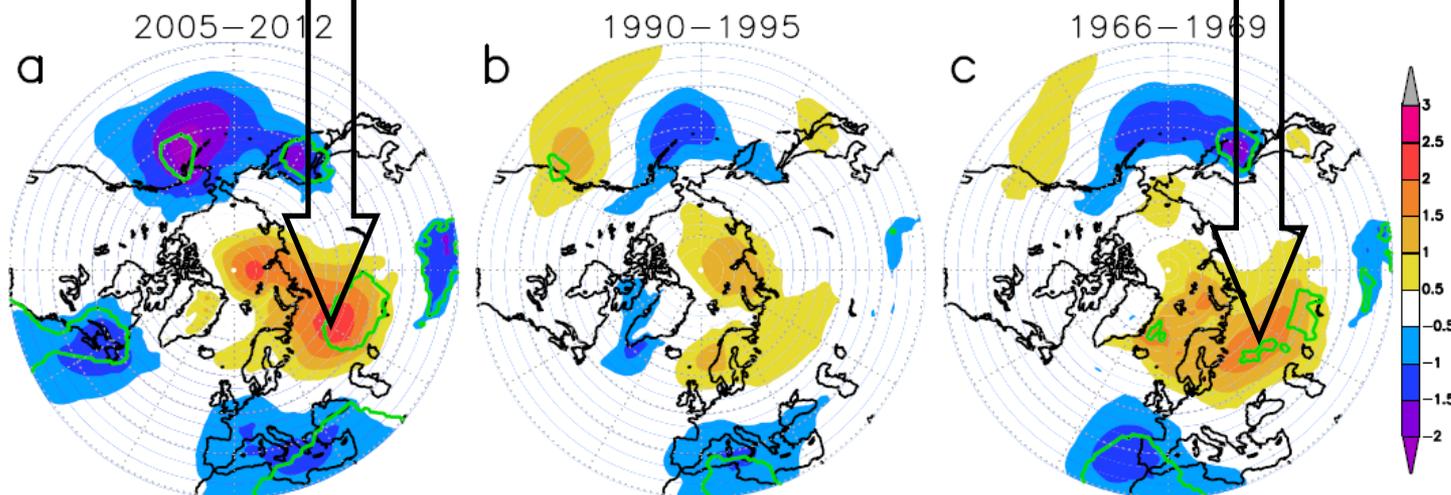
# Аномально холодные зимы 21 века

## Эксперименты с реалистичными аномалиями КМЛ

**NCEP**



**MODEL**



*Semenov and Latif, in prep.*

Модели общей циркуляции атмосферы способны воспроизводить похолодание над Евразией при заданной отрицательной аномалии площади морского льда в Арктике в зимний период

Отклик атмосферной циркуляции НЕЛИНЕЕН!

Механизм такого отклика может быть связан с региональным взаимодействием конвекции над источником тепла и эффекта термического ветра вследствие сильных изменений градиентов температуры

Другие возможные механизмы (*Cohen et al.* 2014):

Шторм треки

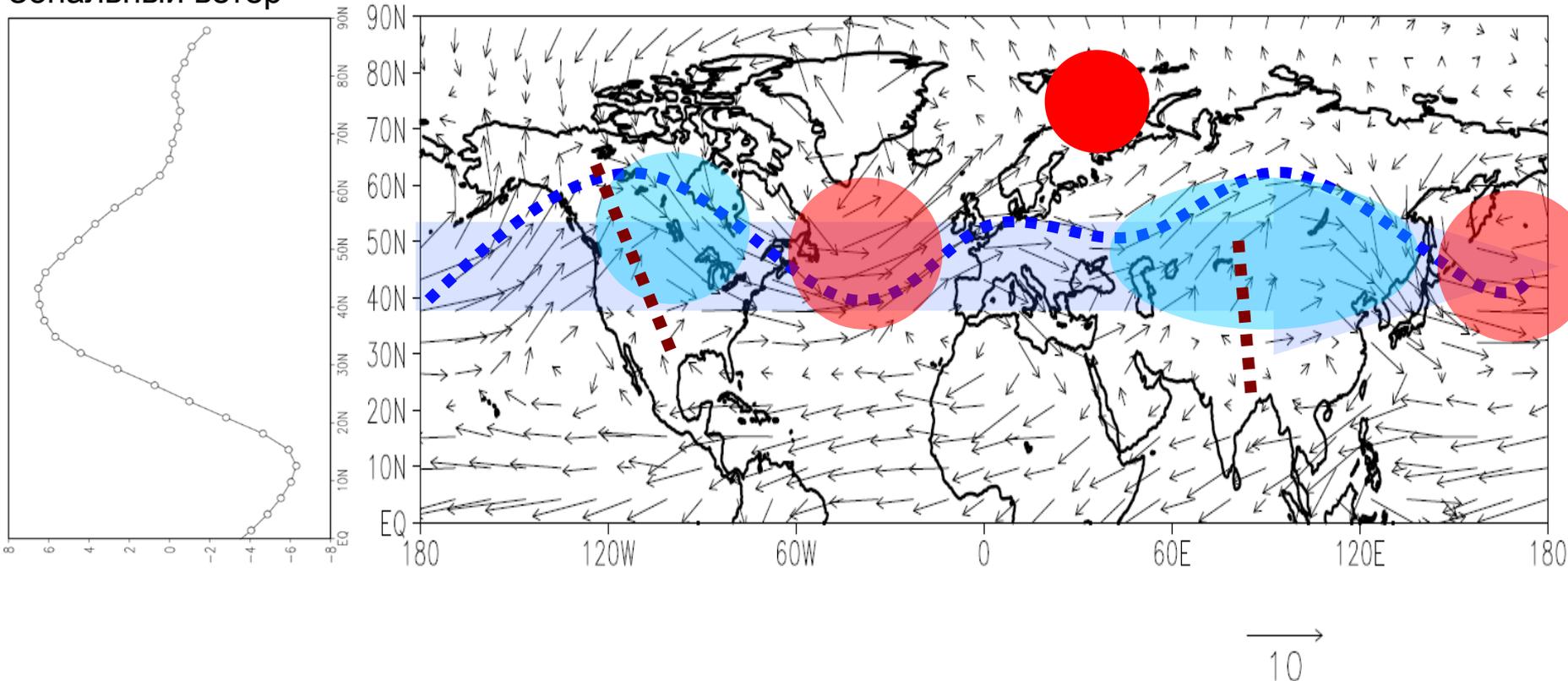
Струйное течение

Планетарные волны

Хороший обзор: *Vihma* 2014, *Surv. Geoph.*

## Атмосферная циркуляция в Северном полушарии

Зональный ветер



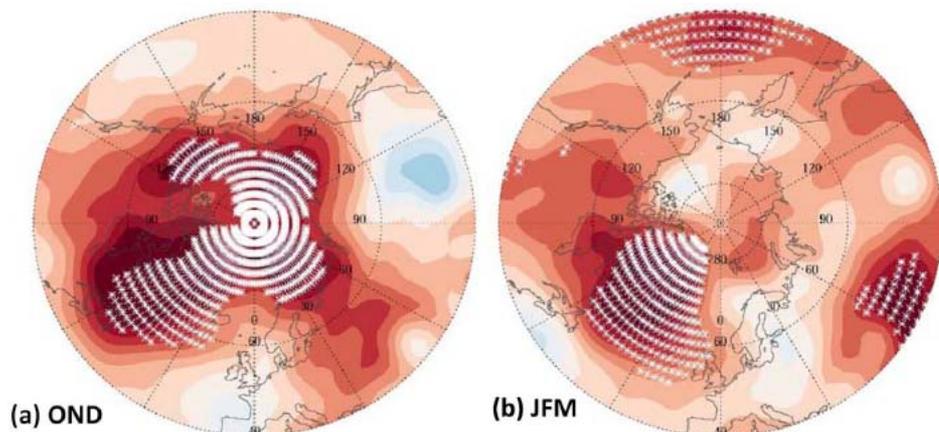
Важнейшая черта атмосферной циркуляции в средних широтах: интенсивный западный перенос + стационарные и распространяющиеся планетарные волны

# Атмосферная циркуляция в Северном полушарии

## Evidence Linking Arctic Amplification to Extreme Weather in Mid-Latitudes

Jennifer A. Francis, Institute of Marine and Coastal Sciences, Rutgers University

Stephen J. Vavrus, Center for Climatic Research, University of Wisconsin

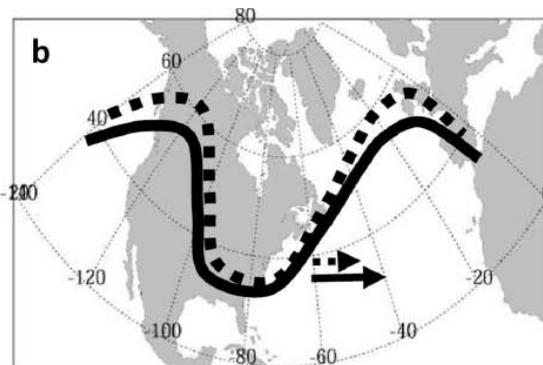
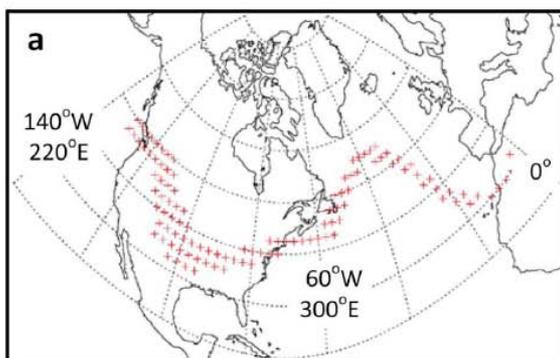
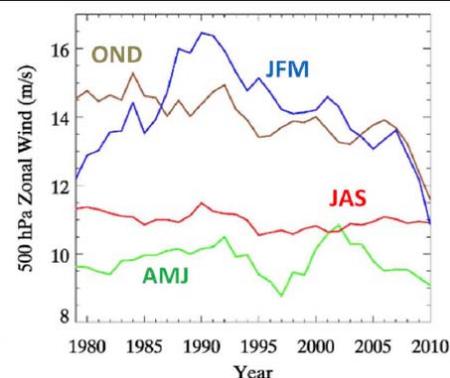
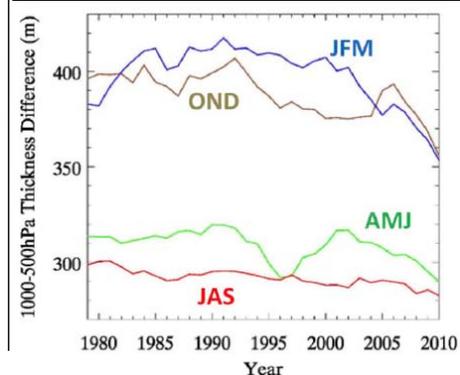


(a) OND

(b) JFM

Нагрев нижней тропосферы

Замедление зонального потока



Растягивание гребней волн

Циркуляция становится более меридиональной, что приводит к устойчивым погодным режимам и росту погодных аномалий

## Стационарирование волн Россби

Фазовая скорость волн Россби  $C$  (направленная на запад) сравнивается со скоростью зонального потока  $U_z$  (направленного на восток)

$$C \sim U_z$$

$$U_R = \beta / \kappa^2 ;$$

$\beta = 2 \Omega \cos \varphi / R$  параметр Россби,

$\kappa = 2\pi / \lambda$  зональное волновое число;  $\lambda = 2R/\cos \varphi$  длина волны

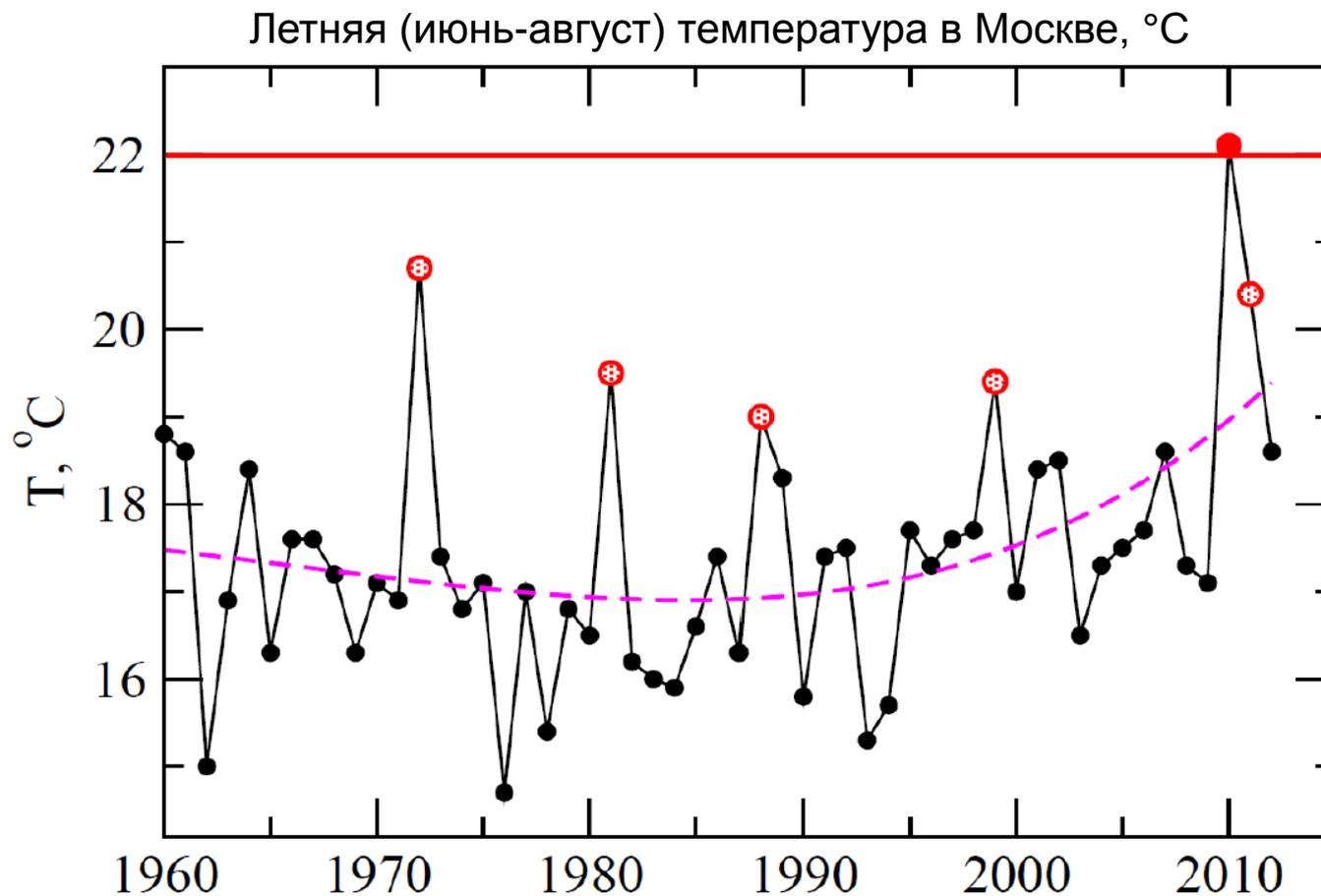
$C = 2 \Omega R \cos^3 \varphi / m^2$   $m$  – число волн вдоль широтного круга

**Ослабление зонального потока означает возможность стационарирования волн Россби с большим волновым числом (5-8) – синоптических волн**

*Агаян и Мохов 1989, Мохов и Петухов 1997*

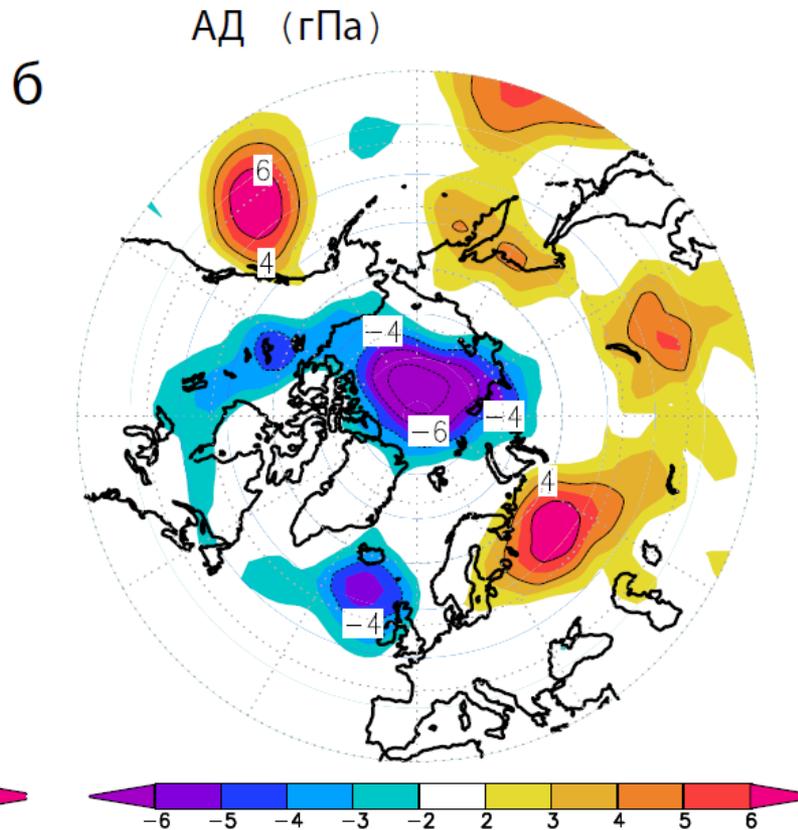
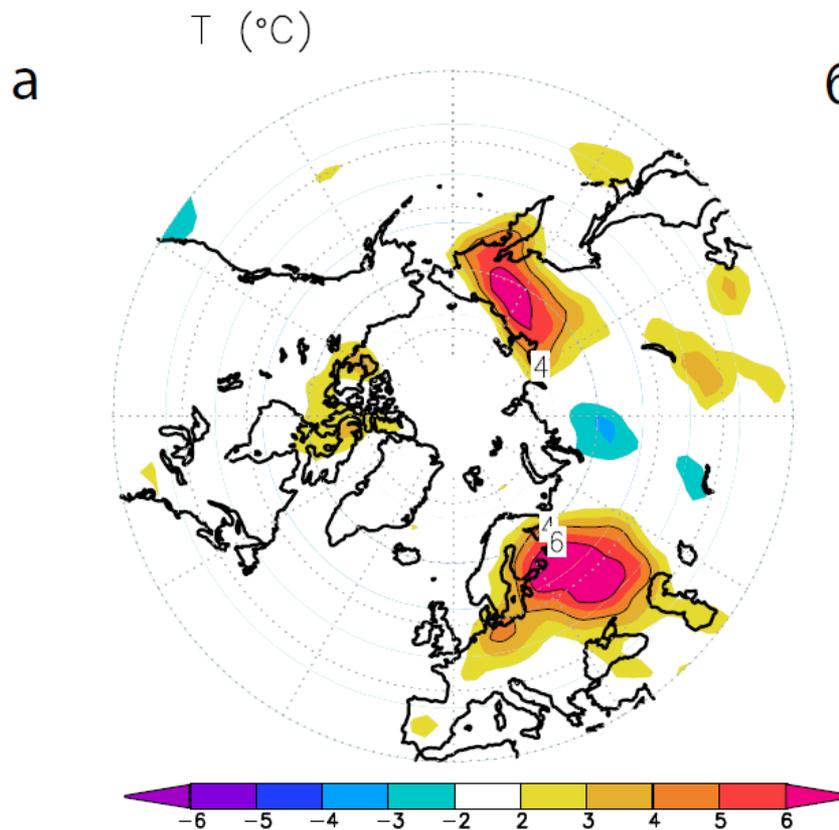
## Летние волны жары (московская жара 2010 г.)

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



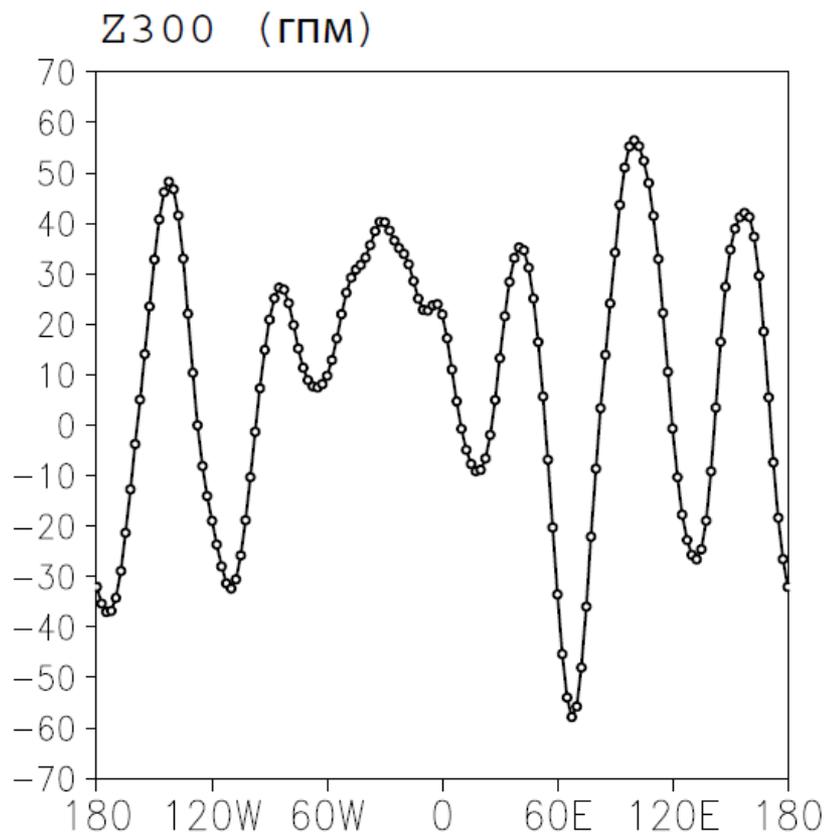
## Летние волны жары (московская жара 2010 г.)

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

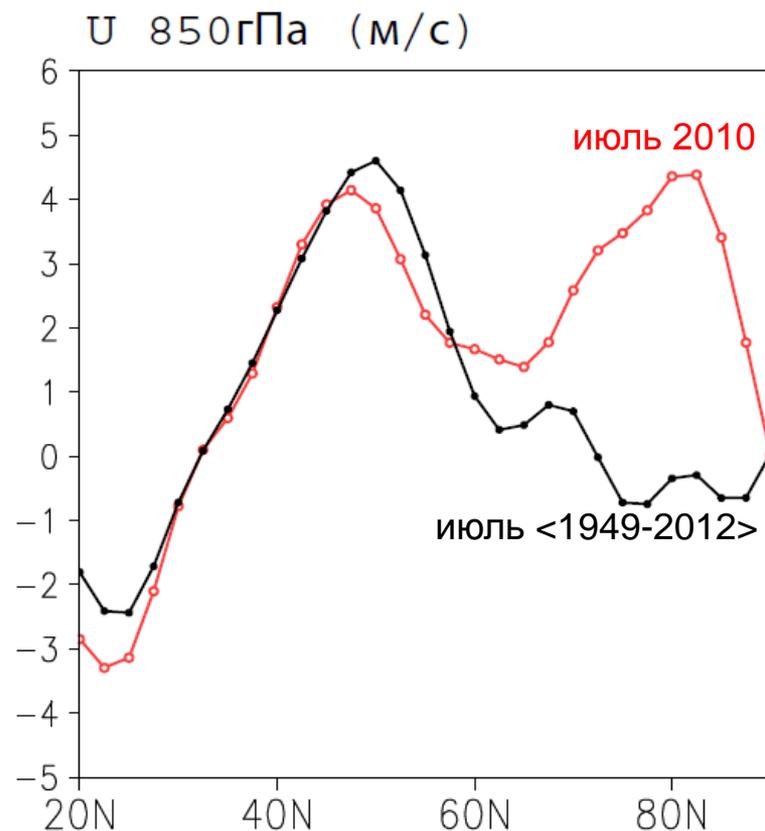


## Летние волны жары (московская жара 2010 г.)

Стационарная волна  $m=6(7)$



Бимодальное распределение  
зональной скорости

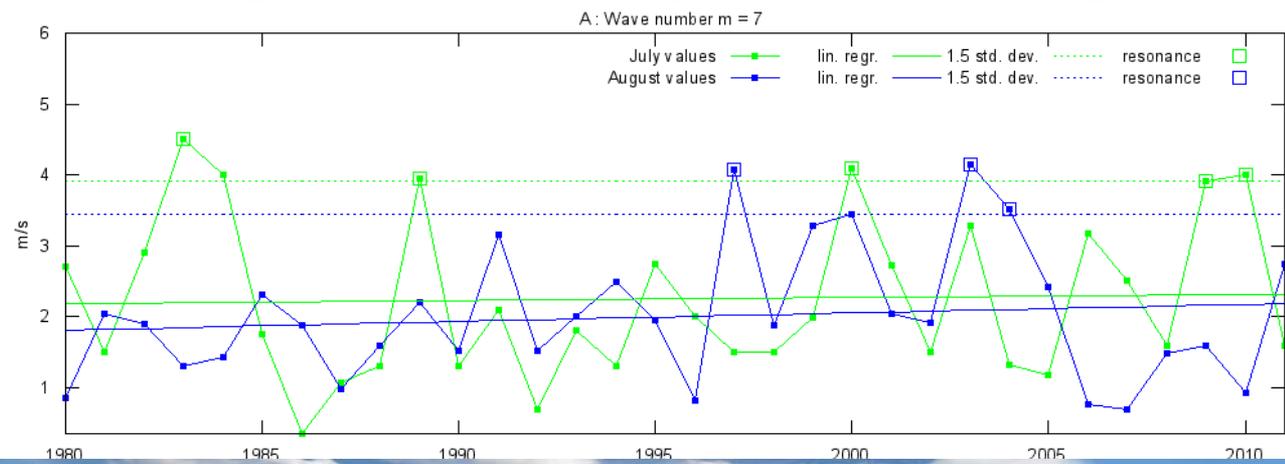
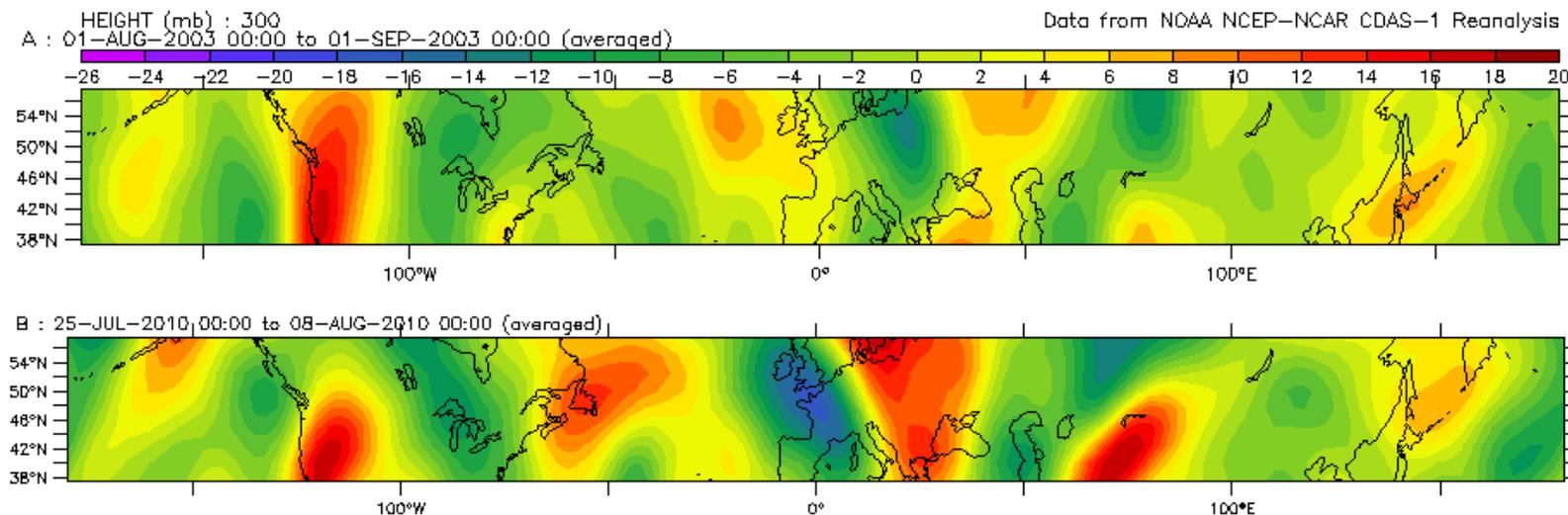


Семенов 2013

# Летние волны жары: пространственный резонанс

*Petoukhov et al. 2012, PNAS*

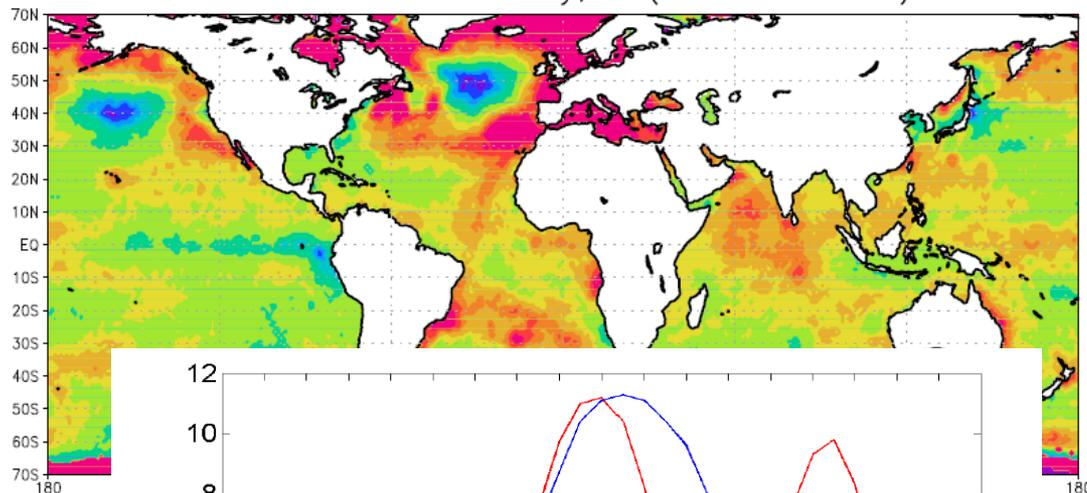
Аномалии геопотенциала на 300 гПа: стационарная волна 7(6) patterns в 2003 и 2010 гг.



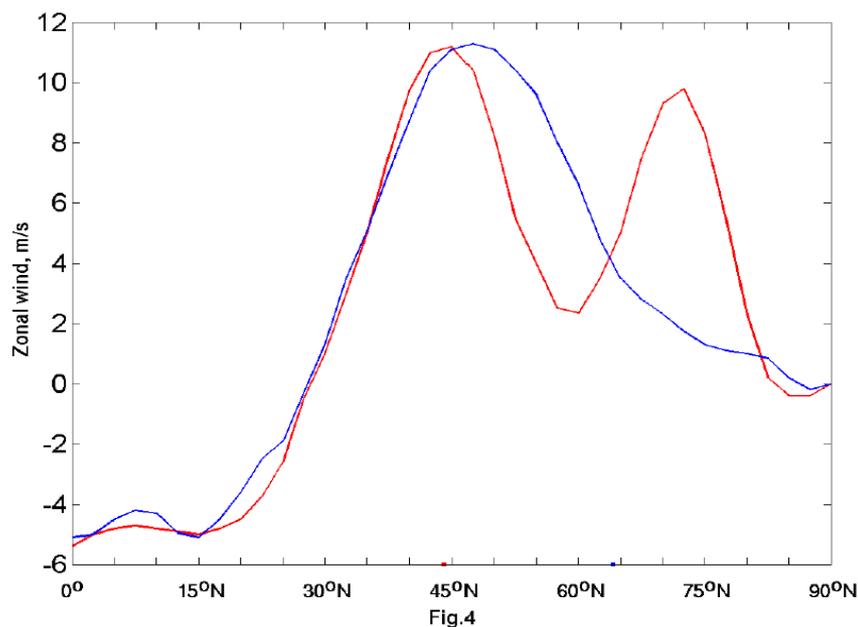
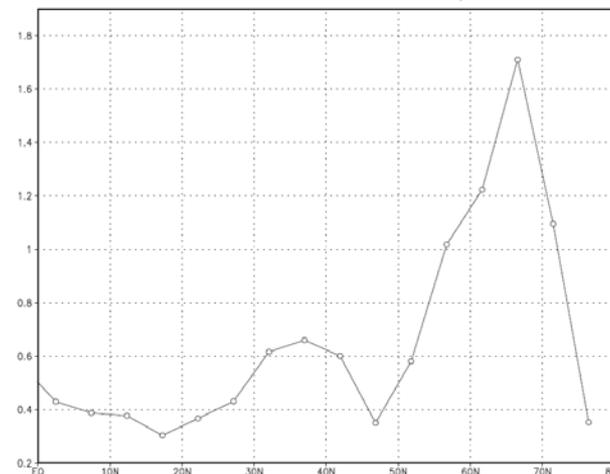
# Летние волны жары: пространственный резонанс

*Petoukhov et al. 2012, PNAS*

2003 JJA SST anomaly, K (HadISST2 data)



zonal 2003 JJA SST anom., K

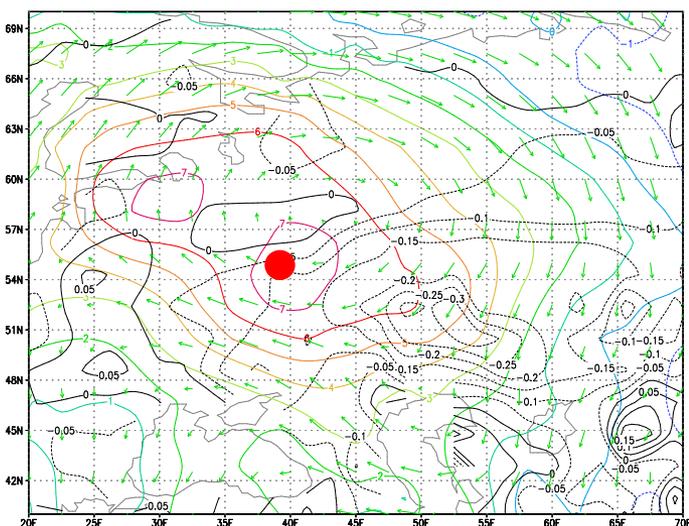


Бимодальное распределение зонального потока вызвано аномалиями ТПО

# Летние волны жары: фактор влажности почвы

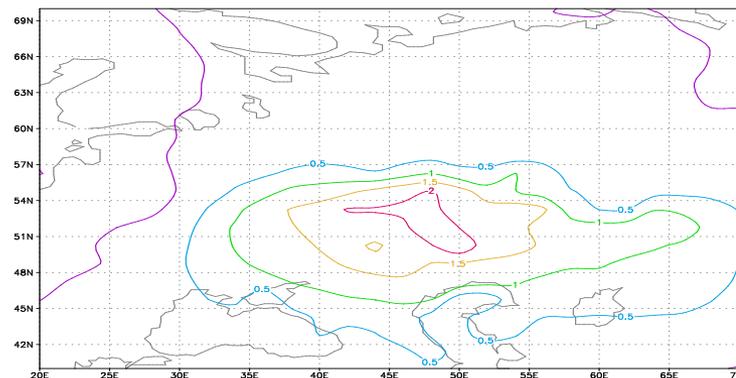
Володин 2011

Аномалии т-ры, влажности почвы и циркуляция в июле 2010 г.

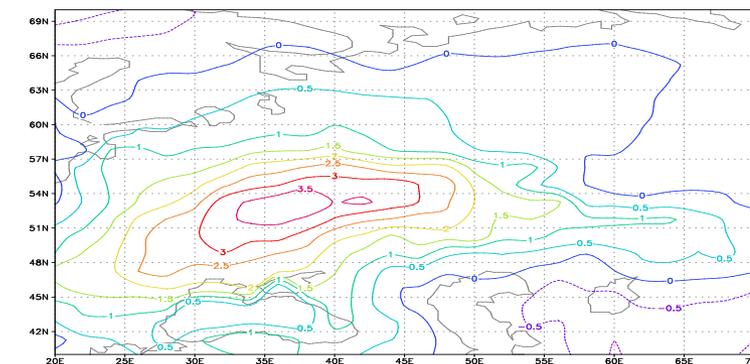


Результаты численных расчетов с моделью ИВМ с заданием отрицательной аномалии влажности почвы в прикаспийском регионе

Средний отклик т-ры в июле, К



Отклик т-ры в июле, К, при формировании блокингов



GRADS: COLA/IGES

2010-10-27-15:29

## Летние волны жары

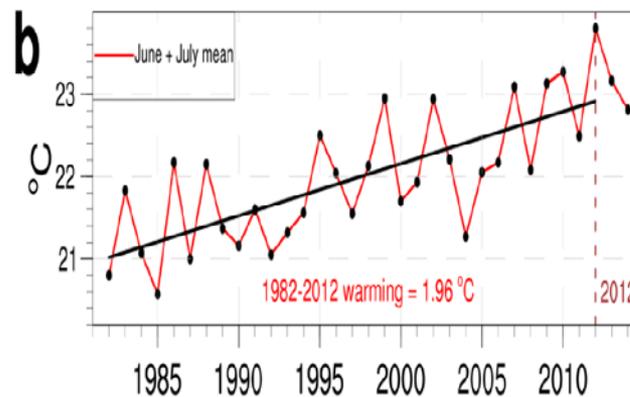
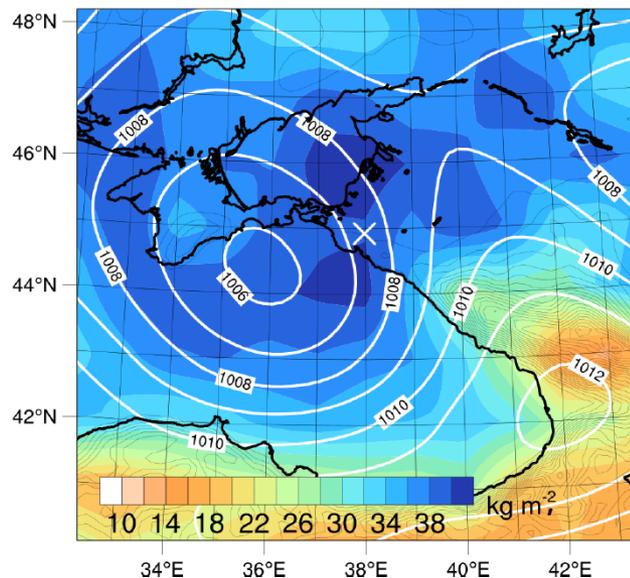
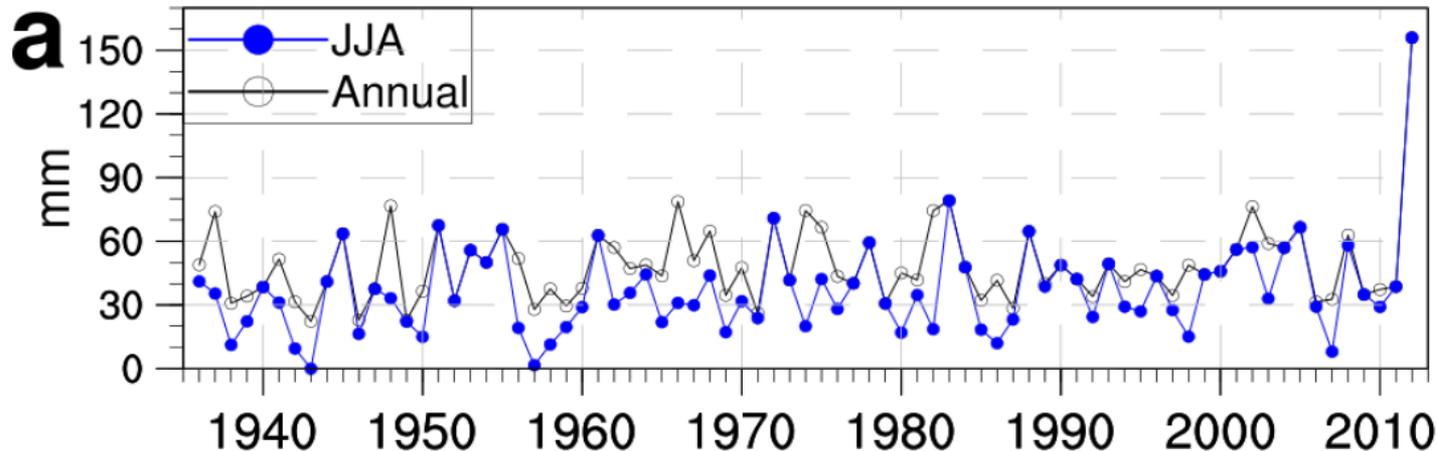
Бимодальное распределение зонального потока в СП вследствие аномалий ТПО в Атлантическом и Тихом океанах приводит к образованию волновода в средних широтах

Синоптические планетарные волны с  $m=6,7,8$  не диссипируют и могут резонировать с аномалиями граничных условий на нижней границе атмосферы, что приводит к значительному росту их амплитуды и длительному (~месяца) стационариванию

Экстремальным аномалиям  $t$ -ры способствует низкая влажность почвы в регионе к северу от Каспийского моря, приводящая к адвекции сухого воздуха с юга

# Экстремальные осадки в Крымске в 2012 г.

Максимальные ежедневные осадки в Крымске, мм/день

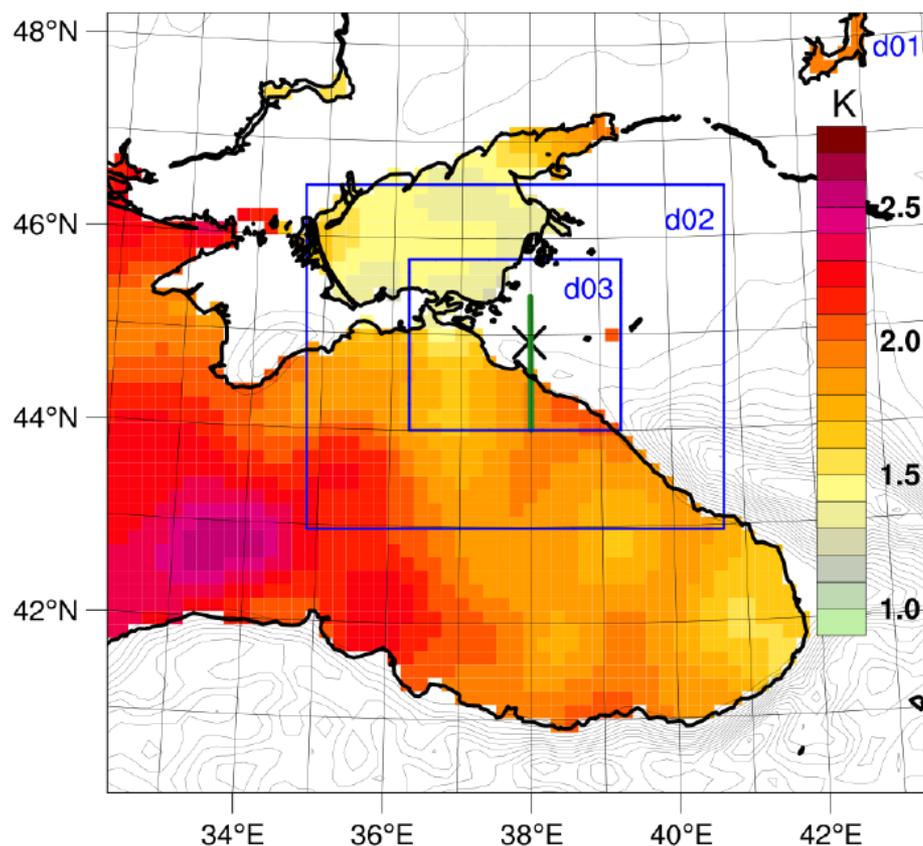


Т-ра поверхности Черного моря в июне-июле, °C

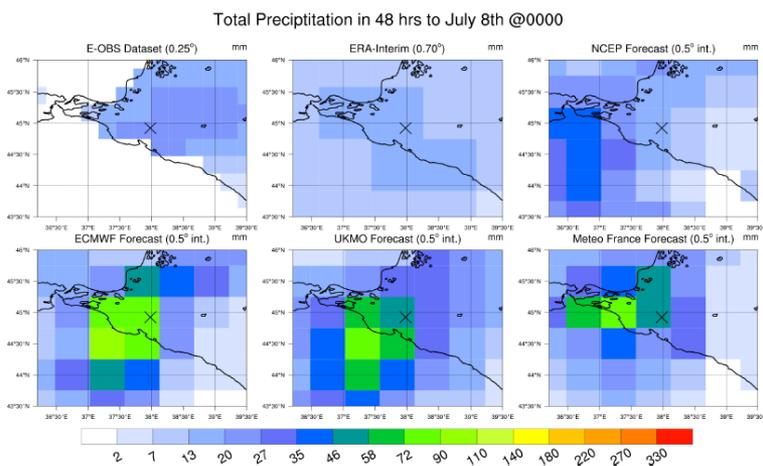
## Экстремальные осадки в Крымске в 2012 г.

Численные эксперименты с моделью WRF: 3 вложенных домена, внутренний – 600м, во внешних доменах циркуляция предписана (согласно данным реанализа) вне погранслоя

Цель: 1) воспроизвести наблюдаемые значения осадков; 2) выяснить, было ли такое событие возможно у условиях более холодного моря (15-20 лет назад); 3) понять механизм

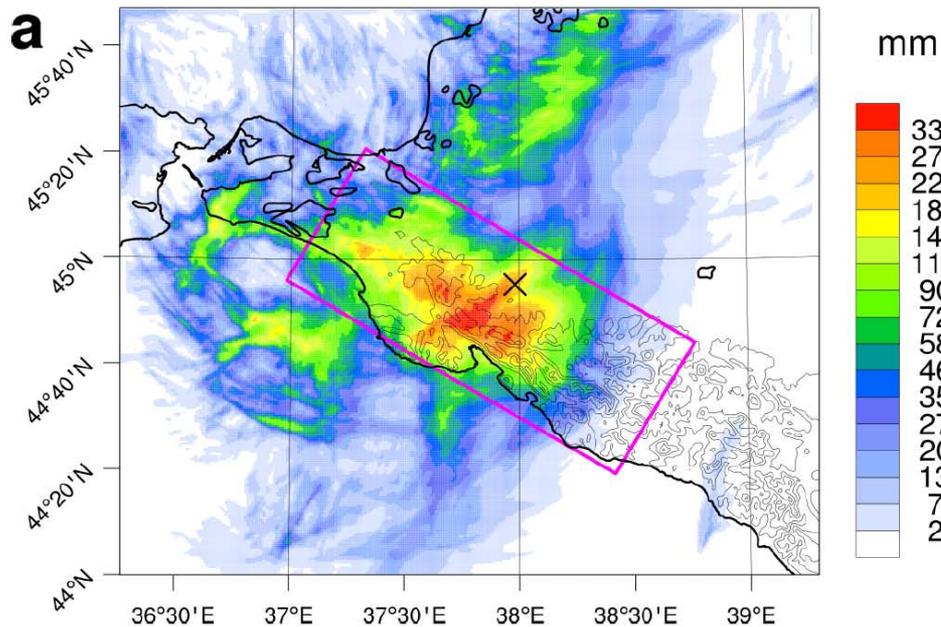


Сеточные эмпирические данные и реанализы не способны воспроизвести экстремальные осадки

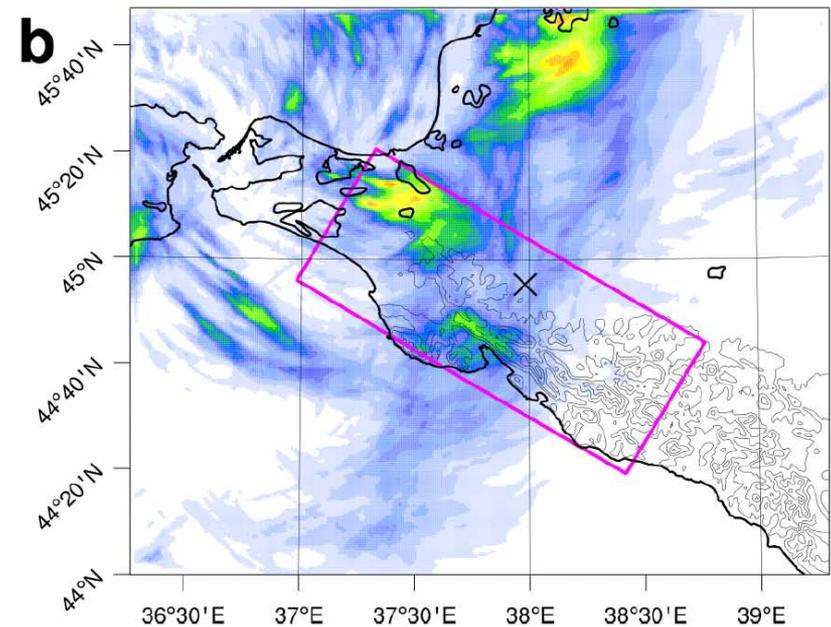


## Экстремальные осадки в Крымске в 2012 г.

Осадки в эксперименте с реалистичными значениями т-ры поверхности Черного моря

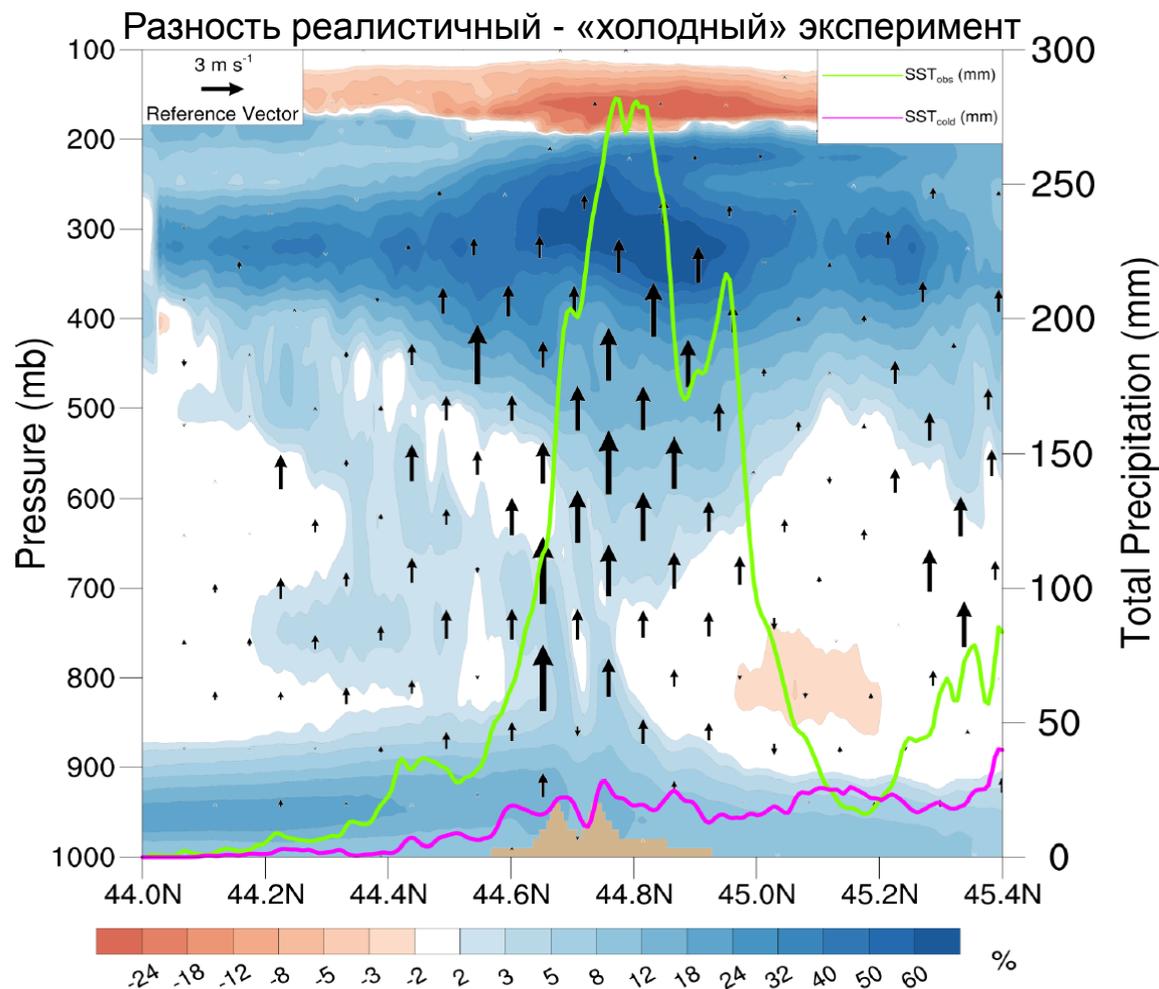


Осадки в эксперименте с «холодными» значениями т-ры поверхности Черного моря



## Экстремальные осадки в Крымске в 2012 г.

Механизм формирования экстремальных осадков – инициация глубокой конвекции при увеличении т-ры поверхности моря

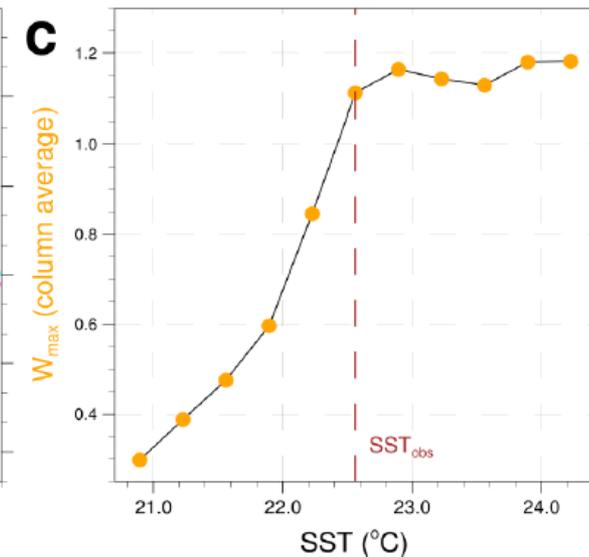
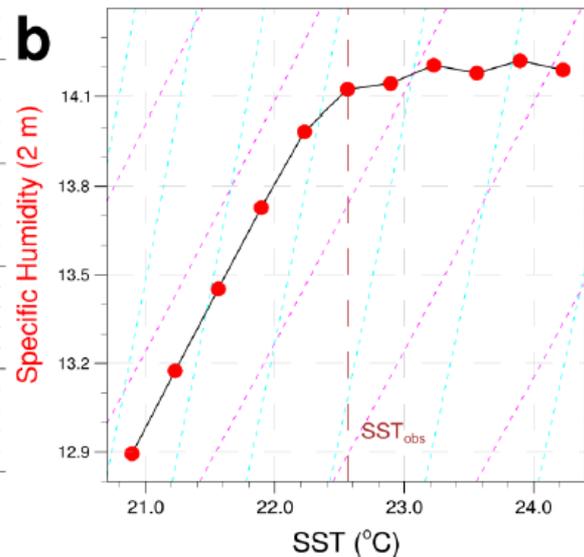
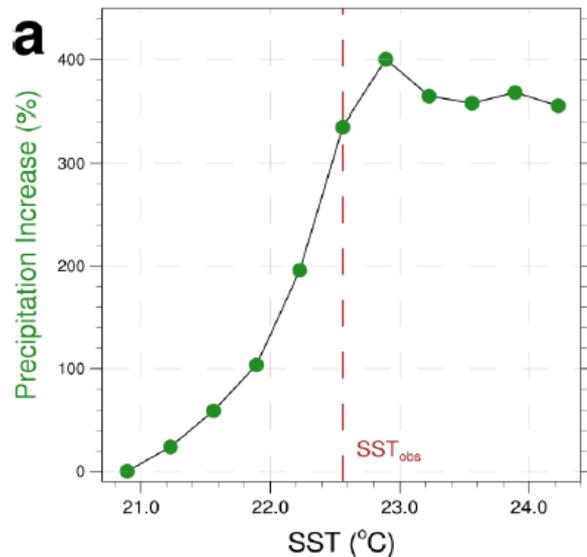


# Экстремальные осадки в Крымске в 2012 г. Нелинейность отклика при росте т-ры поверхности моря

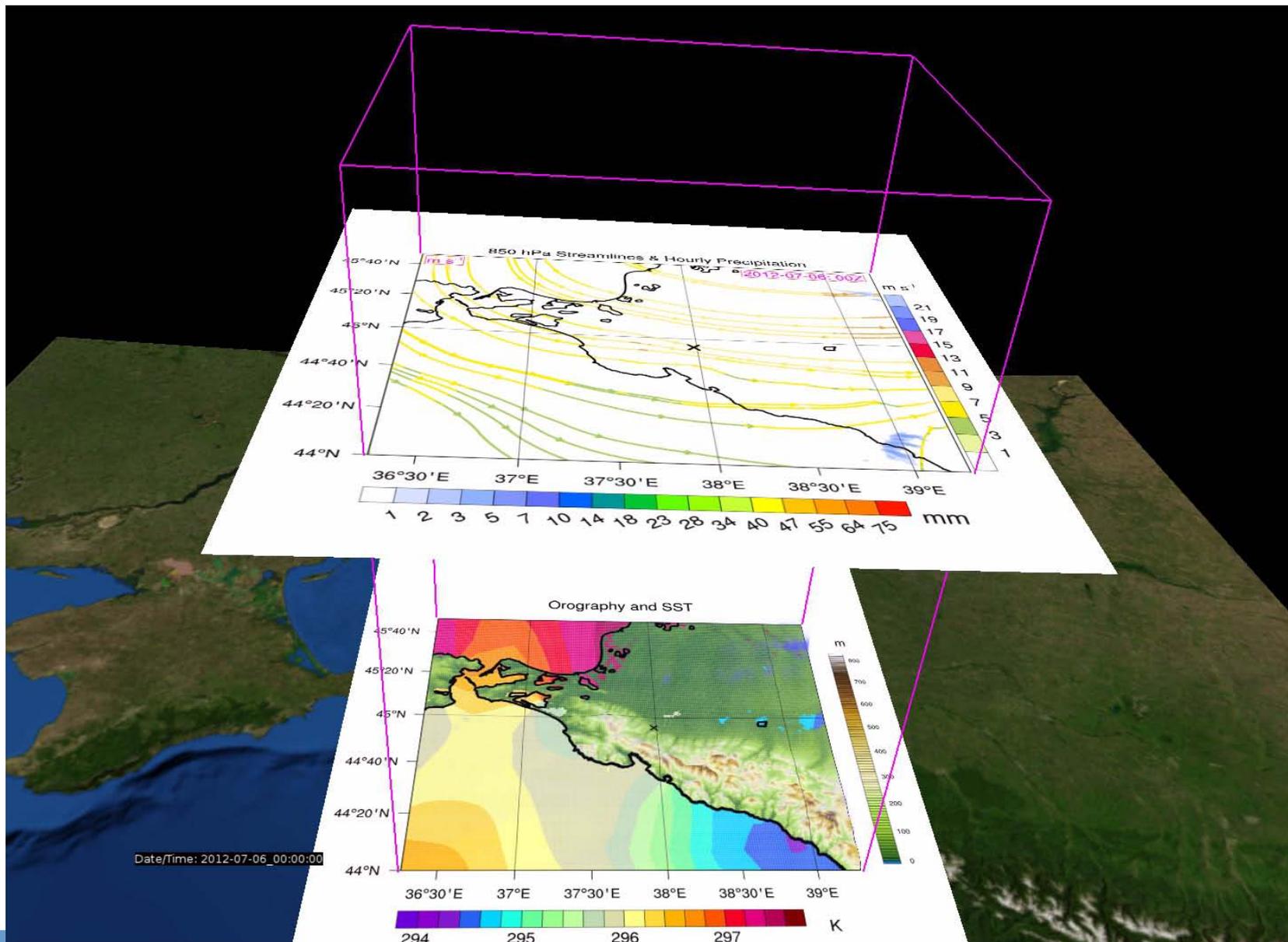
Изменения осадков, %

Изменения абс. влажности г/кг

Изменения макс. верт. скорости, м/с



## Экстремальные осадки в Крымске в 2012 г.



## Экстремальные осадки в Крымске в 2012 г.

Причина экстремальных осадков – инициация глубокой конвекции при набегании потока влажного воздуха с моря на побережье

Глубокая конвекция инициируется при достижении определенного порога неустойчивости, который, по всей видимости, достигается при современных значениях  $t$ -ры поверхности Черного моря

Спасибо!

