



# Ансамблевые численные эксперименты с моделями Земной системы

А.В. Елисеев

*Физический факультет Московского государственного  
университета имени М.В. Ломоносова*

*Институт физики атмосферы им. А.М Обухова РАН*

*Институт глобального климата и экологии имени  
академика Ю.А. Израэля*

семинар ИГКЭ

# План

Мотивация

Источники неопределённости модельных прогнозов

Методы построения ансамблевых численных экспериментов

Методы обработки ансамблевых численных экспериментов

«Подводные камни»

Примеры ансамблевых расчётов

Выводы

# **План**

Мотивация

Источники неопределённости модельных прогнозов

Методы построения ансамблевых численных экспериментов

Методы обработки ансамблевых численных экспериментов

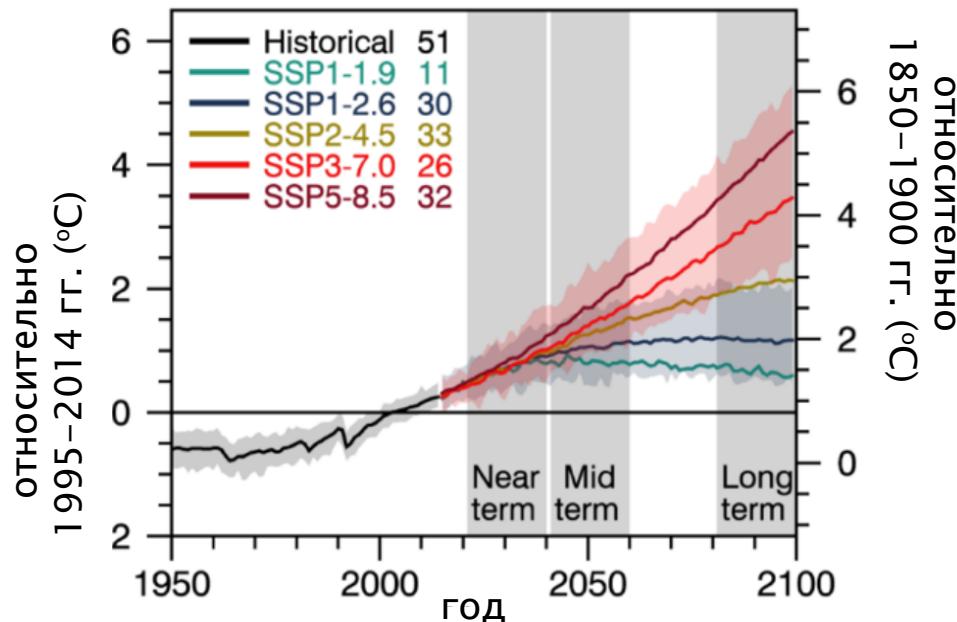
«Подводные камни»

Примеры ансамблевых расчётов

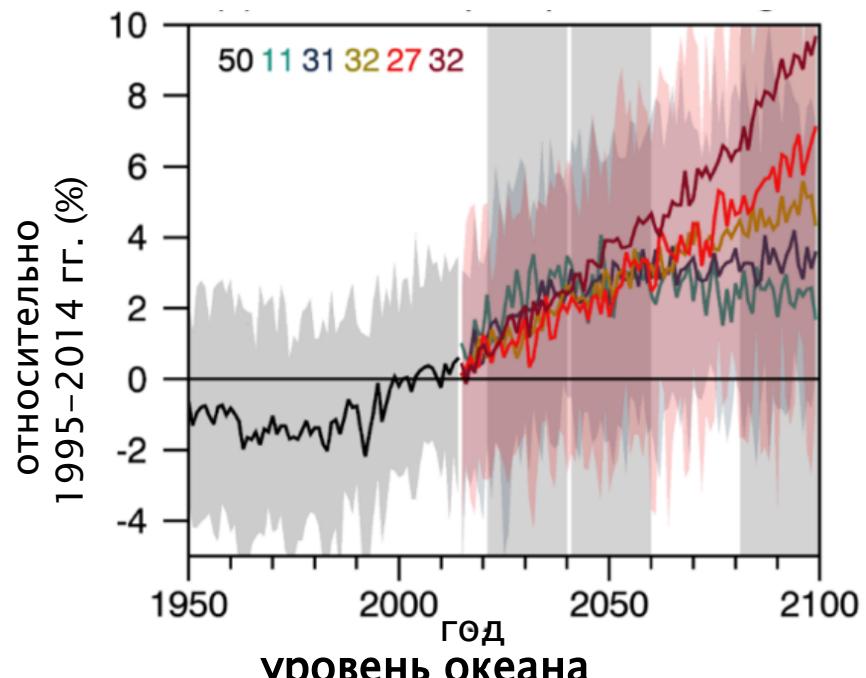
Выводы

# Мотивация: межмодельный разброс в оценках изменения климата в XXI веке (ОДБ РГ МГЭИК)

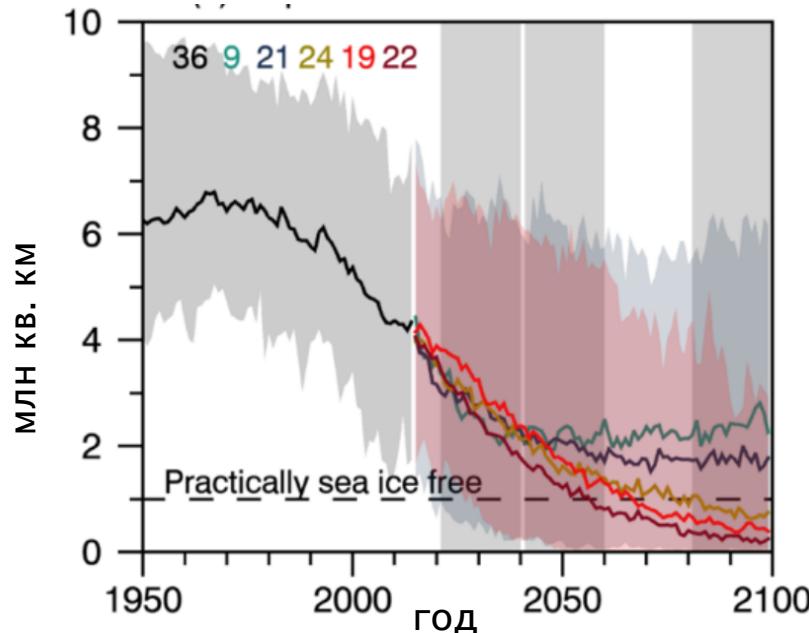
## изменение приземной температуры



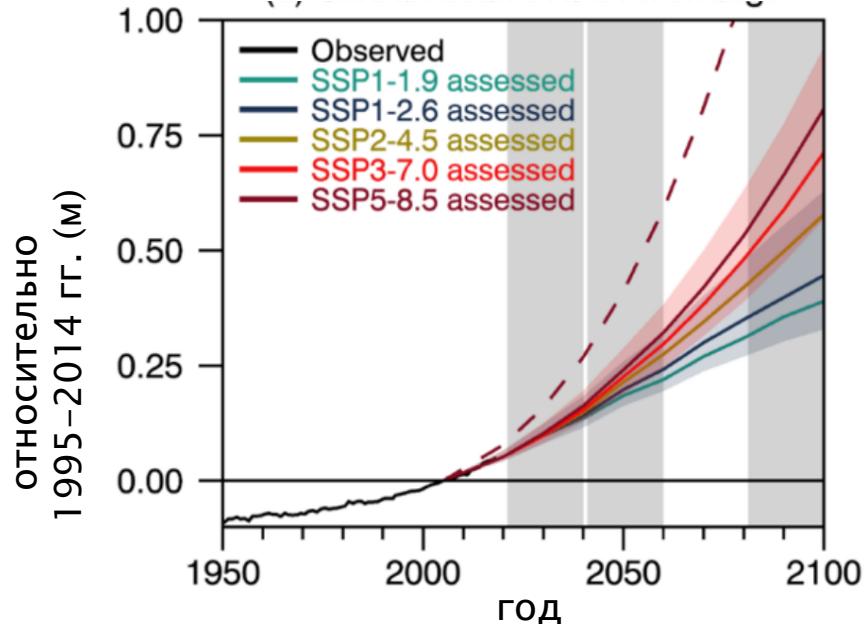
## количество осадков над сушей



## площадь льда в Арктике в сентябре



## уровень океана



## **Таким образом,**

- Современные модели характеризуются заметным разбросом в оценках будущих изменений климата даже при заданном сценарии внешнего воздействия на Земную климатическую систему.
- Предполагая взаимную независимость ошибок отдельных моделей, можно объединить эти модели (или отдельные расчёты с одной и той же моделью) в статистический ансамбль. При этом отдельные модели или расчёты - реализации внутри этого ансамбля.

**' ... статистический ансамбль состояний  
системы атмосфера-океан-деятельный слой  
суши в интервал времени длиной в несколько  
десятилетий называется климатом'**

**[Монин, 1986]**

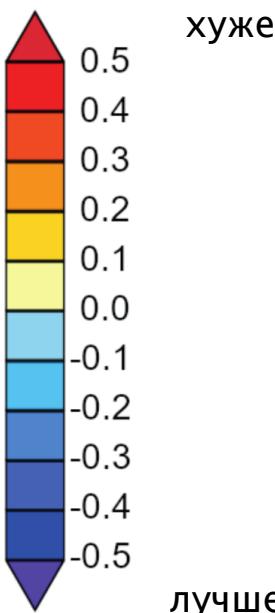
Ансамблевый подход согласуется с таким  
определением климата

# Ансамбли моделей на примере СМИР6 [ОДБ МГЭИК, рис. 3.42]

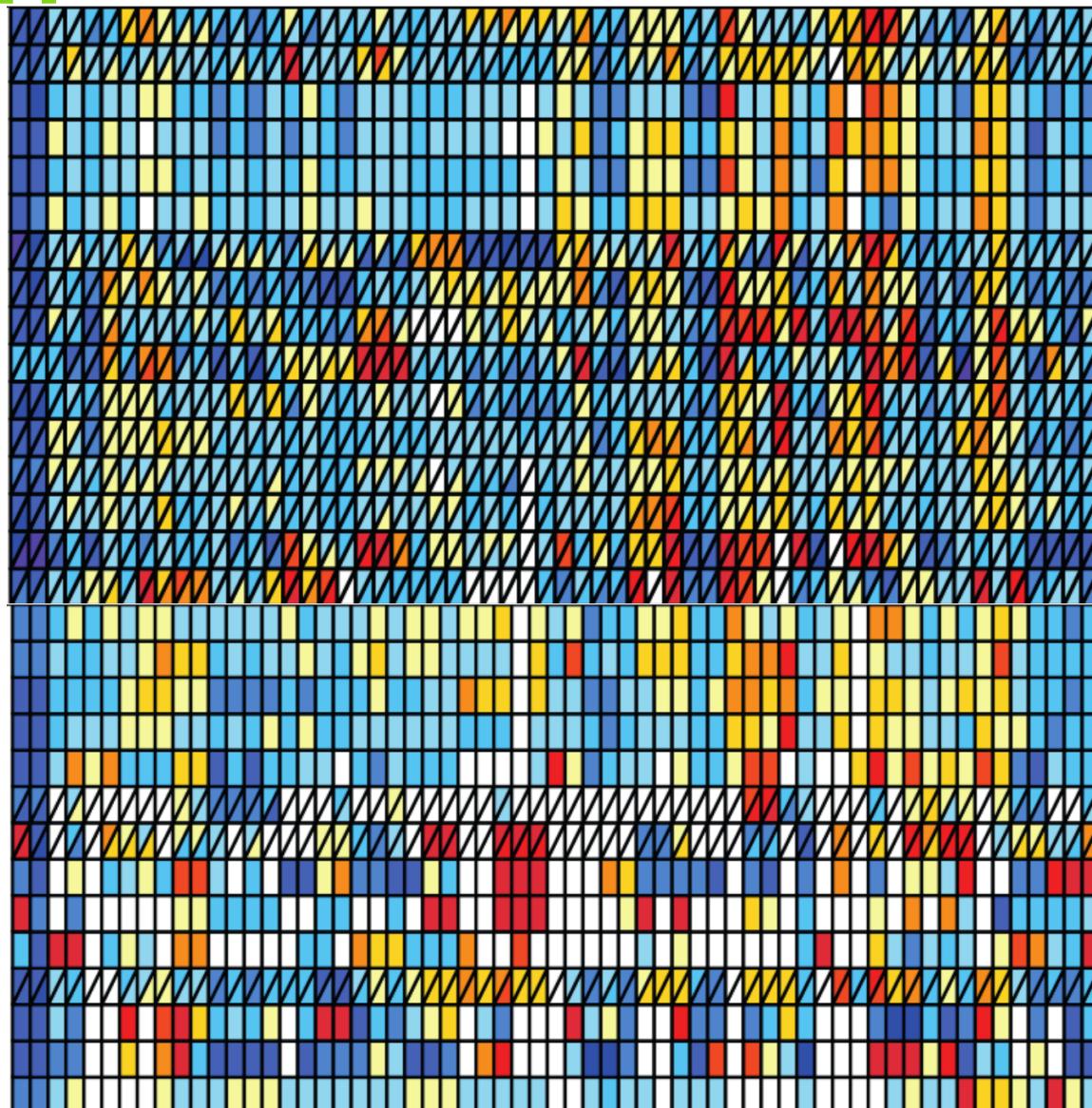
относительная пространственно-временная ошибка модели

столбцы:

- 1) среднее по ансамблю
- 2) медиана ансамбля
- 3...) отдельные модели



Near-Surface Temperature  
Precipitation  
TOA Outgoing Shortwave Radiation  
TOA Outgoing Longwave Radiation  
TOA Shortwave Cloud Radiative Effect  
TOA Longwave Cloud Radiative Effect  
Sea Level Pressure  
Surface Temperature  
Temperature 850hPa  
Temperature 200hPa  
Eastward Wind 850hPa  
Eastward Wind 200hPa  
Northward Wind 850hPa  
Northward Wind 200hPa  
Geopotential Height 500hPa  
Specific Humidity 400hPa  
Surface Upwelling Longwave Radiation  
Surface Downwelling Longwave Radiation  
Surface Upwelling Shortwave Radiation  
Surface Downwelling Shortwave Radiation  
Evapotranspiration  
Surface Downward Mass Flux of Carbon  
Gross Primary Productivity  
Leaf Area Index  
Surface Net Downward Mass Flux of Carbon  
Soil Moisture  
Sea Surface Temperature  
Sea Ice Concentration - NH  
Sea Ice Concentration - SH  
Downward Heat Flux at Sea Water Surface



среднее по ансамблю оказывается лучше даже «лучшей» модели!

«Хор не фальшивит...»

## Интерпретация ансамбля

- Результаты расчётов с каждой моделью, а также реальная климатическая траектория характеризуются своей собственной функцией распределения вероятности (ФРВ)
- Результаты расчётов с каждой моделью, а также реальная климатическая траектория – реализации внутри одного и того же статистического ансамбля (т.е. реализации с одной и той же ФРВ)

Условия:

- i) формулировка используемых в ансамбле моделей соответствует знаниям о физике Земной системы,
- ii) все ЧЭ с моделями ансамбля интегрируются, начиная с одного и того же момента времени и с начальных условий, соответствующих (с некоторой точностью) знаниям о состоянии ЗС в этот момент времени

# **План**

Мотивация

Источники неопределённости модельных прогнозов

Методы построения ансамблевых численных экспериментов

Методы обработки ансамблевых численных экспериментов

«Подводные камни»

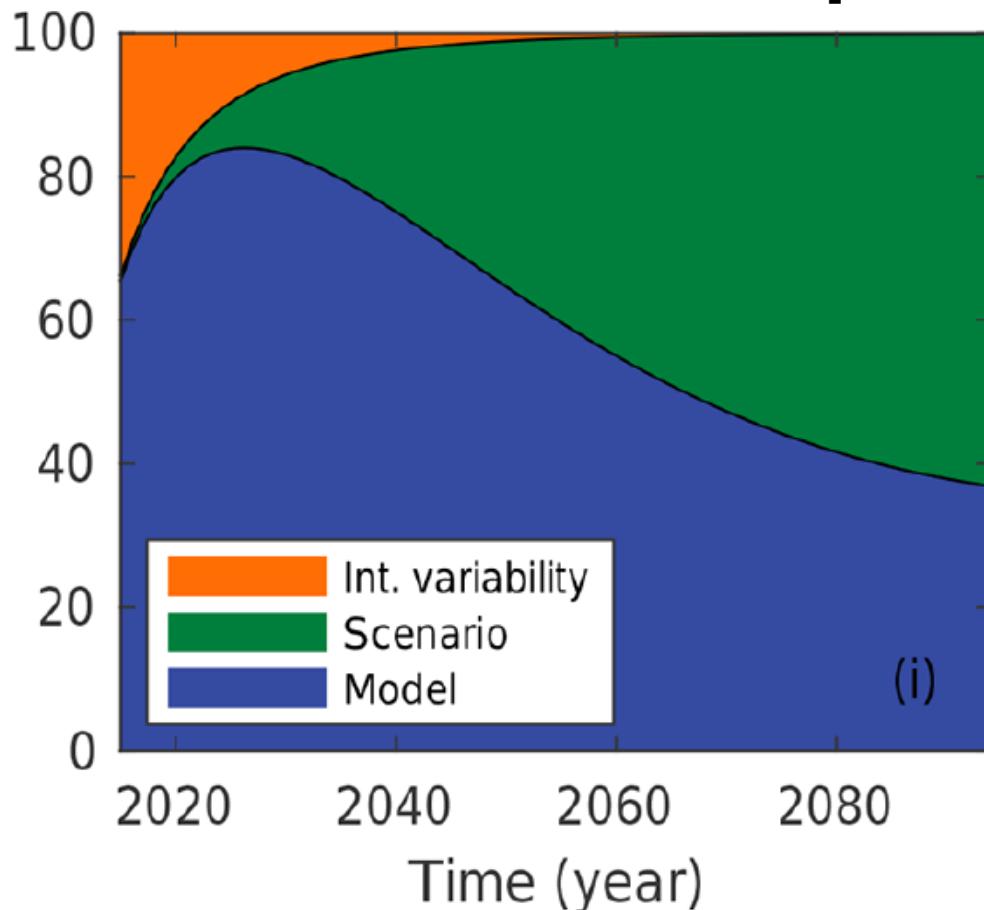
Примеры ансамблевых расчётов

Выводы

# Причины неопределённости прогнозических расчётов

- Естественная изменчивость климата (задание начальных условий).
  - Неопределённость сценариев внешних воздействий.
  - Неточность значений управляемых параметров модели.
  - Структурная неопределённость модели.
- } неопределённость  
} моделей

**Вклад в неопределённость оценок изменения климата XXI века,  
CMIP6 [Lehner et al., 2020]**



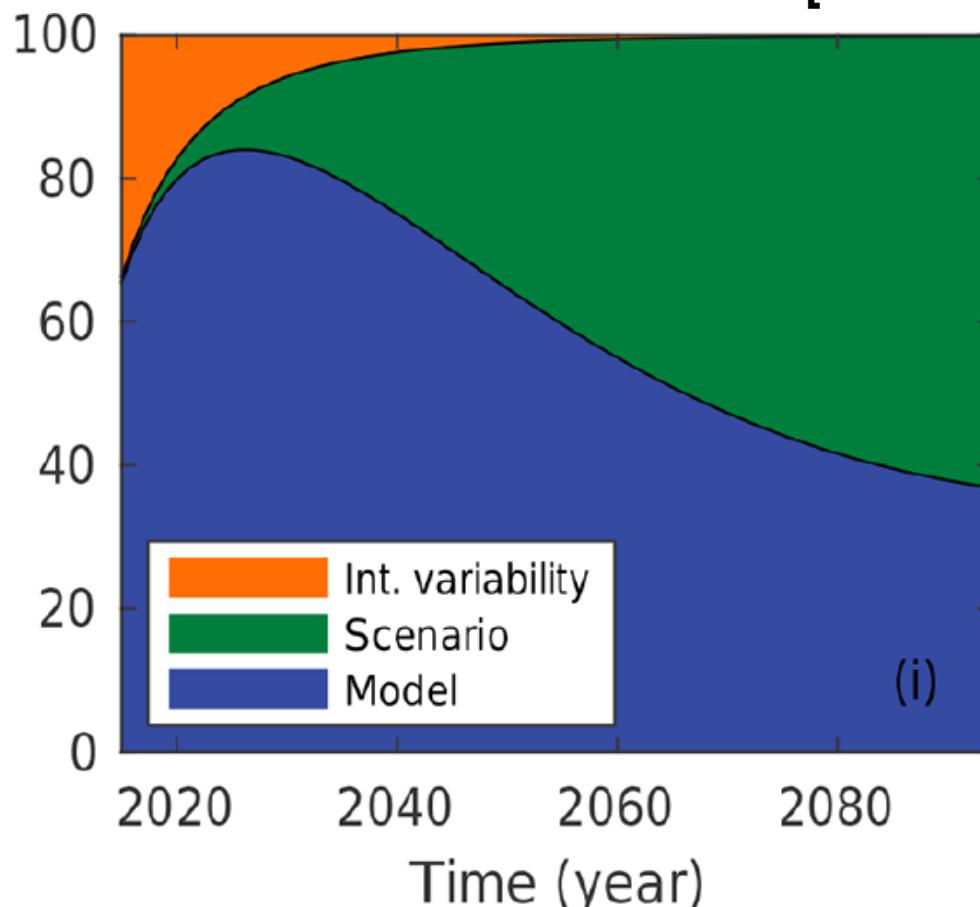
# Причины неопределённости прогнозических расчётов

случайная составляющая

дeterminированная составляющая

- Естественная изменчивость климата (задание начальных условий).
  - Неопределенность сценариев внешних воздействий.
  - Неточность значений управляемых параметров модели.
  - Структурная неопределенность модели.
- } неопределенность  
моделей

Вклад в неопределенность оценок изменения климата XXI века,  
CMIP6 [Lehner et al., 2020]



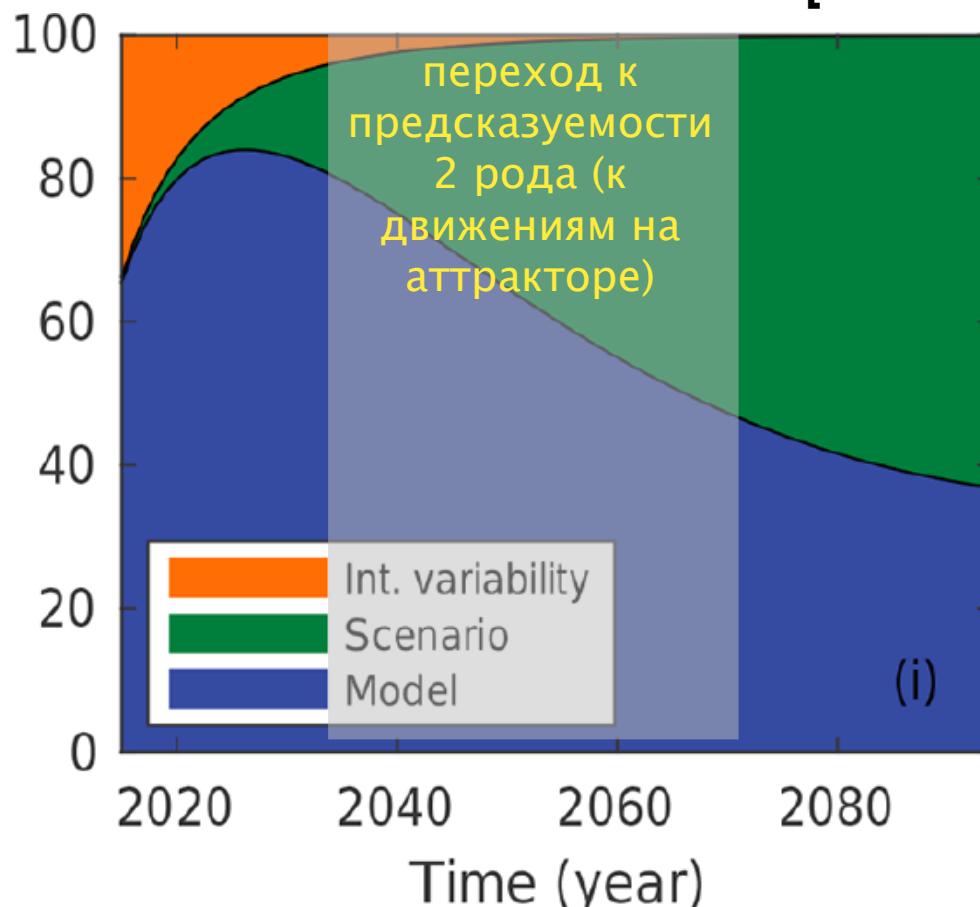
# Причины неопределённости прогнозических расчётов

случайная составляющая

дeterminированная составляющая

- Естественная изменчивость климата (задание начальных условий).
  - Неопределенность сценариев внешних воздействий.
  - Неточность значений управляемых параметров модели.
  - Структурная неопределенность модели.
- } неопределенность моделей

Вклад в неопределенность оценок изменения климата XXI века,  
CMIP6 [Lehner et al., 2020]



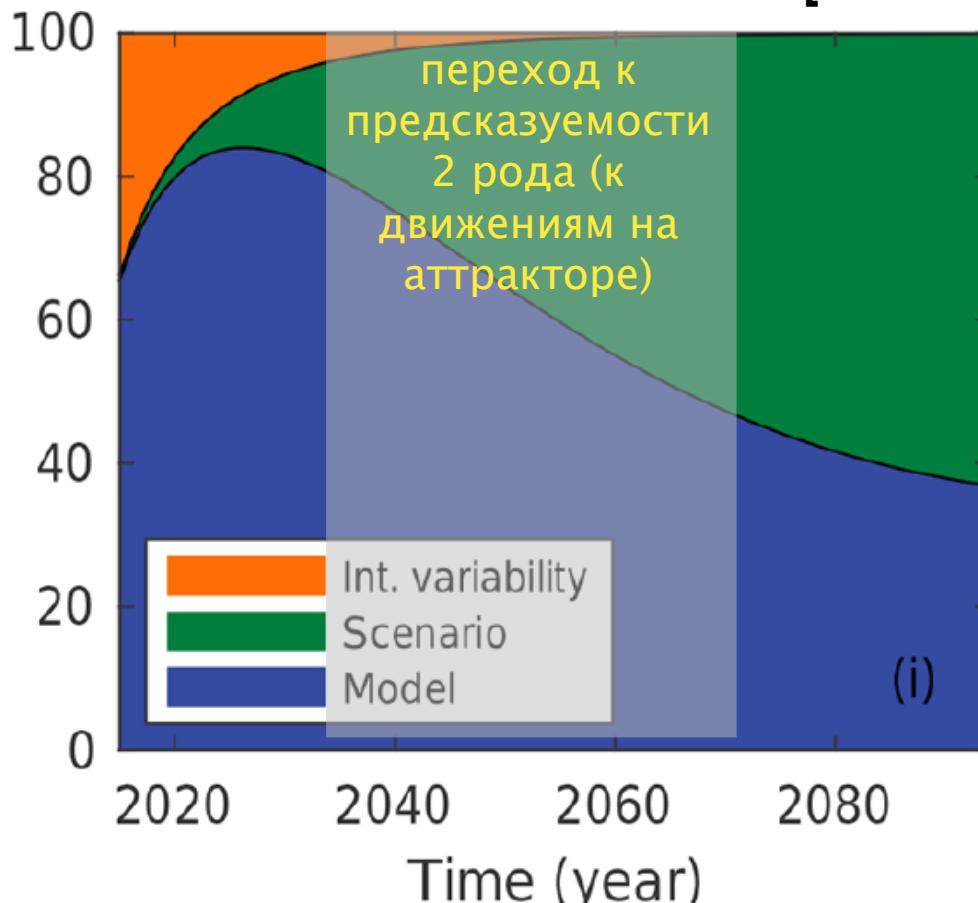
# Причины неопределённости прогнозических расчётов

случайная составляющая

детерминированная составляющая

- Естественная изменчивость климата (задание начальных условий).
  - Неопределенность сценариев внешних воздействий.
  - Неточность значений управляемых параметров модели.
  - Структурная неопределенность модели.
- } неопределенность моделей

Вклад в неопределенность оценок изменения климата XXI века,  
CMIP6 [Lehner et al., 2020]



При выделении для каждой модели для переменного  $Y$  среднего по ансамблю  $E(Y)$  и отклонения от него  $Y'$ :

$$Y(t) = E(Y)(t) + Y'(t)$$
$$E(Y')(t) \approx 0$$

$E(Y)(t)$  – детерминированный вынужденный сигнал  
 $Y'(t)$  – естественная изменчивость (но  $E(Y')(t) = 0$  только при бесконечно большом ансамбле и бесконечно длинных вычислениях)

Структура атTRACTора зависит от внешних условий

# **План**

Мотивация

Источники неопределённости модельных прогнозов

Методы построения ансамблевых численных экспериментов

Методы обработки ансамблевых численных экспериментов

«Подводные камни»

Примеры ансамблевых расчётов

Выводы

# Построение ансамблевых климатических оценок

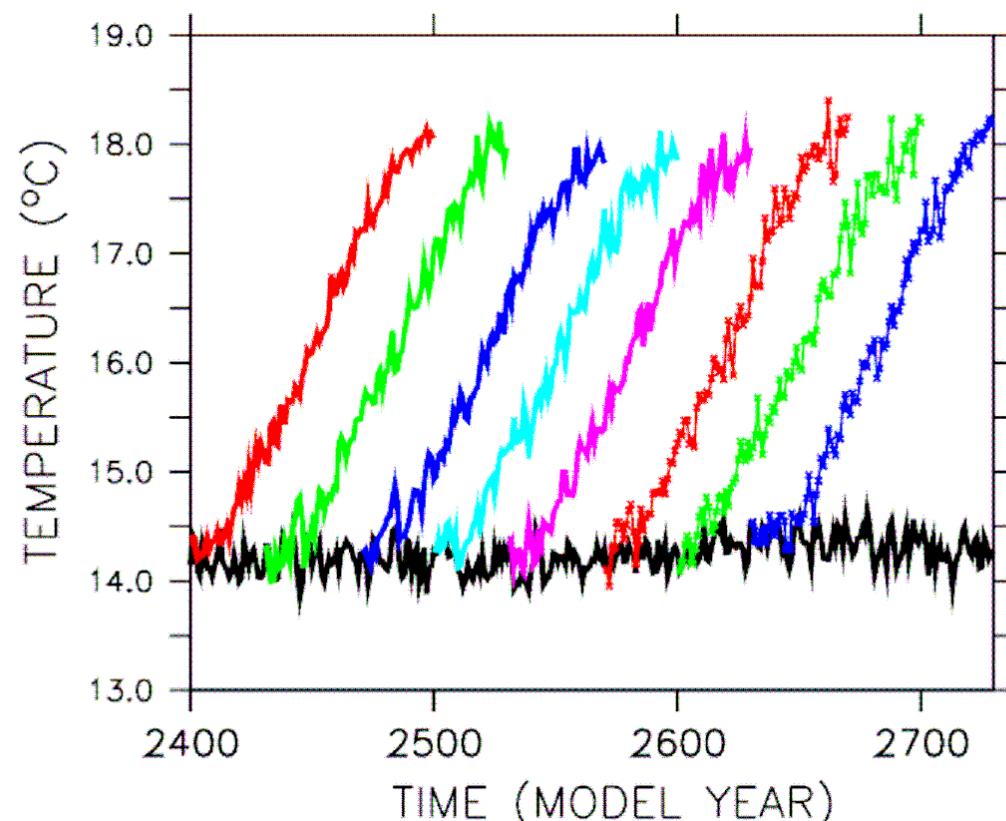
## 1. Естественная изменчивость климата (1)

Выбор начальных условий интегрирования; должны быть согласованы как с динамикой модели, так и со знаниями о соответствующем временном периоде.

Как правило, выбираются случайным образом из равновесного численного эксперимента с граничными условиями, соответствующими началу интегрирования

(CMIP5/6 –  
доиндустриальный  
контрольный расчёт,  
условия 1850 г.)

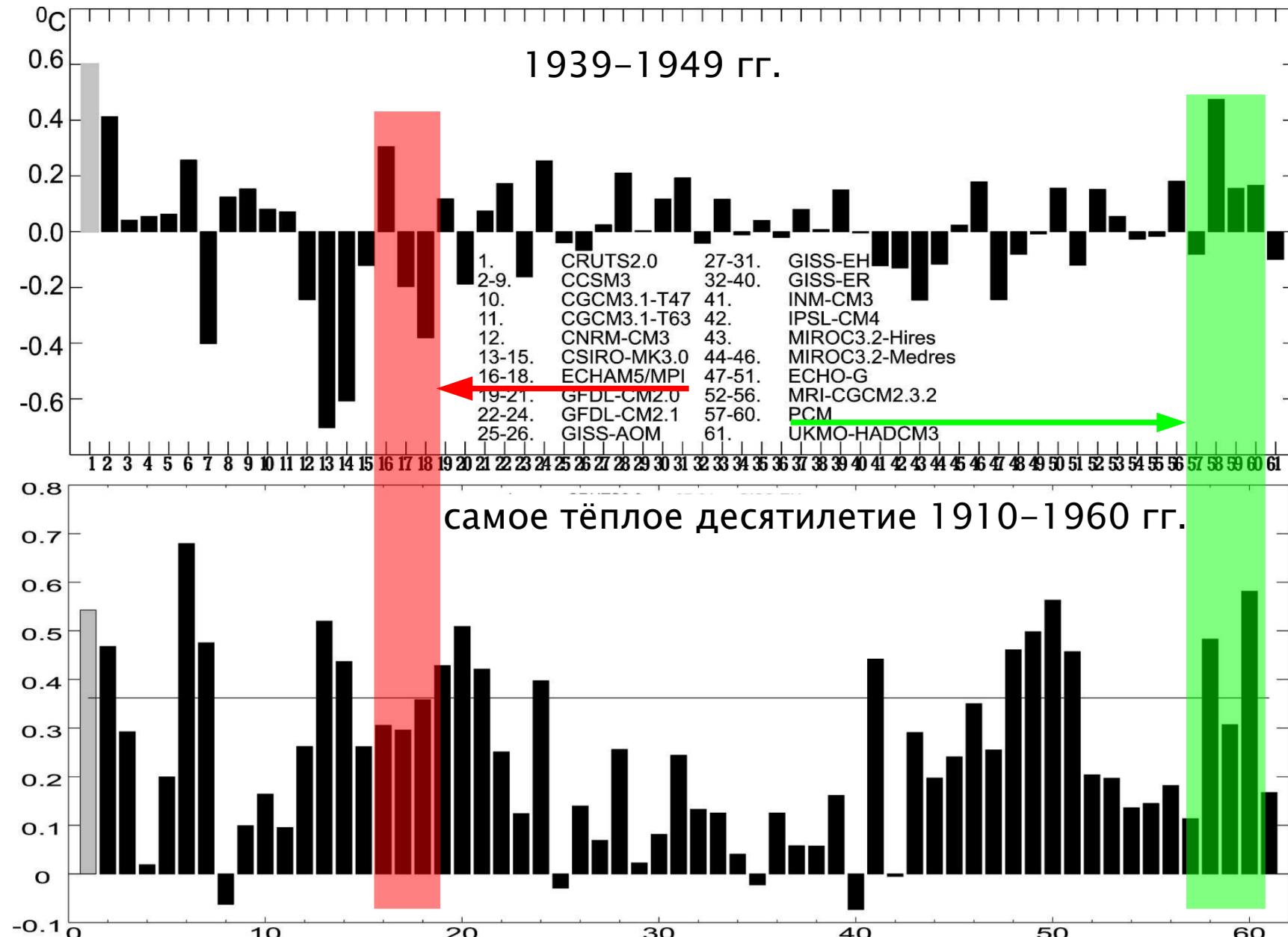
Постановка ансамблевого  
численного эксперимента с  
KCM с разными начальными  
условиями [Park et al., 2009]



# Построение ансамблевых климатических оценок

## 1. Естественная изменчивость климата (2)

Воспроизведение аномалий температуры над сушей 60–90°с.ш., CMIP3  
[Wang et al., 2007]



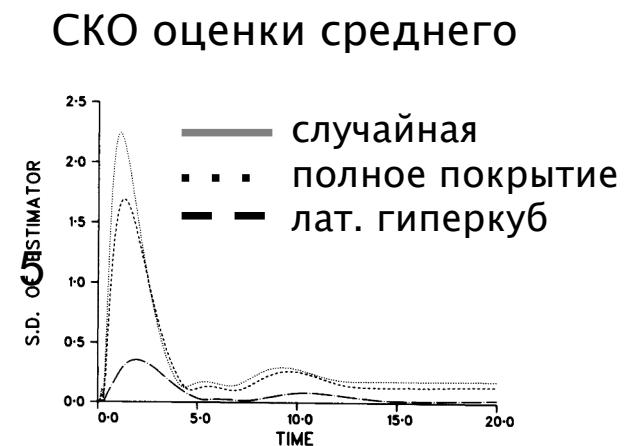
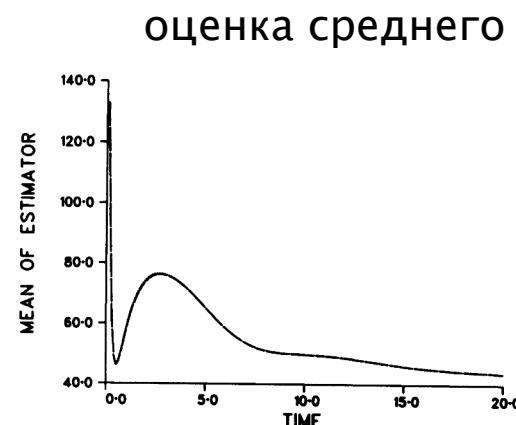
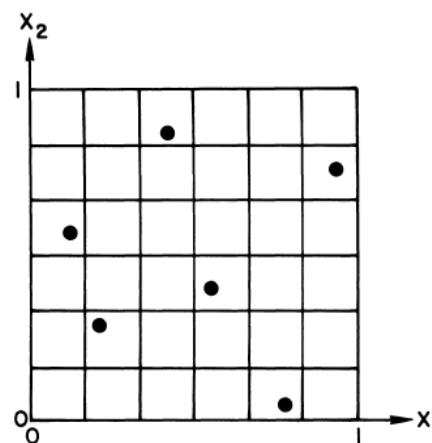
# Построение ансамблевых климатических оценок.

## 2. Параметрическая неопределённость

Ансамбли с различными значениями параметров

Выборки по разным параметрам должны быть взаимно некоррелированы

- Латинский гиперкуб [MacKay et al., 1979; Stein, 1987]



- Метод Монте-Карло

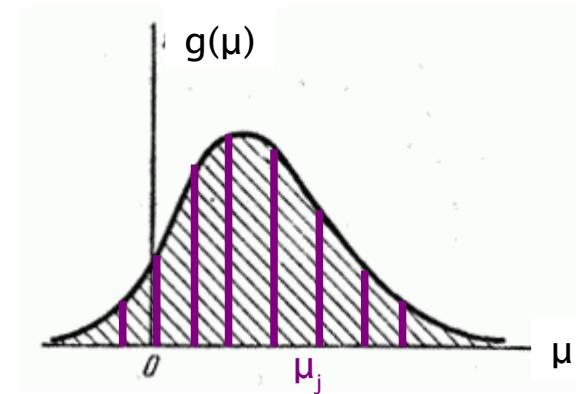
Для параметра  $\mu$  с ФРВ  $g(\mu)$  строится выборка  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{N_{mem}}$

Для любой переменной  $f$  статистика

$$E(f) = \int_0^1 f g(\mu) d\mu = \sum_j f_j w_j,$$

$w_j$  – вероятность  $\mu \in [\mu_{j-1}, \mu_j]$

- + : гибкость и вычислительная эффективность
- : требует знания ФРВ



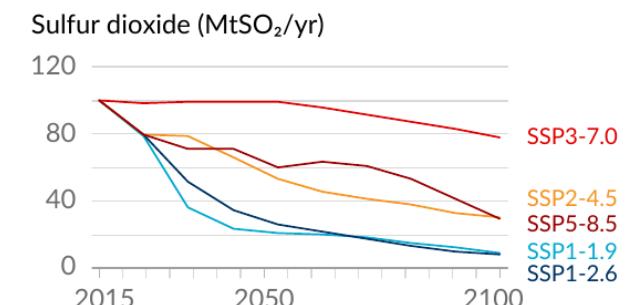
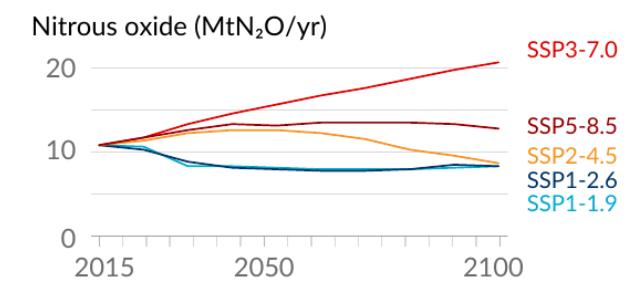
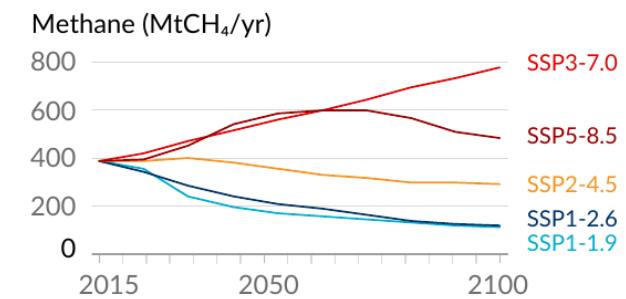
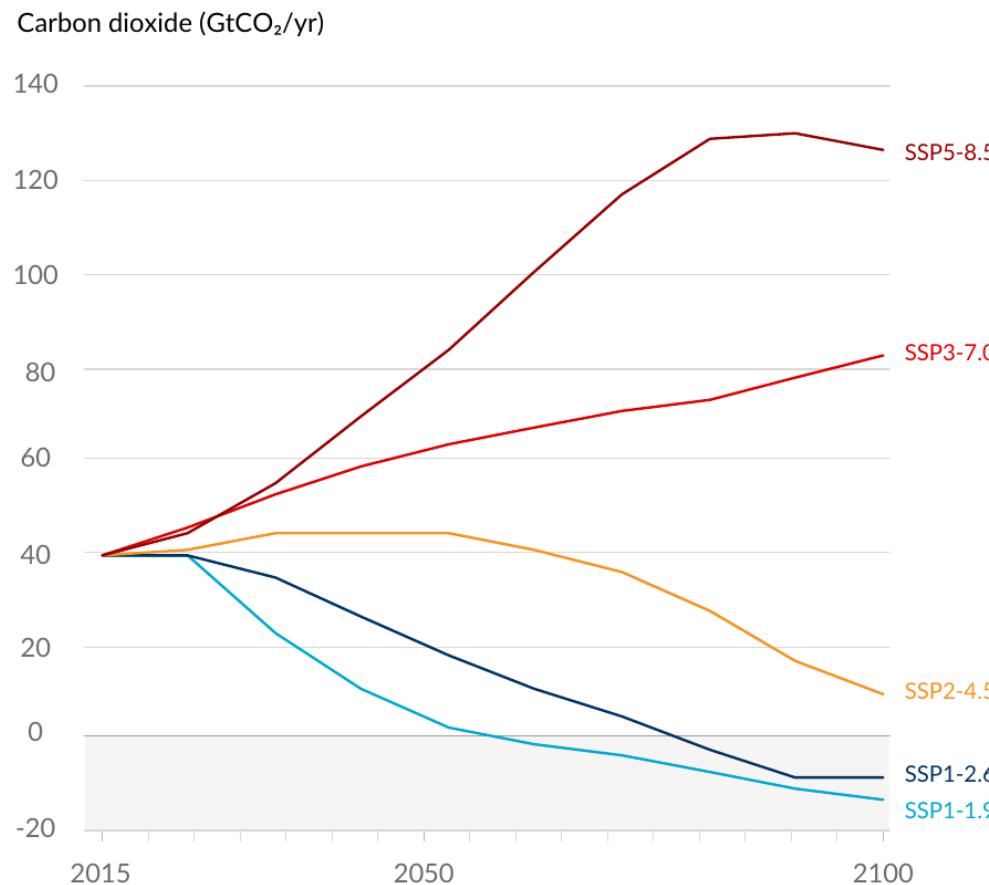
# Построение ансамблевых расчётов.

## 2. Неопределённость сценариев внешних воздействий

Расчёты с различными сценариями.

Вероятность реализации каждого из сценариев неизвестна

### Сценарии CMIP6 - Shared Socioeconomic Pathways (SSP)



# Построение ансамблевых климатических оценок.

## 3. Структурная неопределённость

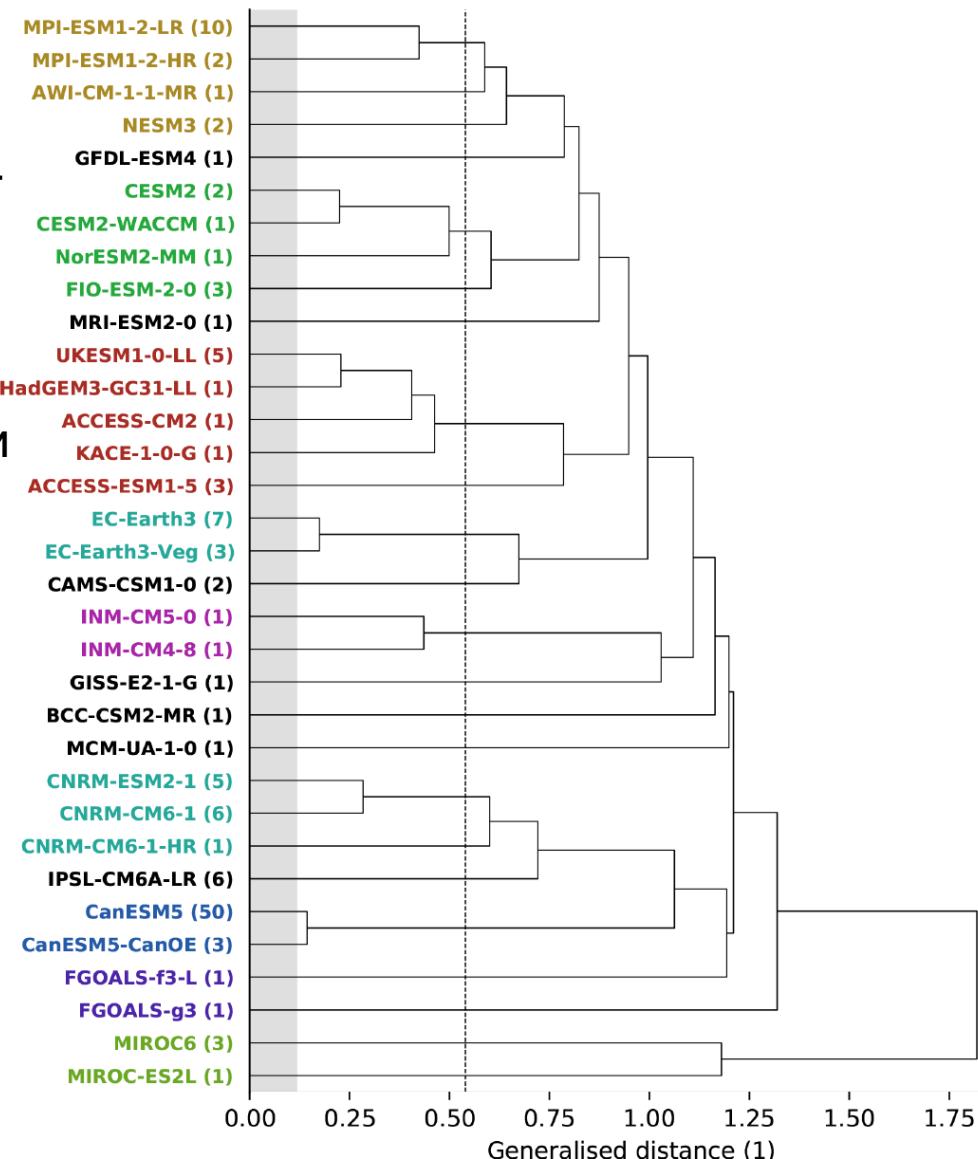
- Эксперименты с различными моделями при идентичных условиях (CMIP5/6 – ensemble of opportunity):

+: Строгая (но неполная) оценка структурной неопределённости  
-: Взаимная корреляция между моделями (копирование кода, настройка по идентичным данным);

Нельзя быть уверенным в полном заполнении фазового пространства

- Эксперименты с различными версиями одной и той же модели:

+: Простота интерпретации  
-: Ещё меньшая уверенность в полноте заполнения фазового пространства.



Статистическое "генетическое" древо моделей CMIP6 [Brunner et al., 2020]

# Построение ансамблевых климатических оценок.

## 4. Размер ансамбля

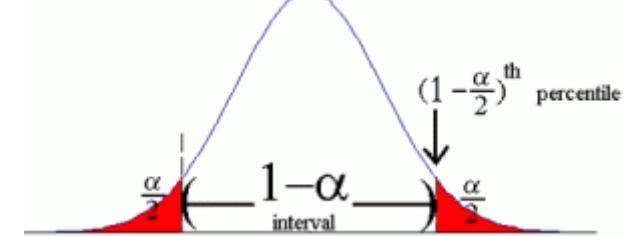
Размер ансамбля для разных начальных условий и переменной с нормальным распределением [Wehner, 2000]: не менее чем

$$n = \frac{Z_\alpha^2 \sigma^2}{E^2}$$

$Z_\alpha$  – площадь под  $(1-\alpha)$ -"хвостом" ФРВ

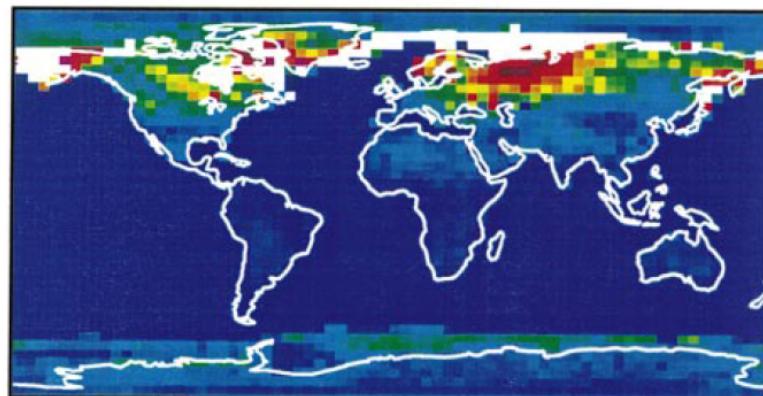
$\sigma^2$  – СКО переменной

$E$  – допустимая ошибка



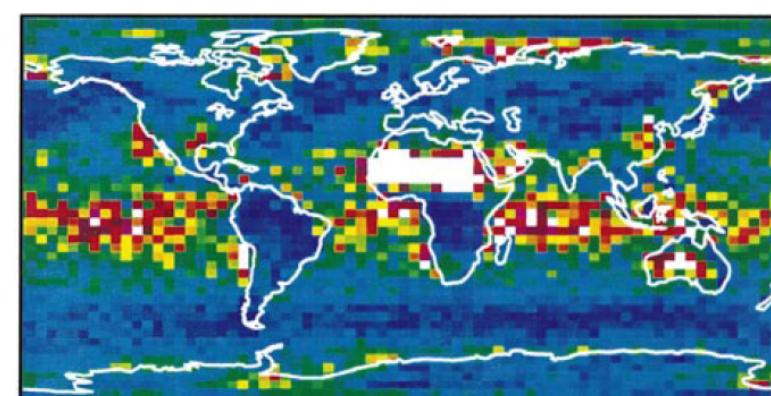
Минимальный размер ансамбля для средних за декабрь–февраль 1979–1988 гг.  
(LLNL GCM, эксперименты с предписанной ТПО) [Wehner, 2000]

приземная температура,  $E = 0.5^\circ\text{C}$



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

осадки,  $E=10\%$



0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

# **План**

Мотивация

Источники неопределённости модельных прогнозов

Методы построения ансамблевых численных экспериментов

Методы обработки ансамблевых численных экспериментов

«Подводные камни»

Примеры ансамблевых расчётов

Выводы

## **Обработка ансамблевых численных экспериментов**

- Реалистичность отдельных реализаций в ансамбле
- Статистическая обработка результатов

# Обработка ансамблевых численных экспериментов

- Реалистичность отдельных реализаций в ансамбле
- Статистическая обработка результатов

## Ансамблевое осреднение

Для любой переменной  $Y$  обусловленная данными  $D$  ансамблевая статистика

- среднее

$$E(Y | D) = \sum Y_k w_k,$$

- ансамблевое (межмодельное) среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$\sigma(Y | D) = \{ \sum [\sigma_k^2 + Y_k^2] w_k - E(Y | D)^2 \}^{1/2},$$

где  $Y_k$  – значение  $Y$  для реализации  $M_k$ ,  $\sigma_k$  – межгодовое СКО для реализации  $M_k$ ,  $k=1,2,\dots,N_{mem}$ .

# Обработка ансамблевых численных экспериментов

- Реалистичность отдельных реализаций в ансамбле
- Статистическая обработка результатов

## Ансамблевое осреднение

Для любой переменной  $Y$  обусловленная данными  $D$  ансамблевая статистика

- среднее

$$E(Y | D) = \sum Y_k w_k,$$

характеристика качества модели

- ансамблевое (межмодельное) среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$\sigma(Y | D) = \{ \sum [\sigma_k^2 + Y_k^2] w_k - E(Y | D)^2 \}^{1/2},$$

где  $Y_k$  – значение  $Y$  для реализации  $M_k$ ,  $\sigma_k$  – межгодовое СКО для реализации  $M_k$ ,  $k=1,2,\dots,N_{mem}$ .

# Обработка ансамблевых численных экспериментов: веса

$$\sum_k w_k = 1$$

- **Обычное среднее:**

$$w_k = 1 / N_{\text{mem}}$$

Все модели считаются одинаково достоверными

- **Оптимальные веса:**

$$w_k \rightarrow \min \text{RMS}(Y_k ; D)$$

Минимизируется RMS отклонения от данных наблюдений (включая влияние начальных условий)

- **Байесово среднее [Hoeting et al., 1999; Leroy, 1998]:**

$$w_k \sim P(M_k | D)$$

Максимизируется вероятность «правильности» модели в сравнении с эталонными данными

# Характеристики для вычисления байесовых весов

## Современное состояние:

- +: Правильные начальные условия для будущих изменений. Доступность данных.
- : Лучшее воспроизведение современного состояния не гарантирует корректности отклика при внешнем воздействии.

## Характеристики современной изменчивости:

- +: Учёт естественной изменчивости. Относительная доступность данных (тем меньше, чем больший временной масштаб исследуется).
- : Нет прямой связи между воспроизведением изменчивости и корректностью отклика при внешнем воздействии.

## Коэффициенты тренда для современного периода:

- +: Учёт отклика на воздействие. Относительная доступность данных.
- : Необходимы предположения о доли отклика на воздействие в общем сигнале и о линейности отклика в будущем.

## Изменения климата в палеоэпохи:

- +: Учёт внешних воздействий.
- : Низкое качество данных о воздействиях и об отклике. Возможная зависимость коэффициента чувствительности от состояния.

## Согласие между моделями [Tebaldi et al., 2004, 2005]:

- +: Легкость использования.
- : Неучёт систематических ошибок, общих для всего ансамбля

## Взаимная зависимость между моделями:

- +: Коррекция размера ансамбля на зависимость между моделями.
- : Возможно ухудшение ансамблевой статистики в из-за подавления сигнала от моделей, хорошо согласующихся с наблюдениями (и друг с другом).

# Интерпретация неопределённости

Частотная (прогноз погоды и прогноз вплоть до декадного):

Возможно массовое сравнение с наблюдениями



Частота успешных прогнозов.

Байесовая (вековой и более длительный масштаб):

Прямое сравнение с наблюдениями затруднено или невозможно .



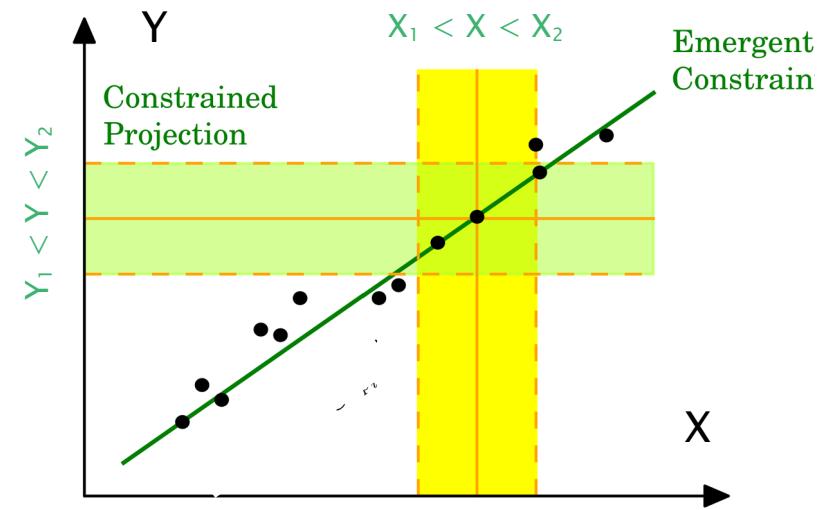
Мера неопределённости современных знаний

# Обобщённые (межмодельные) связи (emergent constraints) (1)

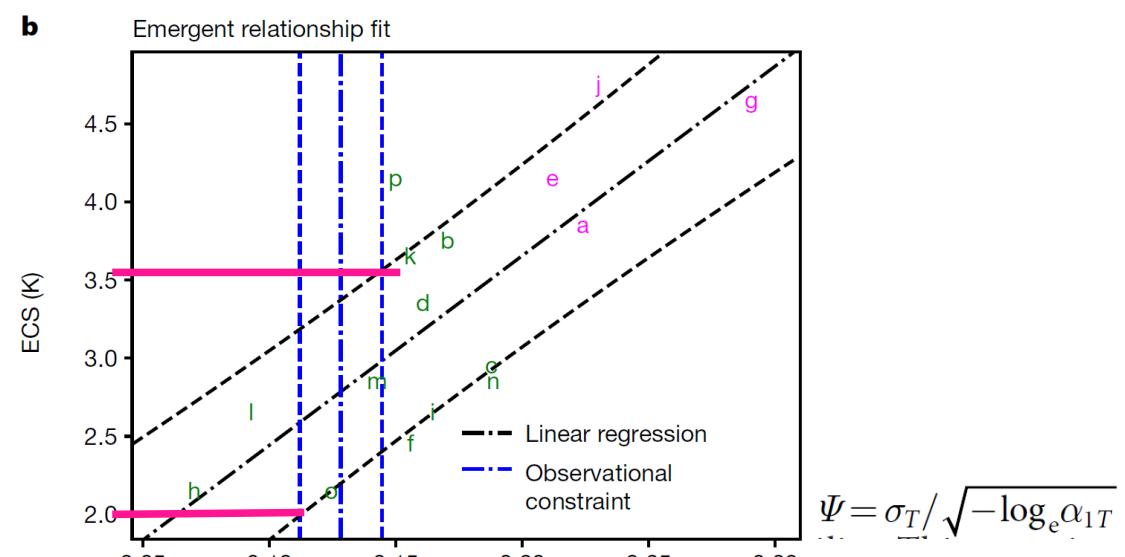
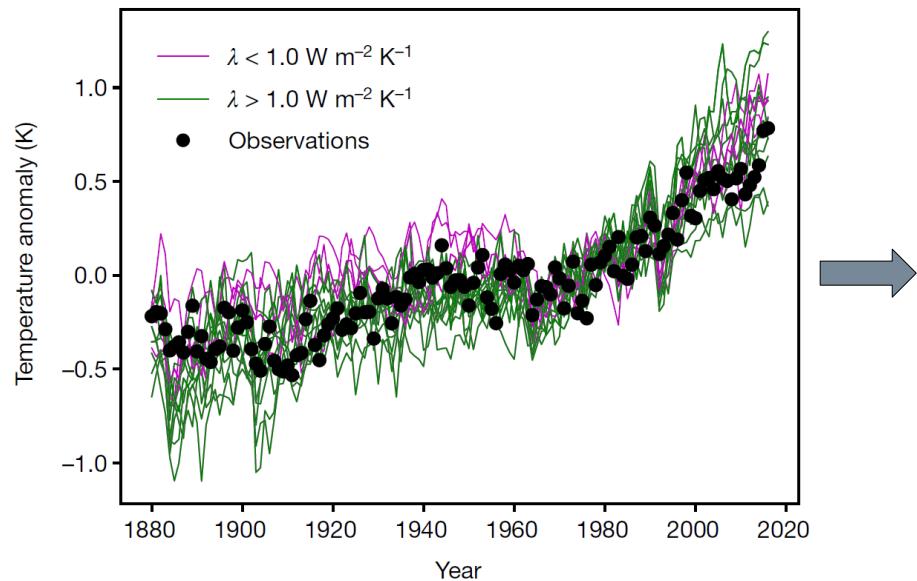
Связь между наблюдаемой  $X$  и ненаблюдаемой переменной  $Y$  вида

$$Y = f(X) + \epsilon$$

$f(X)$  – межмодельная связь,  
 $\epsilon$  – шум



[Cox et al., 2018]



$\sigma_T$  – СКО температуры после исключения тренда

$\alpha_{1T}$  – коэффициент автокорреляции с лагом 1 после исключения тренда

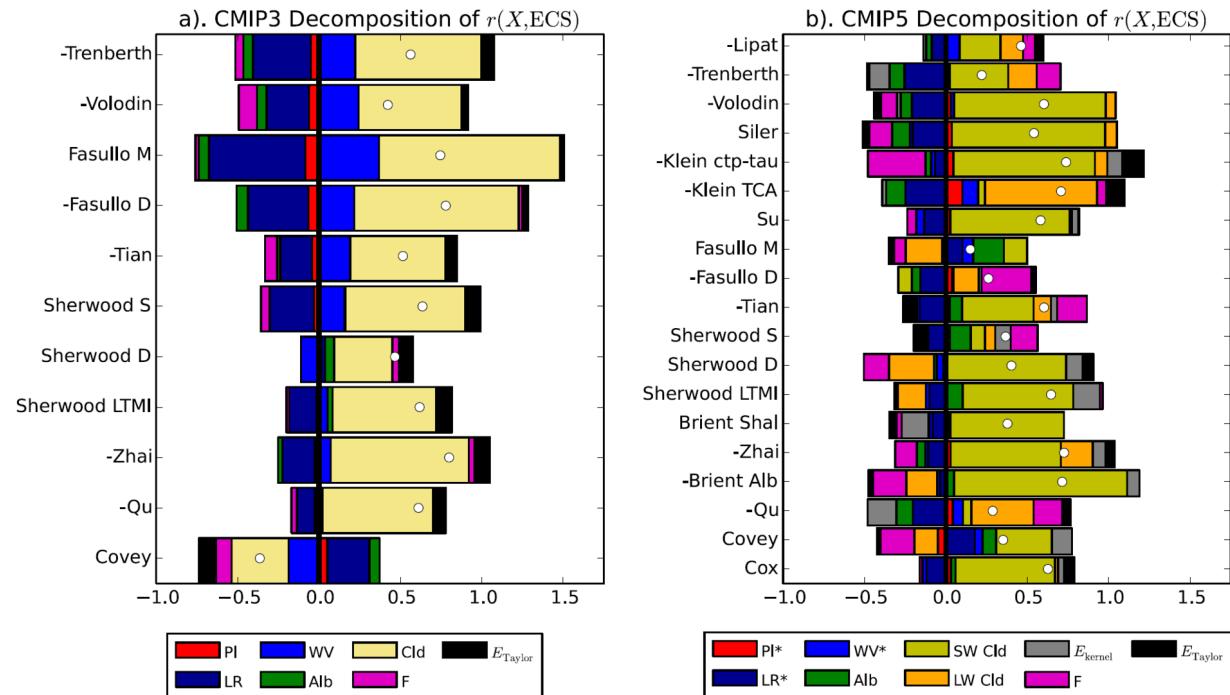
# Обобщённые (межмодельные) связи (emergent constraints) (2)

## [Caldwell et al.. 2018]

Covey	Amplitude of seasonal cycle of surface temperature
Volodin	Difference between tropical and Southern Hemisphere midlatitude total cloud fraction
Trenberth	Net TOA radiation averaged over the Southern Hemisphere
Fasullo D	Southern Hemisphere zonal-average midtropospheric RH in the dry zone between 8.5° and 20°S
Fasullo M	Tropical zonal-average lower-tropospheric RH in moist-convective region
Qu	BL cloud amount response to SST variations in subtropical stratocumulus regions (after removing EIS contribution)
Klein ctp-tau	Error in the distribution of cloud-top pressure and optical thickness for regions between 60°N/S
Klein TCA	Error in total cloud amount for regions between 60°N/S
Su	Error in vertically resolved tropospheric zonal-average RH between 40°N and 45°S
Sherwood D	Strength of resolved-scale mixing between BL and lower troposphere in the tropical east Pacific and Atlantic
Sherwood S	Strength of mixing between BL and lower troposphere in tropical convective regions
Sherwood LTMI	Sum of Sherwood S and D constraints
Brent Shal	Fraction of tropical clouds with tops below 850 mb whose tops are also below 950 mb
Zhai	Seasonal response of BL cloud amount to SST variations in oceanic subsidence regions between 20° and 40° latitude
Tian	Strength of double-ITCZ bias
Brent Alb	Sensitivity of cloud albedo in tropical oceanic low-cloud regions to present-day SST variations
Lipat	Latitude of the southern edge of the Hadley cell in austral summer
Siler	Extent to which cloud albedo is small in warm SST regions and large in cold SST regions
Cox	Strength of global-average surface temperature variations and temporal autocorrelation

### Из 19 общённых связей

- для 4 наличие связи подтверждено
- для остальных выявлена либо неустойчивость относительно выбора ансамбля, либо корреляция ECS с физическим процессом или регионом, не согласующаяся с исходным объяснением



# **План**

Мотивация

Источники неопределённости модельных прогнозов

Методы построения ансамблевых численных экспериментов

Методы обработки ансамблевых численных экспериментов

**«Подводные камни»**

Примеры ансамблевых расчётов

Выводы

# Осреднение со взвешиванием. Математика [Weigel et al., 2010] (1)

Будущее изменение  $x$ :

$$\Delta x = \Delta\mu + v_x,$$

$\Delta\mu$  – вынужденный (потенциально предсказуемый) сигнал,  $v_x$  – естественная изменчивость.

Для модели  $M$ :

$$\Delta y_M = \Delta\mu + v_M + \epsilon_M,$$

$\epsilon_M$  – систематическая ошибка (bias; ошибка, которая не исчезает при бесконечном удлинении ряда).

Предположения:

1.  $E(v_x) = E(v_M) = E(\epsilon_M) = 0$ .
2.  $v_x$ ,  $v_M$  и  $\epsilon_M$  статистически независимы.
3.  $v_x$  and  $v_M$  – реализации одного и того же стохастического процесса с СКО  $\sigma_v$ .

Метрика качества модели:

$$S_M = \langle (\Delta y_M - \Delta x)^2 \rangle.$$

Вне зависимости от типа взвешивания можно показать, что при  $N_{mem} \rightarrow \infty$

$$\Delta y_M \rightarrow \Delta\mu$$

$$S_m \rightarrow \sigma_v^2.$$

# Осреднение со взвешиванием. Математика [Weigel et al., 2010] (2)

Пусть  $N_{\text{mem}} = 2$

Осреднение с однородным взвешиванием ( $w = 1 / N_{\text{mem}} = 1/2$ ):

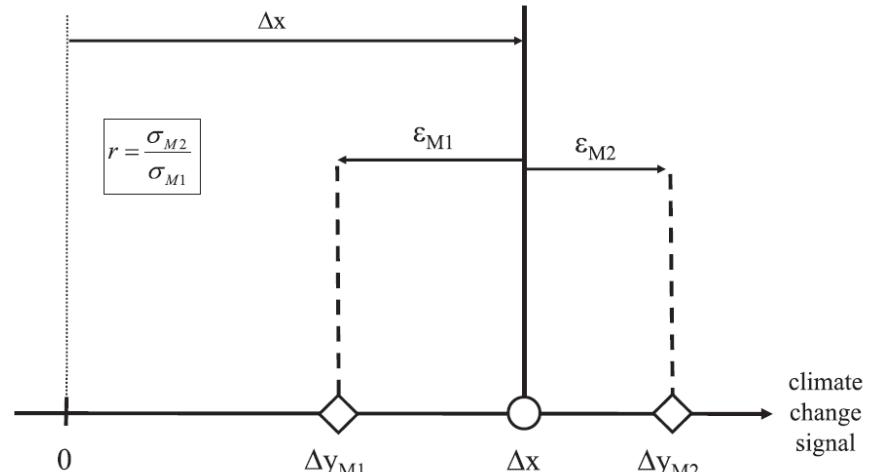
$$\Delta y^{(\text{eq})} = \Delta x + (\epsilon_{M1} + \epsilon_{M2}) / 2,$$

$$S^{(\text{eq})} = \sigma_{M1}^2 (1 + r^2) / 4.$$

$$r = \sigma_{M2} / \sigma_{M1}$$

Если  $0 < r < 1$ , то  $S^{(\text{eq})} < (S_1 + S_2) / 2$ .

Если  $r > 3^{-1/2}$ , то  $S^{(\text{eq})} < S_1, S_2$ .



Осреднение с "оптимальными" весами:

$$\Delta y(w) = w \Delta y_1 + (1 - w) \Delta y_2.$$

Веса оптимальны ( $S^{(w)} = \min$ ) при

$$w = w^{(\text{opt})} = r^2 / (1 + r^2),$$

Если  $r \rightarrow 1$ , то  $w^{(\text{opt})} \rightarrow 1/2$ .

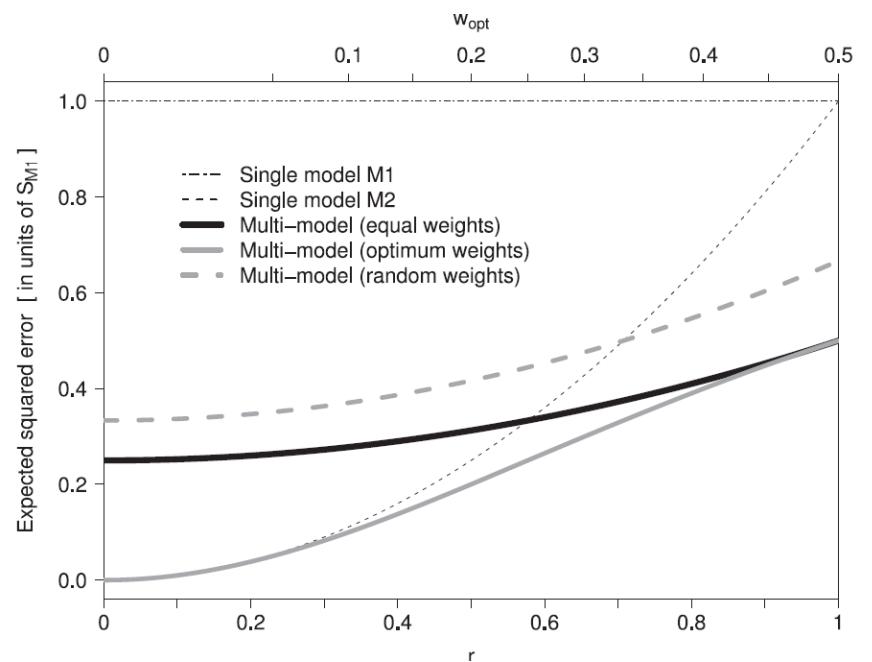
и

$$S^{(\text{opt})} = \sigma_{M1}^2 r^2 / (1 + r^2) \leq S^{(\text{eq})}.$$

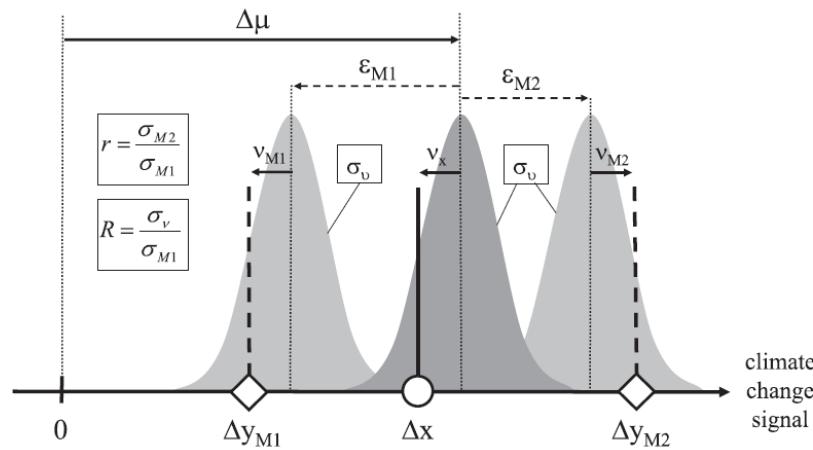
(равенство только при  $r = 1$  ).

Осреднение со случайными весами:

$$S^{(\text{rand})} = \int_0^1 S^{(w)} dw = \sigma_{M1}^2 (1 + r^2) / 3 \geq S^{(\text{eq})}.$$



# Осреднение со взвешиванием. Математика [Weigel et al., 2010] (3). Влияние естественной изменчивости



$$w^{(opt)} = (r^2 + R^2) / (1 + r^2 + R^2).$$

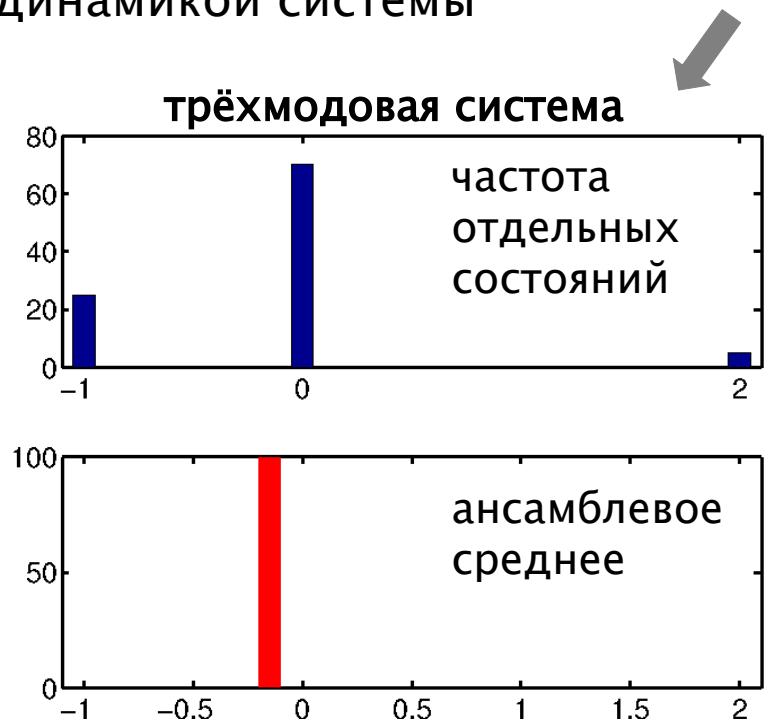
Если  $R \gg r$ ,  $R \gg 1$ , то

$$w^{(opt)} = 1,$$

и веса сильно неоптимальны – см. пример при  $r=1$ .

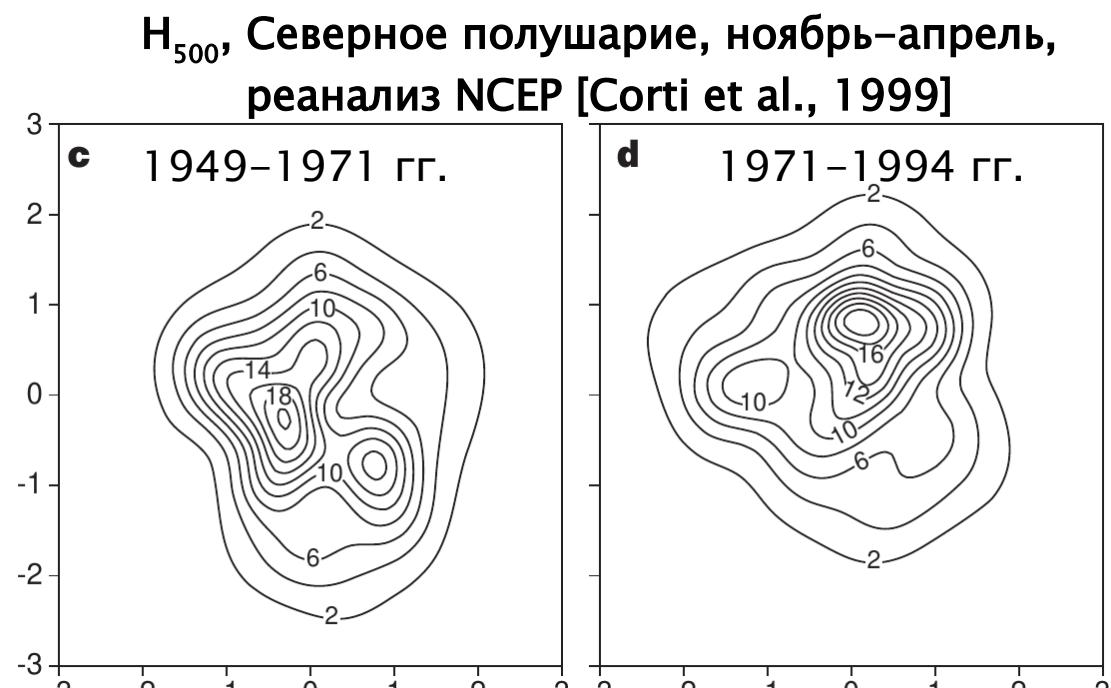
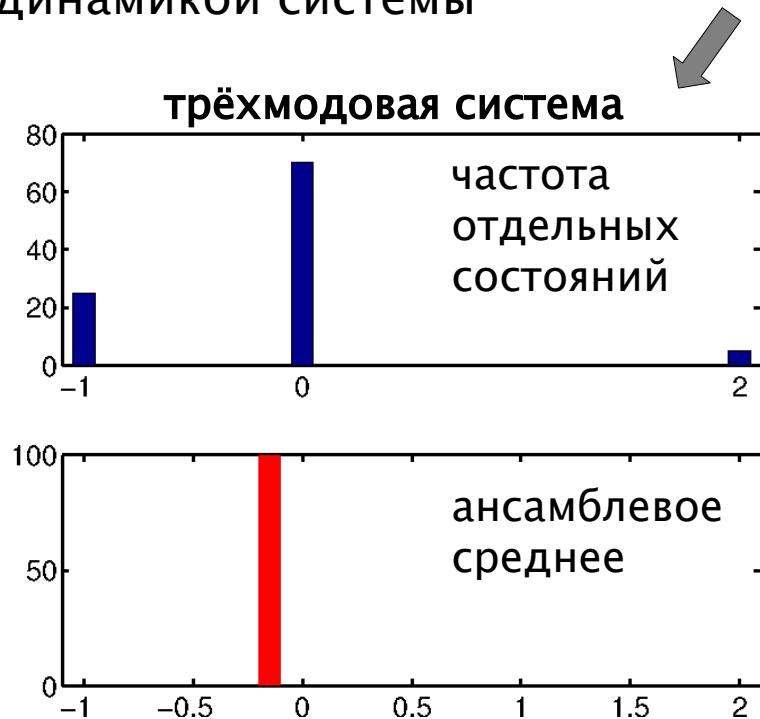
# Ансамблевое осреднение дискретных состояний

Для систем с дискретными состояниями и быстрыми переходами между ними ансамблевое осреднение может привести к состоянию, которое несовместимо с динамикой системы



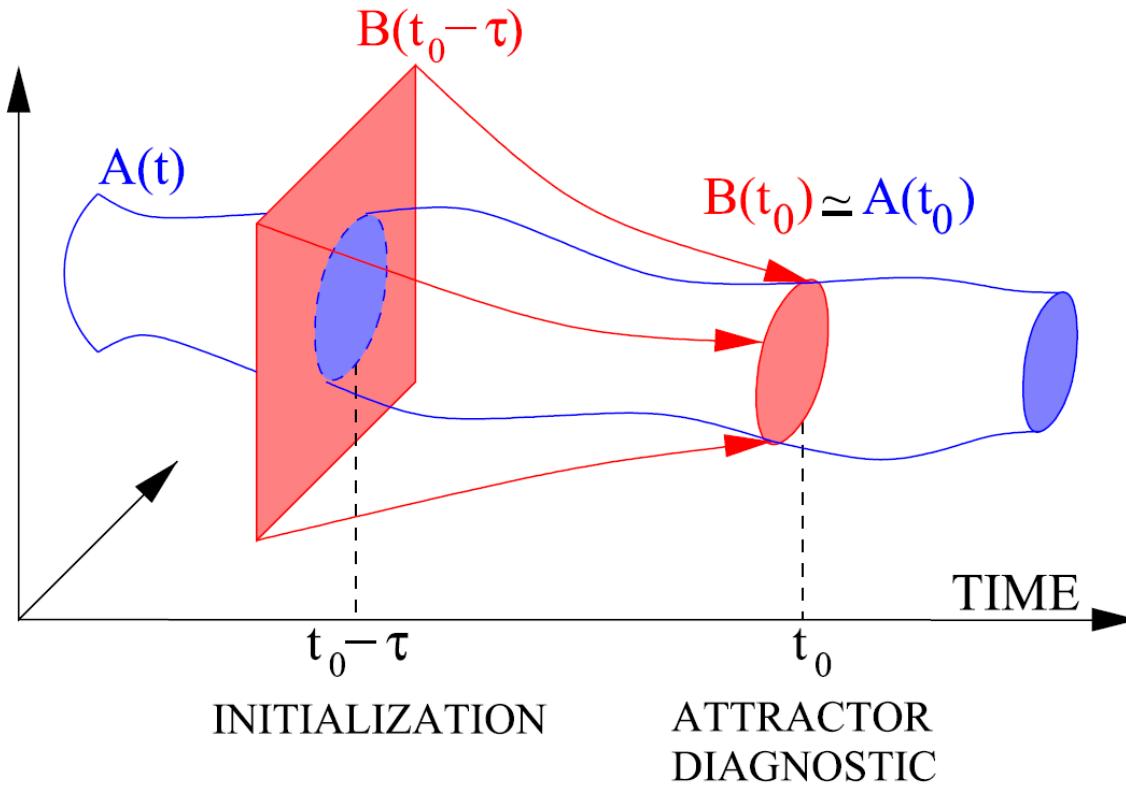
# Ансамблевое осреднение дискретных состояний

Для систем с дискретными состояниями и быстрыми переходами между ними ансамблевое осреднение может привести к состоянию, которое несовместимо с динамикой системы



Возможно, что атмосфера – пример такой системы

# Обобщение понятия аттрактора на неавтономные системы: pullback-аттрактор (snapshot-аттрактор)



[Sévellec, Fedorov, 2015]

$A(t)$  – неизвестный неавтономный аттрактор системы

$B(t_0 - \tau)$  – набор начальный условий интегрирования

$t_0$  – freezing time (время для которого вычисляется pullback-аттрактор).

В строгом определении для pullback-аттрактора  $t_0 = \infty$ , для snapshot-аттрактора  $t_0 < \infty$ , но на практике часто и для pullback-аттрактора  $t_0 < \infty$

# **План**

Мотивация

Источники неопределённости модельных прогнозов

Методы построения ансамблевых численных экспериментов

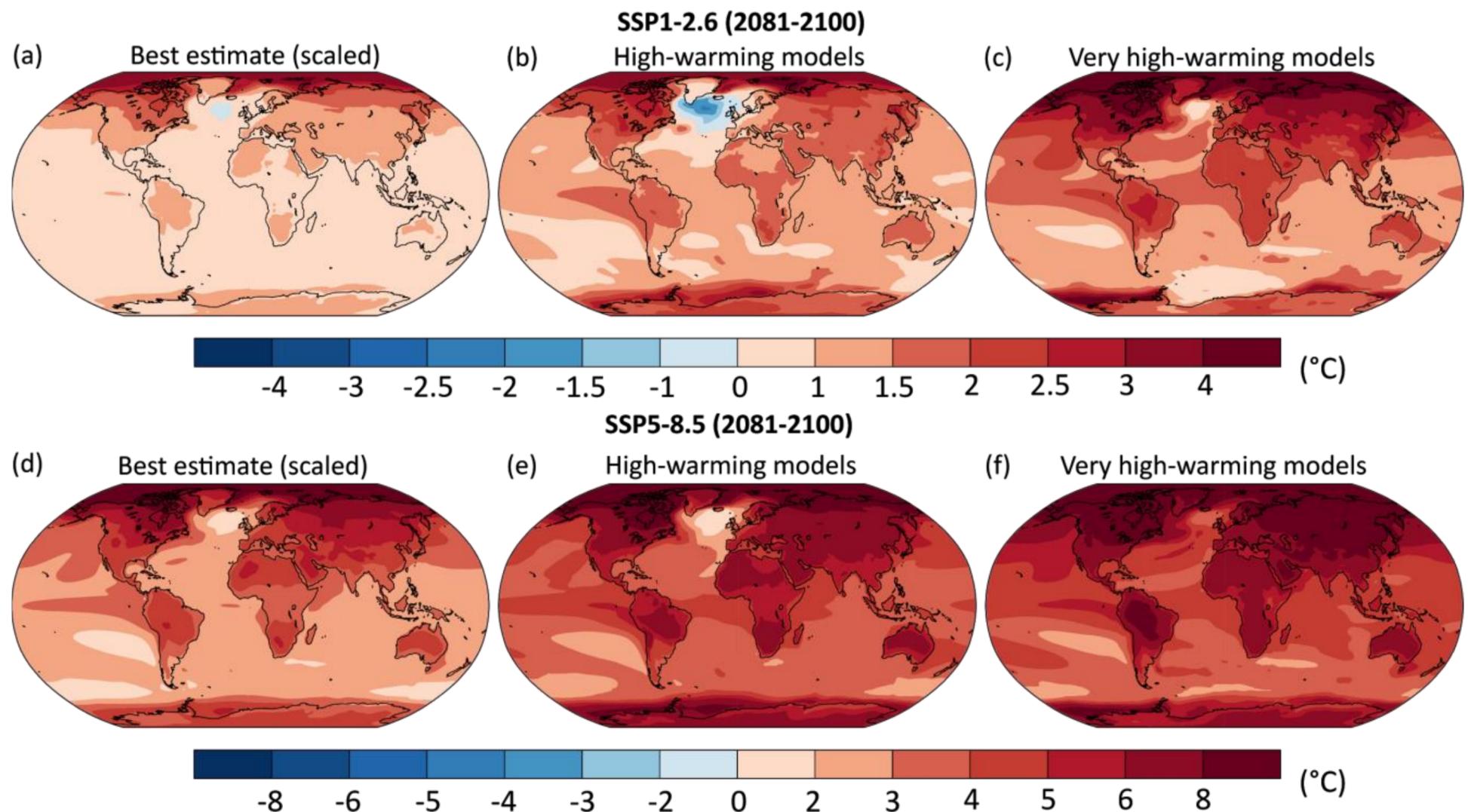
Методы обработки ансамблевых численных экспериментов

«Подводные камни»

Примеры ансамблевых расчётов

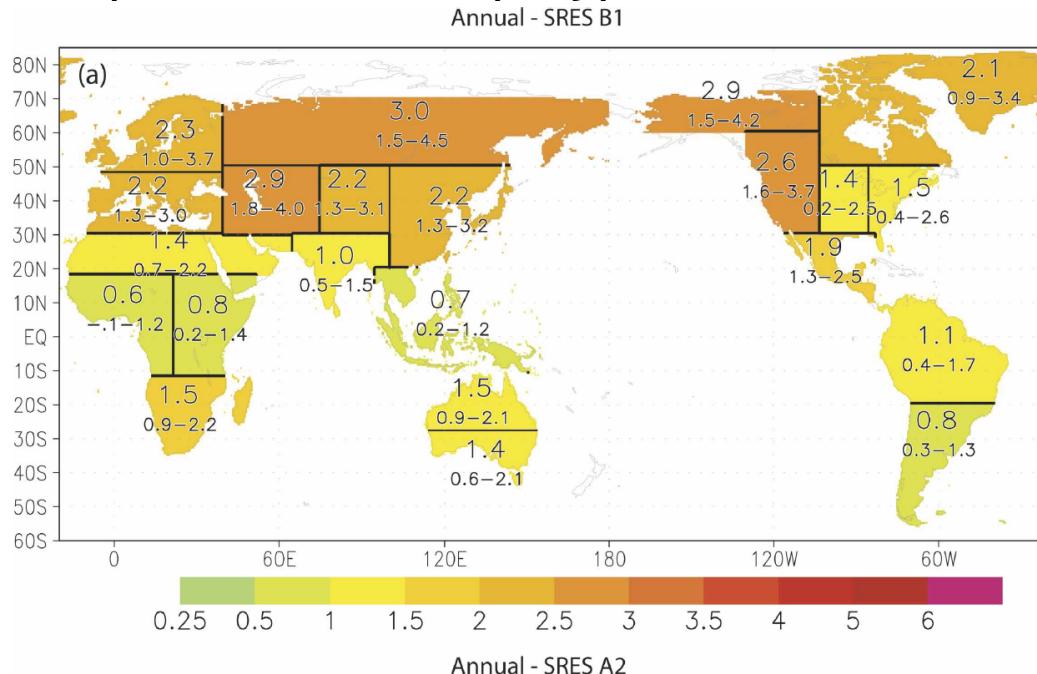
Выводы

# СМИР6: “вилка” возможных последствий [ОД6 РГ1 МГЭИК]



# Вероятностный прогноз изменений климата [Greene et al., 2006]

## Приземная температура в 2079–2098 гг. относительно 1979–1998 гг.



Ансамбль CMIP3 (14 МОЦ)

Веса: воспроизведение  
современного состояния  
(1979–1998 гг.) в  
зависимости от региона

Указаны ансамблевые  
средние и ансамблевые  
доверительные интервалы

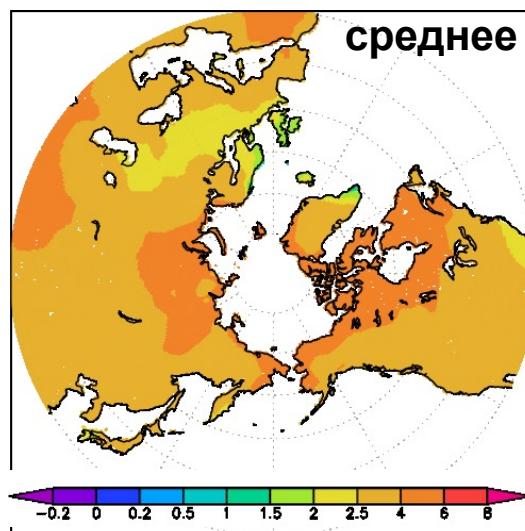
# Изменения климата средних и субполярных широт суши Северного полушария в XXI веке при сценарии SRES A1B [Arzhanov et al., 2011]

Ансамбль CMIP3 (10 моделей)

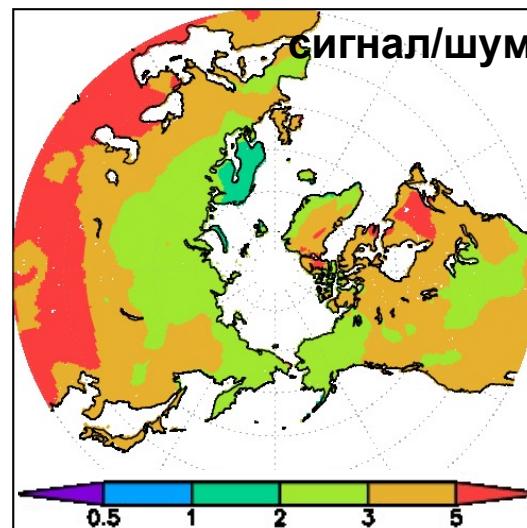
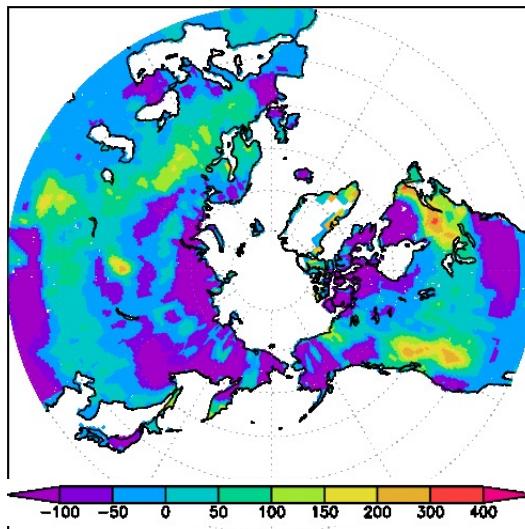
Вычисление весов:

- воспроизведение современной приземной среднегодовой температуры над сушей СП,
- воспроизведение тренда этой температуры в указанных регионах в XX веке,
- воспроизведение площади приповерхностных многолетнемёрзлых грунтов.

$\Delta T_{s,ann}$  [K]



$\Delta W_{Jul}$   
[мм/м]



Потепление  
устойчиво в  
ансамбле



Изменение  
влагосодержания  
почвы летом  
неустойчиво в  
ансамбле

# Длительность навигации на Северном морском пути [Парфенова и др., 2023]

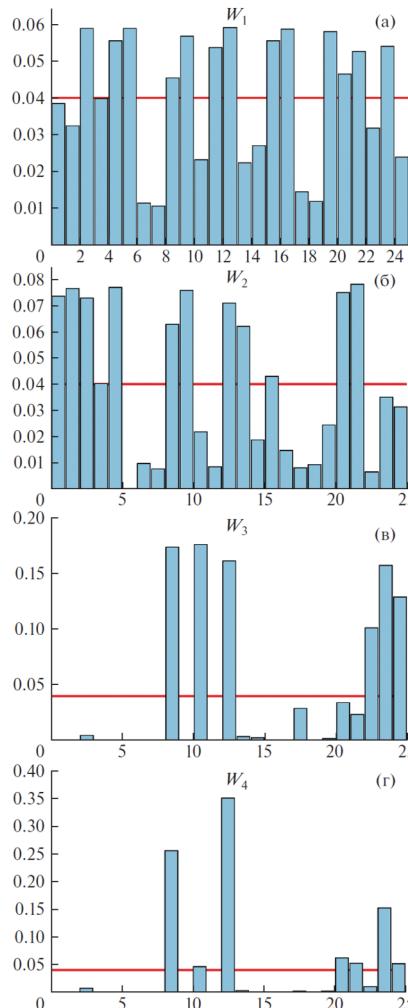
Ансамбль CMIP5, сценарий RCP8.5

Вычисление весов (по сравнению со спутниковыми данными):

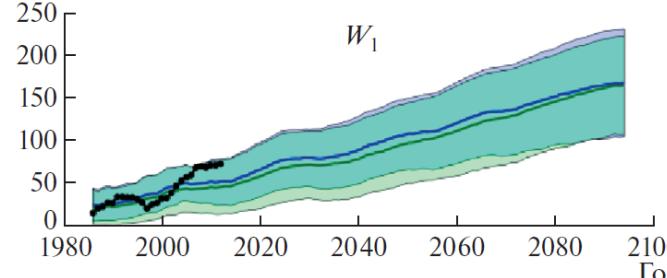
- современная длительность,
- коэффициент тренда длительности для 1980–2018 гг.
- СКО межгодовой изменчивости длительности за тот же период.

1. много-  
летнее  
среднее
2. коэф-  
фициент  
тренда
3. СКО  
межгодо-  
вой  
изменчи-  
вости
4. комби-  
нирован-  
ный

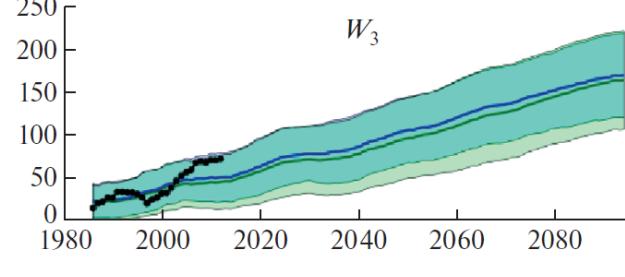
моря Лаптевых и Восточно-сибирское



Продолжительность, сут



Продолжительность, сут



Продолжительность, сут



Продолжительность, сут



Продолжительность, сут

- Взвешенное межмодельное СКО  $\sigma$
- Невзвешенное межмодельное СКО  $\sigma$
- Аns. среднее ( $W_0$ )
- Взвешенное аns. среднее
- Наблюдения SMMR

# Настройка параметров модели. Методы Монте–Карло

Апостериорное распределение вероятности вектора параметров  $\mu$  модели:

$$p(\mu | D) = L(\mu | D) p(\mu)$$

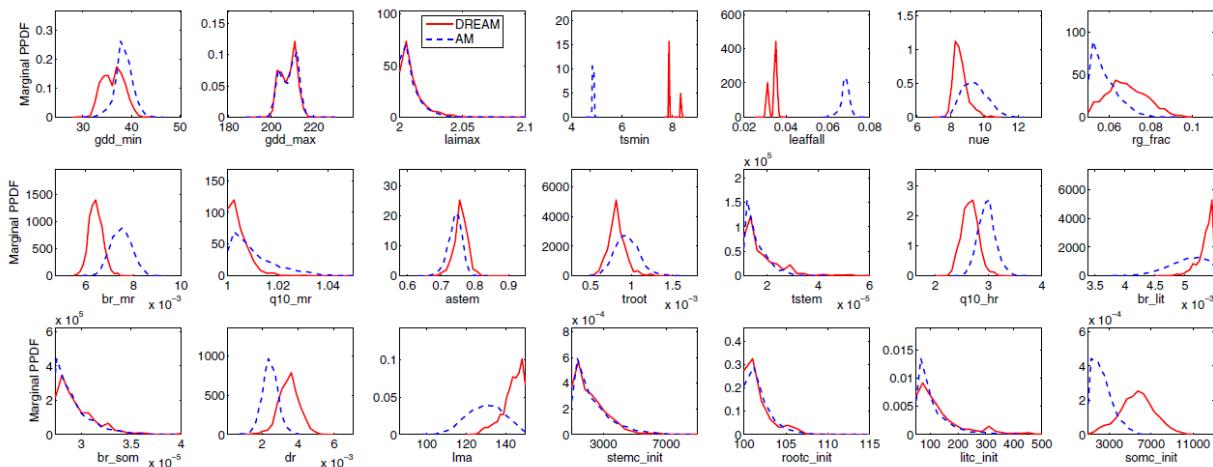
Необходим выбор функций правдоподобия  $L(\mu | D)$ , которые максимизируются

[Lu et al., 2017]: настройка параметров модели биогеохимии суши DALEC:

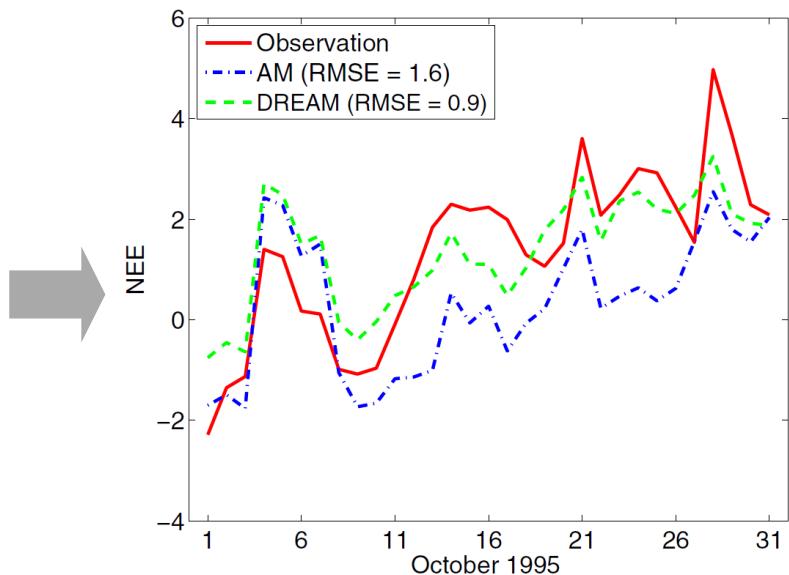
- differential evolution adaptive Metropolis (DREAM)
- adaptive Metropolis (AM) scheme

Настраивается нетто-поток CO<sub>2</sub> между атмосферой и сушей

Обучение: 1992–1994 гг.



Проверка: 1995 г.



# Настройка параметров модели. Байесово осреднение

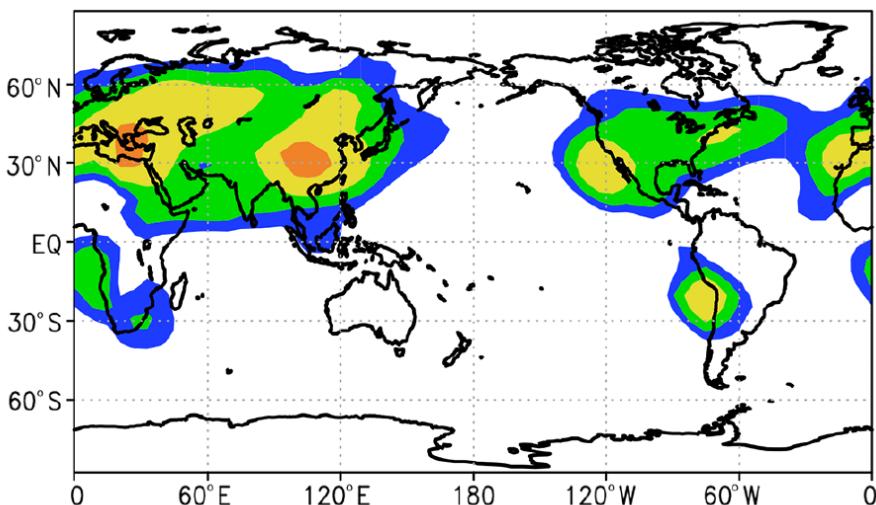
- Выборка для вектора параметров  $\mu$  модели (например, с использованием латинского гиперкуба)
- $\mu_{\text{opt}} = E(\mu | D)$

[Eliseev et al., 2021]: настройка параметров модели серного цикла атмосферы:

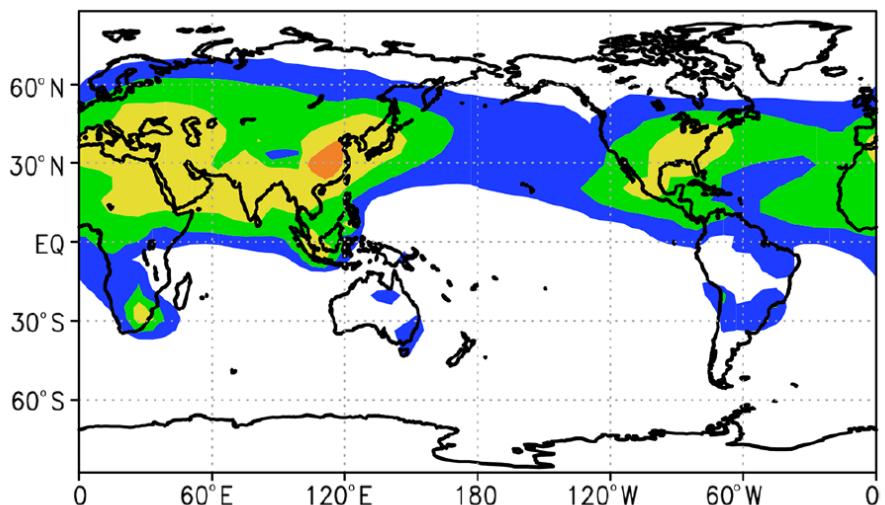
- Отбор расчётов с качеством  $S$ , достаточно близким к максимальному
- Ограничения на характеристики химических циклов (для исключения переобучения)

⇒ отобраны 40 реализаций из 5000

(d) model  $B_{SO_4}$ , ann 2000



(e) CMIP5  $B_{SO_4}$ , ann 2000



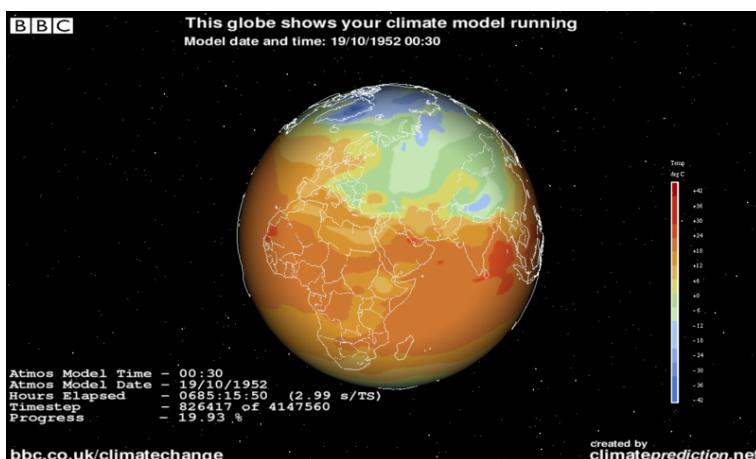
# CLIMATEPREDICTION.NET [Stainforth et al., 2005] (1)

- МОЦАО HadSM3 (HadCM3+верхний слой океана).
- Каждая реализация построена случайным выбором значения 6 параметров модели и начальных условий.
- Расчёты выполнены “облачной” технологией с использованием компьютеров отдельных пользователей-волонтёров.

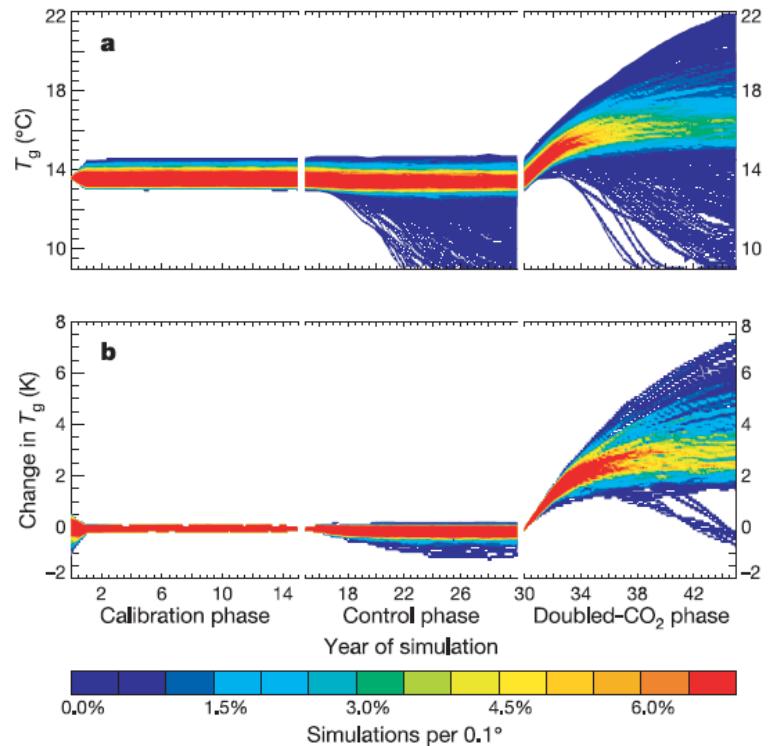
Experiment status

Summary	
Model Years	125,112,872
Active Hosts	37,320
Complete Model Simulations	
HadSM3	675,066
HadAM3	17,276
HadAM3P	517,997
FAMOUS	215,472
HadCM3L	23,794
Sulphur Cycle	14,993
Spinup	61
HadSM3MH	67,454
HadRM3P	250,802
HadAM3P-EU	121,985
HadAM3P-SAF	72,964
HadAM3P-PNW	55,853
Last Updated	03-Jul-2011 05:30:03

клиент *climateprediction.net*

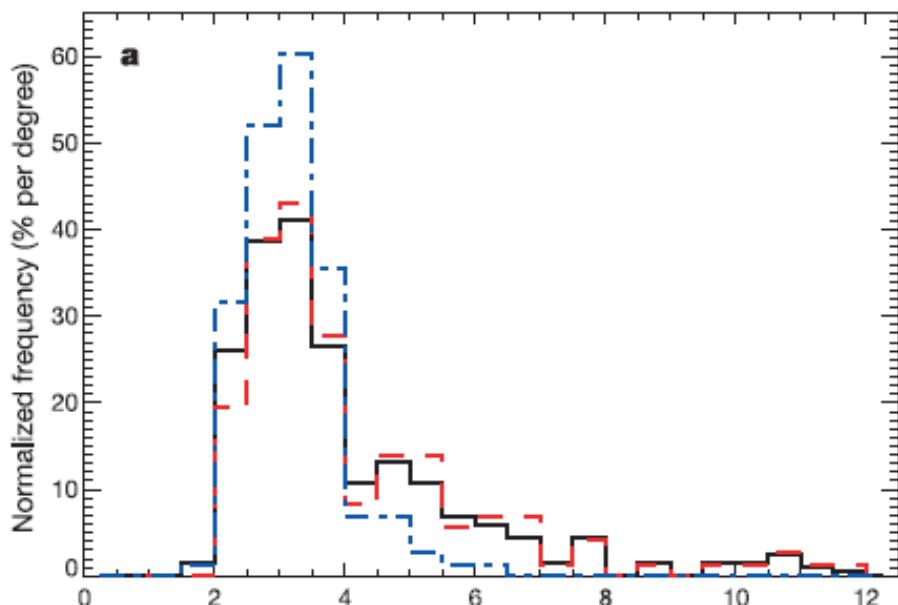


## CLIMATEPREDICTION.NET [Stainforth et al., 2005] (2)



$T_g$  (2017 расчётов)

Подобно предыдущему, но после исключения вычислительно неустойчивых расчётов и после осреднения по начальным условиям.



Апостериорное распределение  
 $\Delta T_{2^*CO2}$

# QUMP: Quantifying Uncertainty in Model Predictions

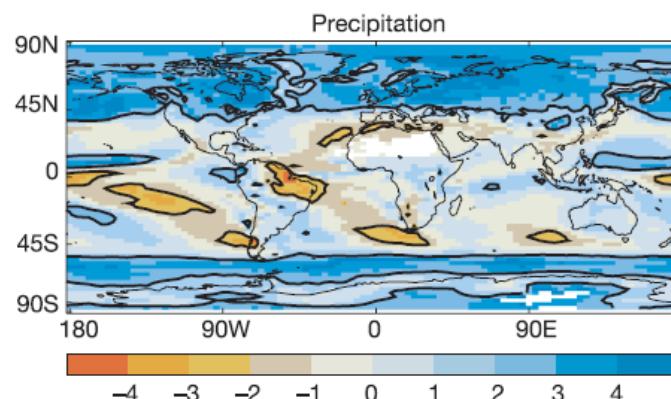
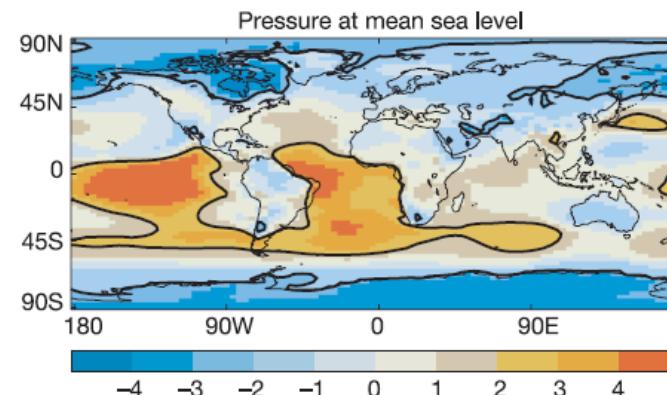
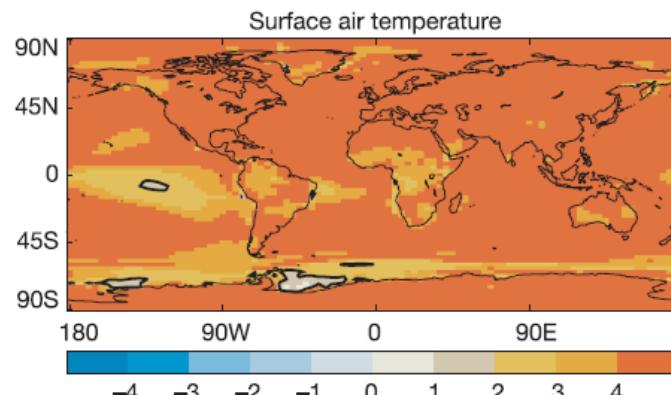
[Murphy et al., 2004]

- HadSM3 GCM.
- Each member is constructed by randomly selecting values of 29 numerical parameters of the model and initial conditions for simulations.

**2\*CO<sub>2</sub> response:**

$$r_x = \Delta X / \sigma_x,$$

$\sigma_x$  - inter-model STD



## Выводы

- Модельные ансамбли позволяют оценить неопределённость, связанную с начальными условиями, численными коэффициентами моделей, их структурой и сценариями внешних воздействий.
- Как правило, среднее по ансамблю лучше согласуется с данными наблюдений по сравнению с отдельными моделями, в том числе “лучшими”.
- Постановка модельных экспериментов должна учитывать знания о распределении параметров интегрирования и приводить к несмешённой ансамблевой статистике
- Эффективность методов статистической обработки ансамблевых численных экспериментов может быть повышена за счёт выбора веса (правдоподобия) для каждой из реализаций внутри ансамбля. Однако при выборе веса всегда в той или иной мере приходится руководствоваться эвристическими соображениями. В ряде случаев (например, при анализе отклика на различные сценарии внешнего воздействия SSP) построение ансамблевой статистики невозможно
- Ансамблевые эксперименты могут быть использованы при настройке моделей