

Глобальные климатические изменения

Александр Чернокульский

*Старший научный сотрудник Лаборатории теории климата
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук*

Ученый секретарь Научного совета РАН по проблемам климата Земли

a.chernokulsky@ifaran.ru

28 октября 2020

Международного центр зеленых технологий и инвестиционных проектов
Green webinar «Глобальные и региональные тенденции в изменении климата»

-
- **Климат и его современные изменения**
 - Причины изменчивости климата
 - Парниковый эффект и основные доказательства антропогенного характера современного потепления
 - Обратные связи в климате
 - Уникально ли потепление?
 - Проекция климата на 21 век

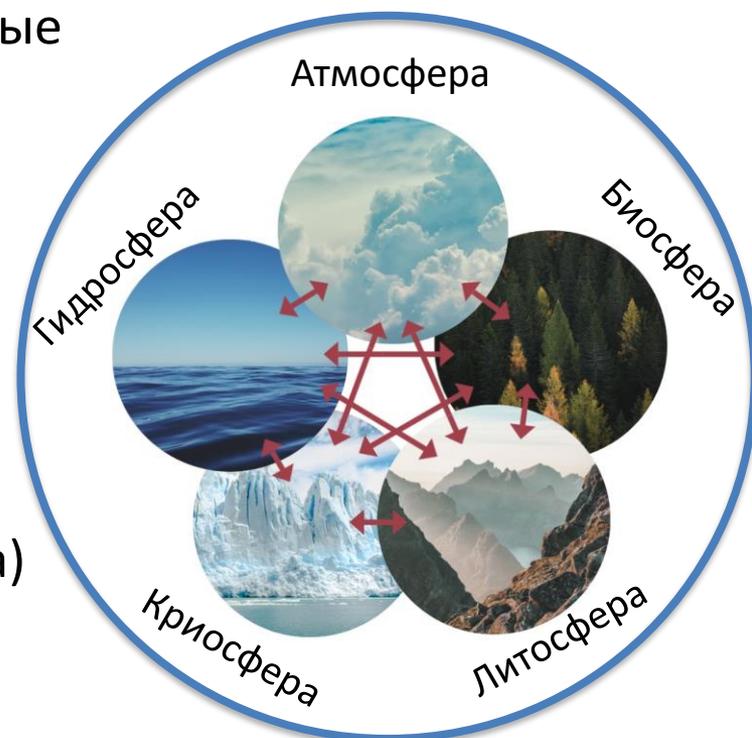
Цели устойчивого развитие и изменение климата



Цель № 13: Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями

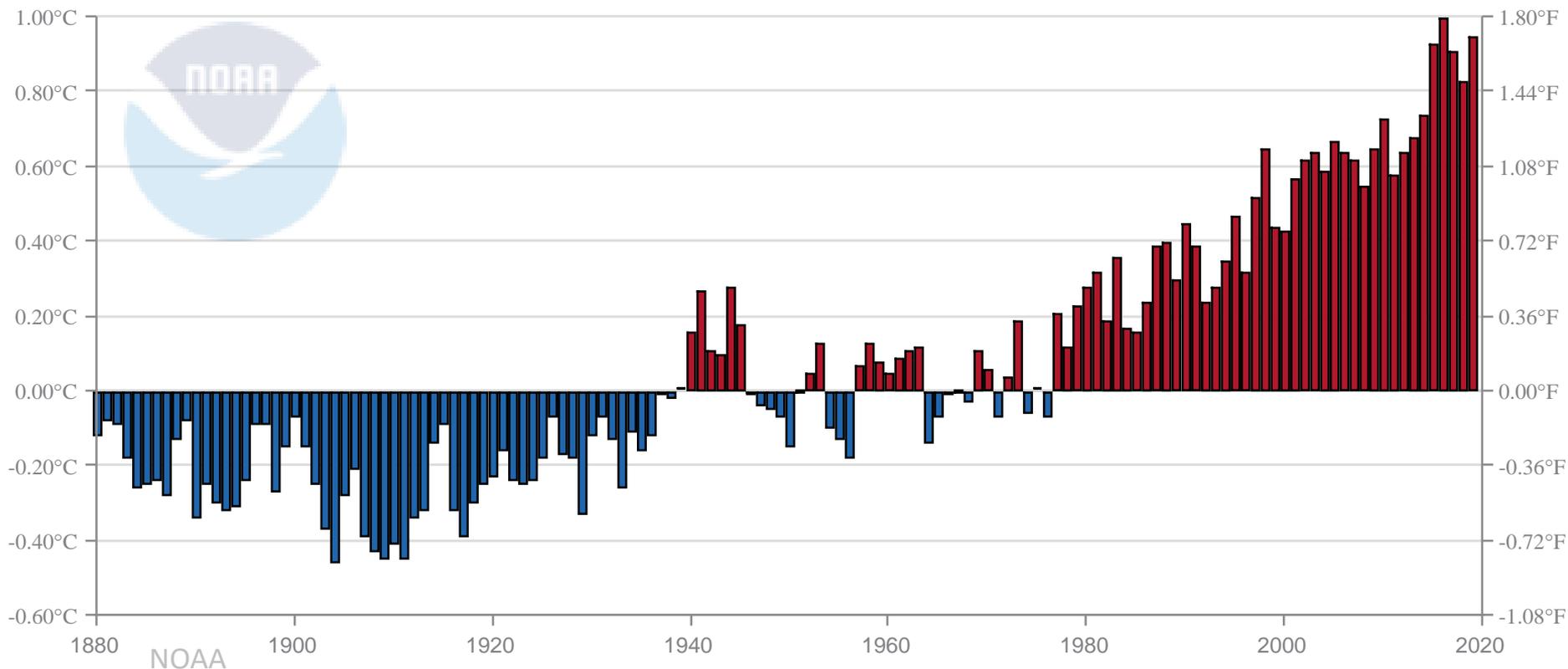
Изменение климата – современные глобальные изменения климата, которые являются следствиями антропогенной деятельности (сжигание ископаемого топлива, природопользование и т.д.).

Климат – ансамбль состояний, принимаемый климатической системой (атмосфера, гидросфера, биосфера, литосфера, криосфера) за достаточно длительный интервал времени (обычно не менее 30 лет).



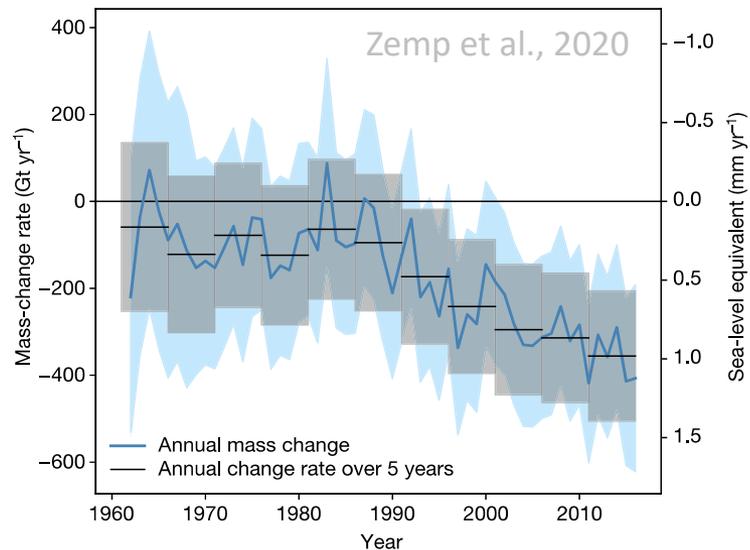
Современное потепление

Аномалии глобальной приземной температуры воздуха
(относительно средней за 1901–2000 гг.)

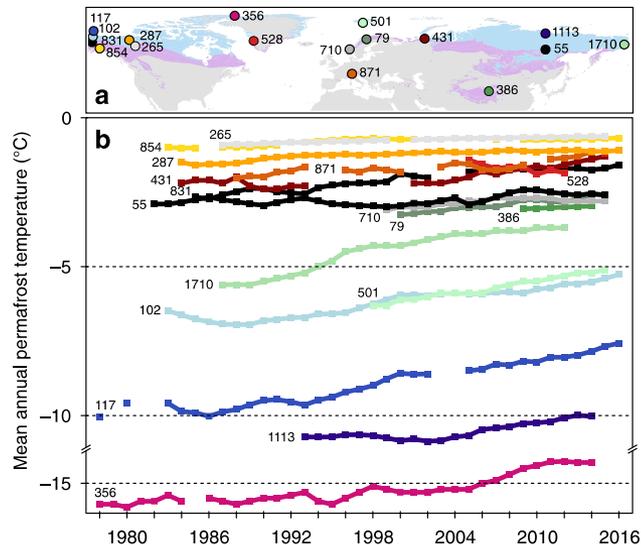


Изменения климата: не только температура

Масса горных ледников



Температура вечной мерзлоты

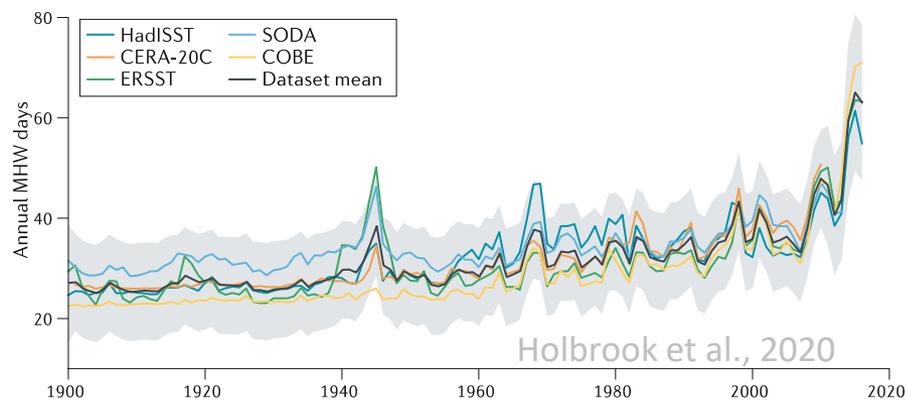


Biskaborn et al., 2019

Уровень океана

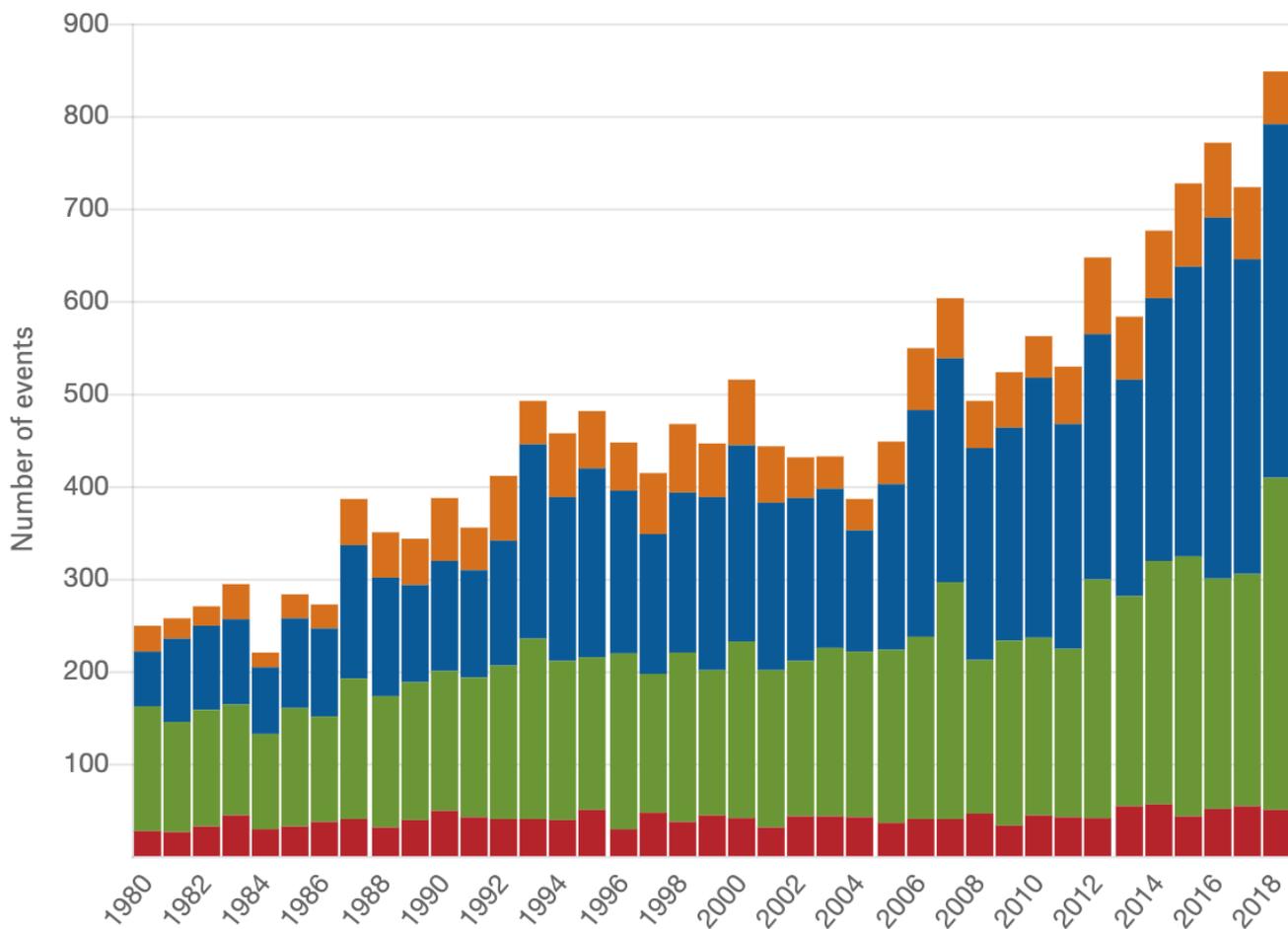


Морские волны жары



Рост числа природных катастроф

Number of relevant natural loss events worldwide 1980 - 2018



Количество природных катастроф в год (в мире в целом)

Волны жары, лесные пожары, засухи

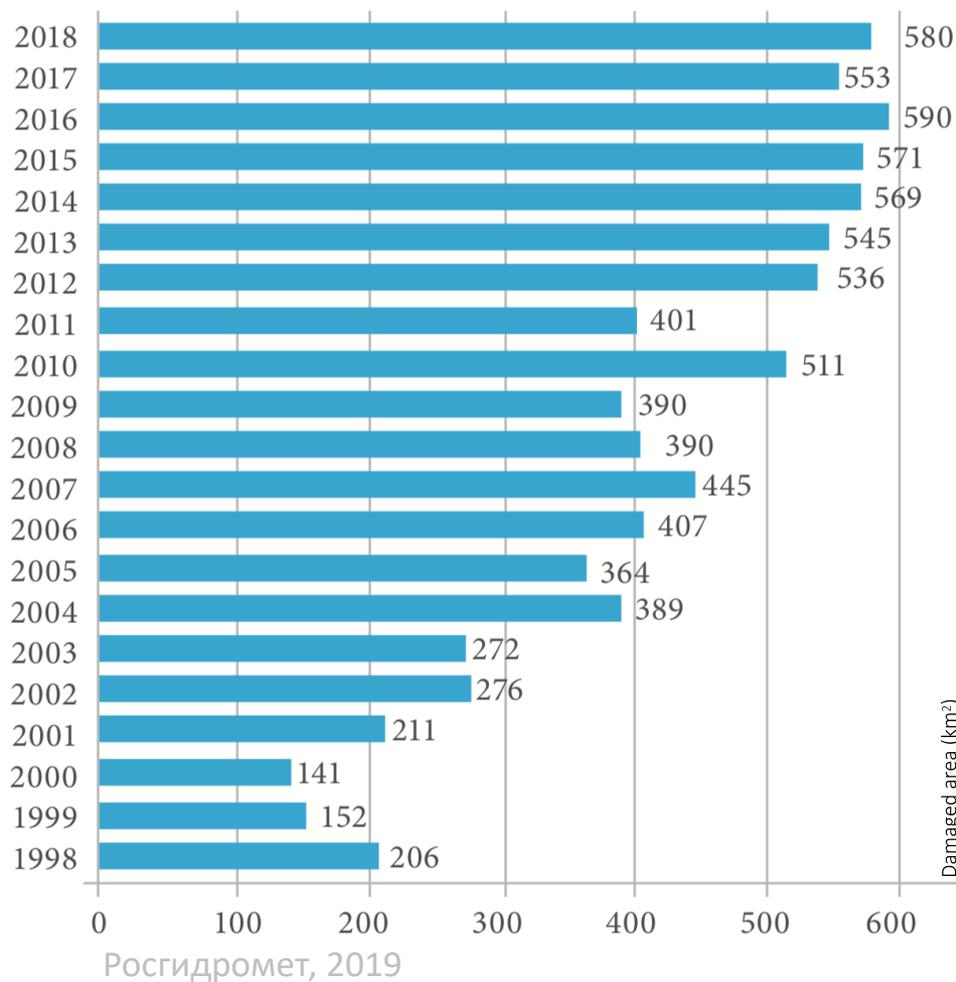
Наводнения, сели, оползни

Тропические и внетропические циклоны, конвективные явления (шквалы, смерчи, град, ливни)

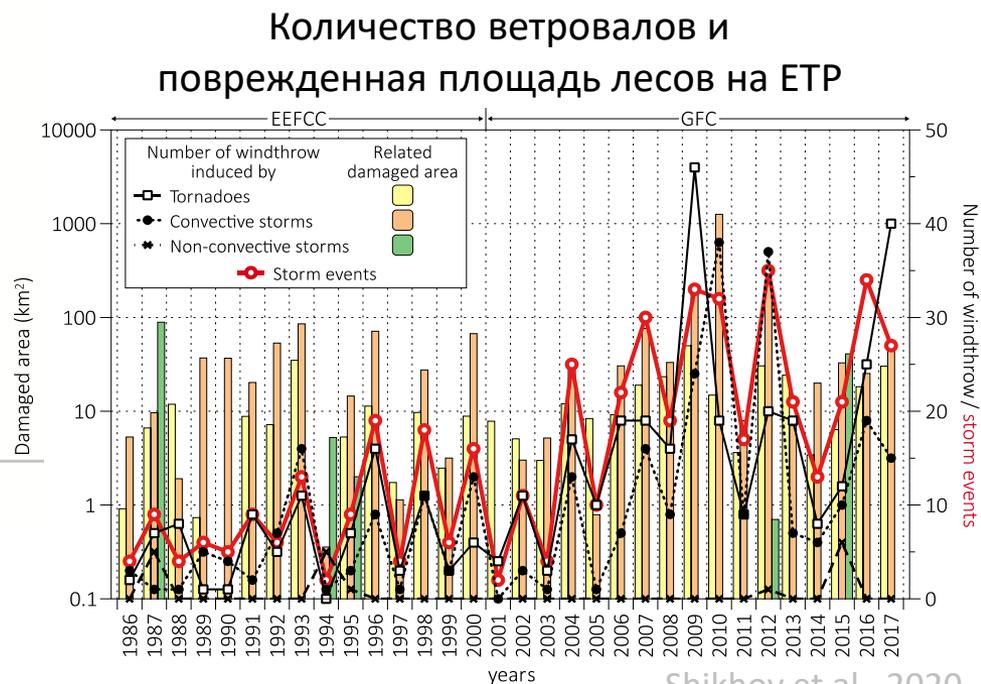
Землетрясения, цунами, извержения вулканов

“Natural catastrophes 2018”,
Munic RE annual report, 2019

Рост числа природных катастроф



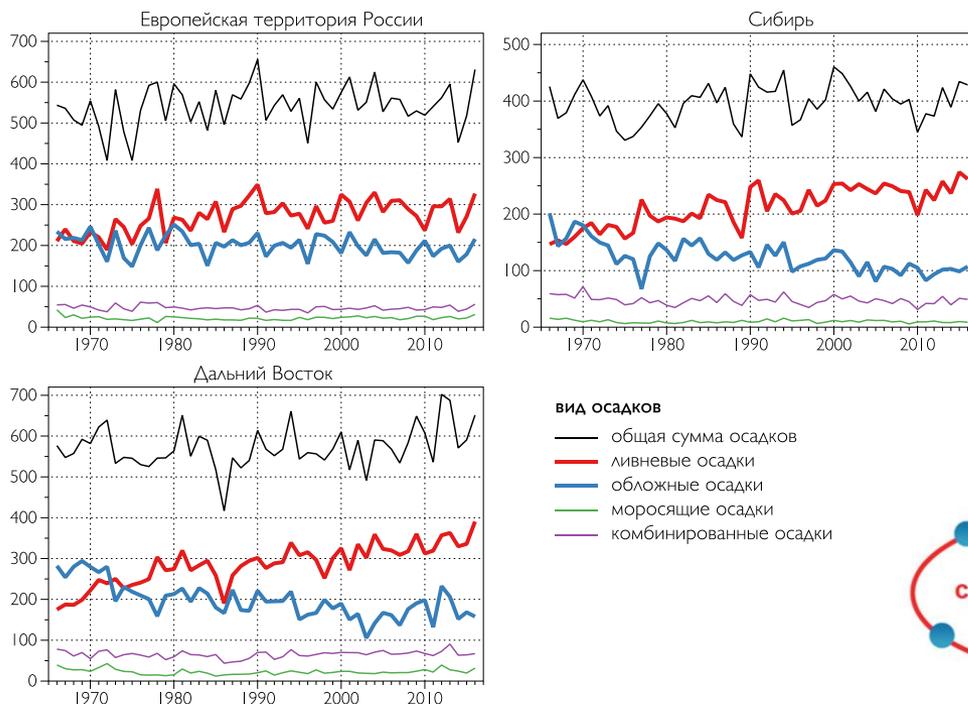
Количество опасных гидрометеорологических событий в России



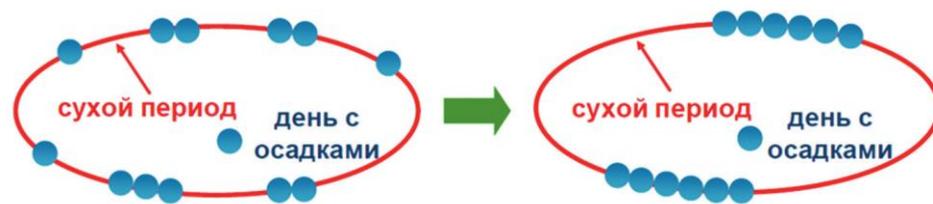
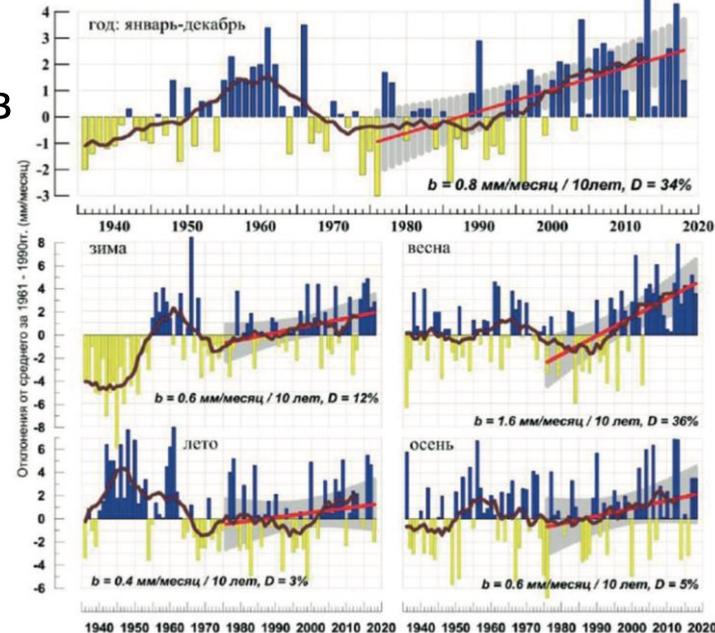
Изменение характера осадков в России

Росгидромет, 2019

Динамика средних годовых и средних сезонных аномалий месячных сумм осадков (мм/месяц), осредненных по России



Chernokulsky et al, 2019



Zolina et al., 2013

Длиннее сухой период: чаще и сильнее засухи

Кластеризация дождливых дней: растет риск наводнений

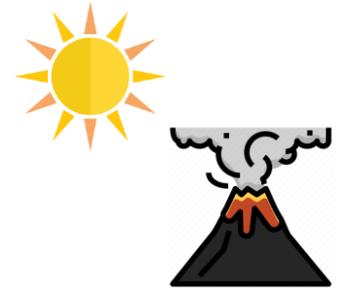
Меняется характер осадков: становится больше сильных ливней

-
- Климат и его современные изменения
 - **Причины изменчивости климата**
 - Парниковый эффект и основные доказательства антропогенного характера современного потепления
 - Обратные связи в климате
 - Уникально ли потепление?
 - Проекция климата на 21 век

Факторы, определяющие изменения климата

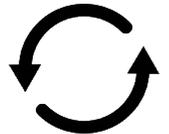
- Внешние факторы:

астрономические факторы (солнечная активность и галактические лучи); геологические факторы (извержение вулканов).



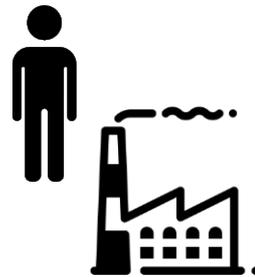
- Внутренние факторы:

элементы климатической системы, участвующие в цепочке обратных связей; внутренняя изменчивость ЗКС (на больших временных масштабах).



- Человек (внутренний фактор или внешний?):

Изменение свойств земной поверхности (выведение лесов, распашка, ветровые и гелиоэнергетические установки), изменение состава воздуха (парниковый эффект, аэрозоли, воздействие на озоновый слой и т.д.)

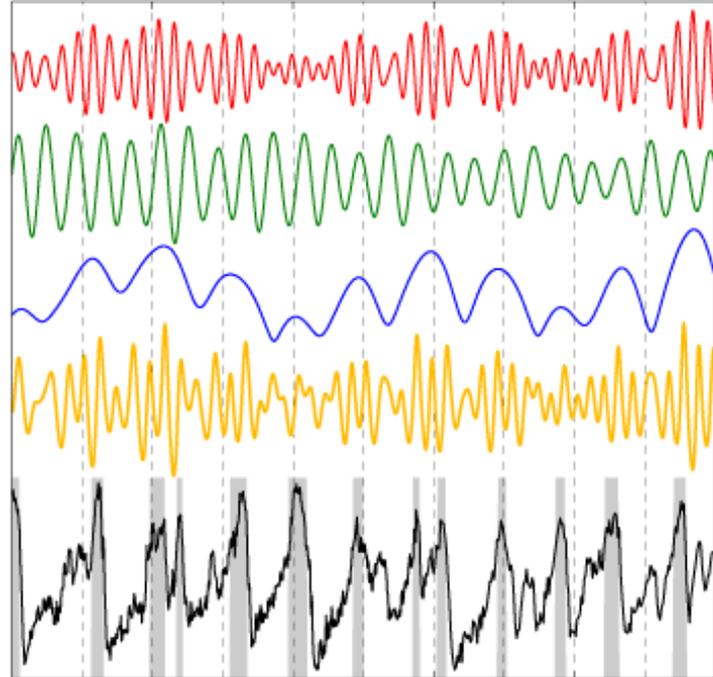


Астрономические факторы

Циклы Миланковича – долгопериодные колебания солнечной энергии, приходящей к поверхности Земли, обусловленные изменением астрономических характеристик.



Now 200 400 600 800 1000 kyr ago



Прецессия орбиты, 19, 22, 24 тыс.лет

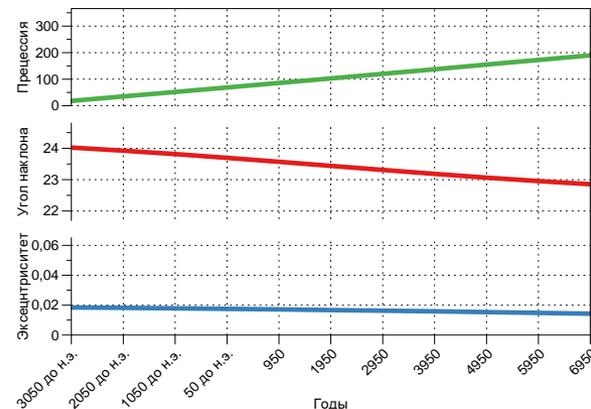
Колебания угла наклона земной оси к плоскости её орбиты, 41 тыс.лет

Эксцентриситет орбиты Земли, 95, 125, 400 тыс.лет

Приходящая солнечная энергия (лето, 65° с.ш.)

Эпохи оледенения и межледниковых периодов

Laskar et al, 2004



Солнечная активность

Изменение солнечной активности (связанное с образованием и распадом в атмосфере Солнца сильных магнитных полей).

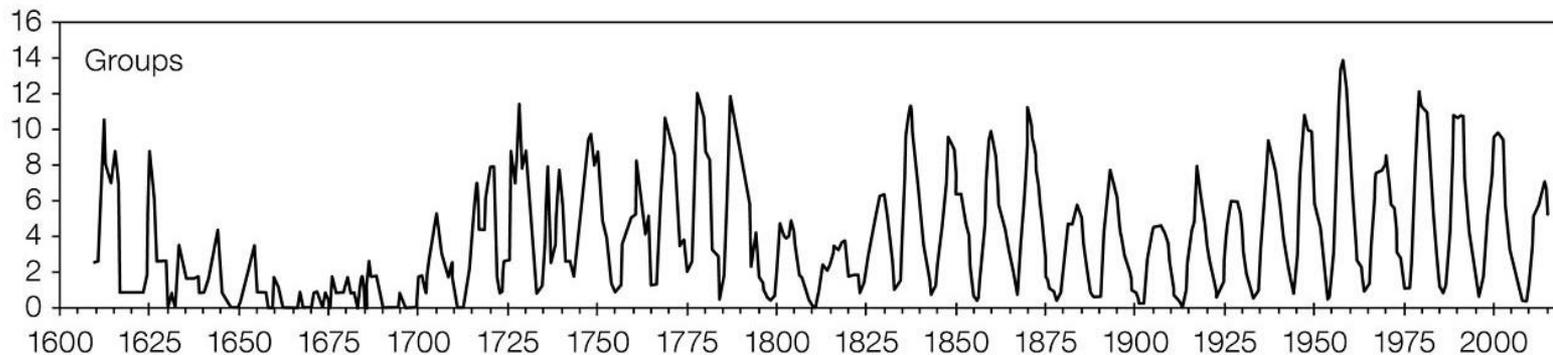
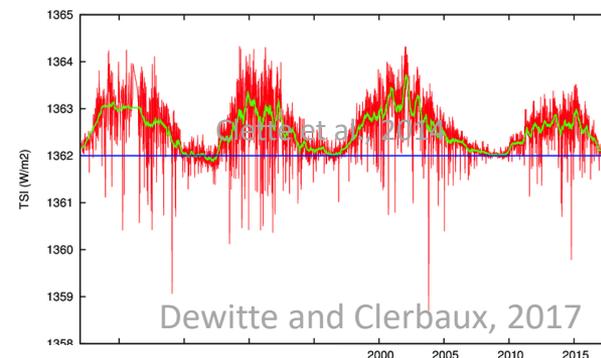
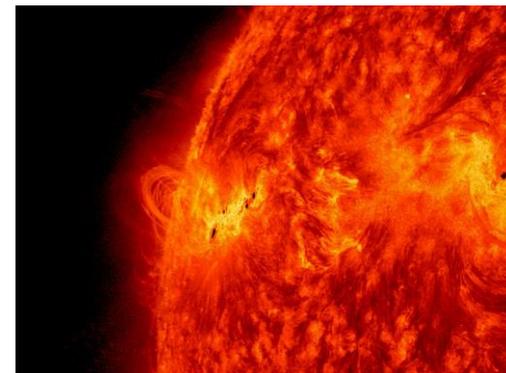
По числу солнечных пятен можно оценивать солнечную активность: т.н. числа Вольфа. Также смотрят на число групп солнечных пятен (group sunspot number).

С конца 1970х энергия от солнечное излучение, достигающее ВГА, измеряется по спутниковым данным

Циклы: 11-летний (цикл Швабе), 70-100 летний (цикл Глейсберга).

Изменчивость солнечной активности: $\sim 1 \text{ Вт/м}^2$

Для поверхности Земли: $< 0.2 \text{ Вт/м}^2$

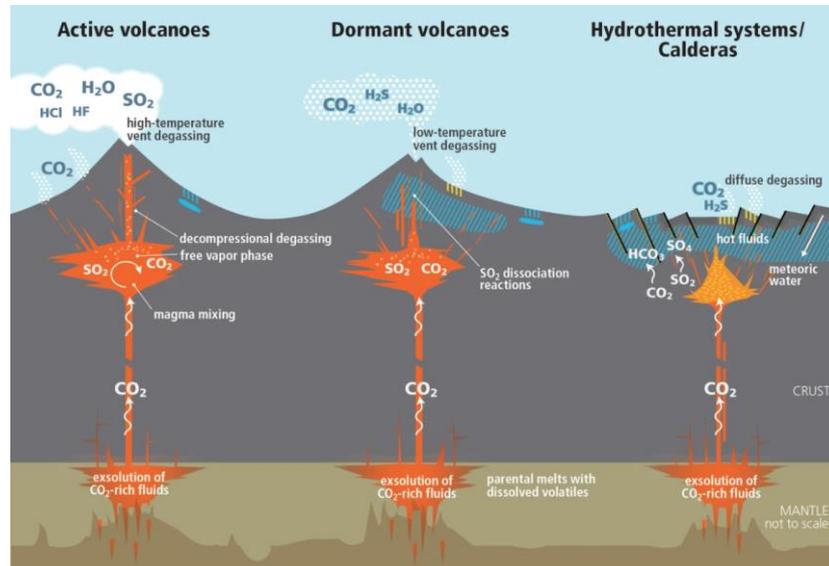


Clette et al., 2014

Влияние геологических факторов: вулканы

Крупные извержения вулканов в тропиках: выброс в стратосферу огромного количества пепла и сульфатных аэрозолей, которые создают подобие экрана, отражающего солнечную радиацию.

Это ведет к похолоданию. Периоды с повышенной вулканической активностью -> холодный климат.



Поток CO_2 от вулканов:

~**300–400** тонн CO_2 /год

Антропогенная деятельность:

~**35 млрд** тонн CO_2 /год

Извержение Пинатубо (1991):

~**42 млн** тонн CO_2

Антроп. деятельность в 1991:

~**23 млрд** тонн CO_2

Собственная изменчивость ЗКС: циклы

Некоторые циклы ЗКС
(г.о. атмосферы и океана):

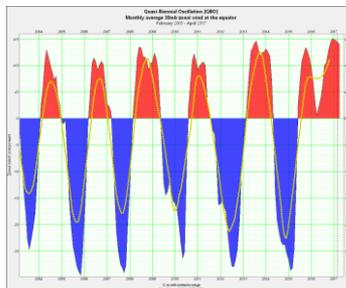
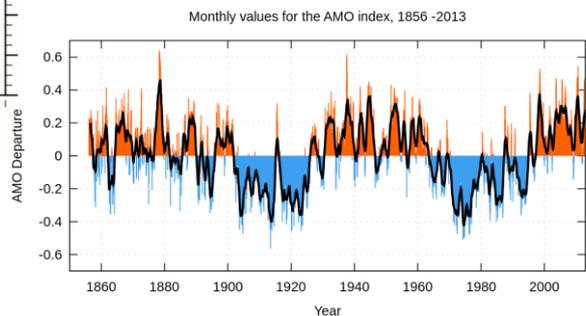
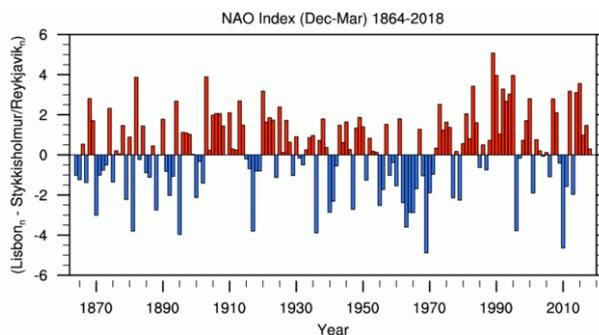
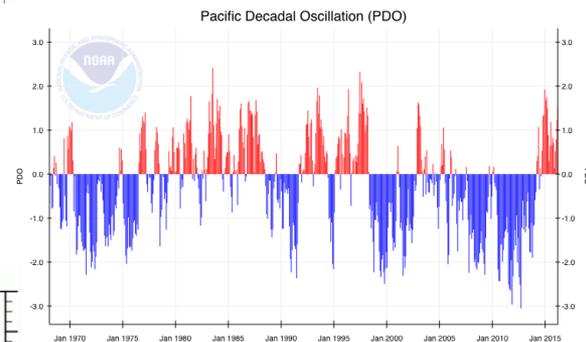
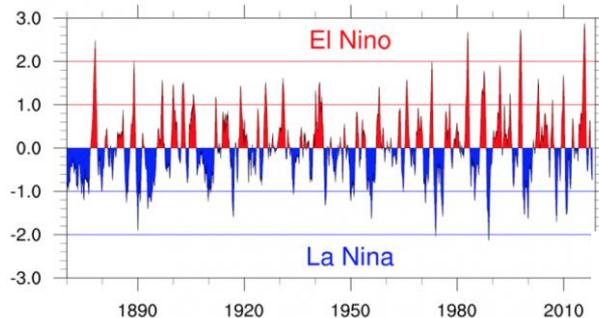
Эль-Ниньо — Южное колебание

Тихоокеанское декадное колебание

Североатлантическое колебание

Атлантическое мультидекадное колебание

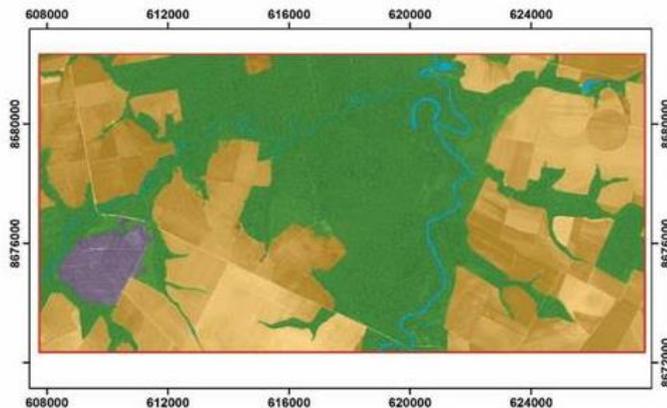
Квазидвухлетняя цикличность



NCAR/UCAR, NOAA

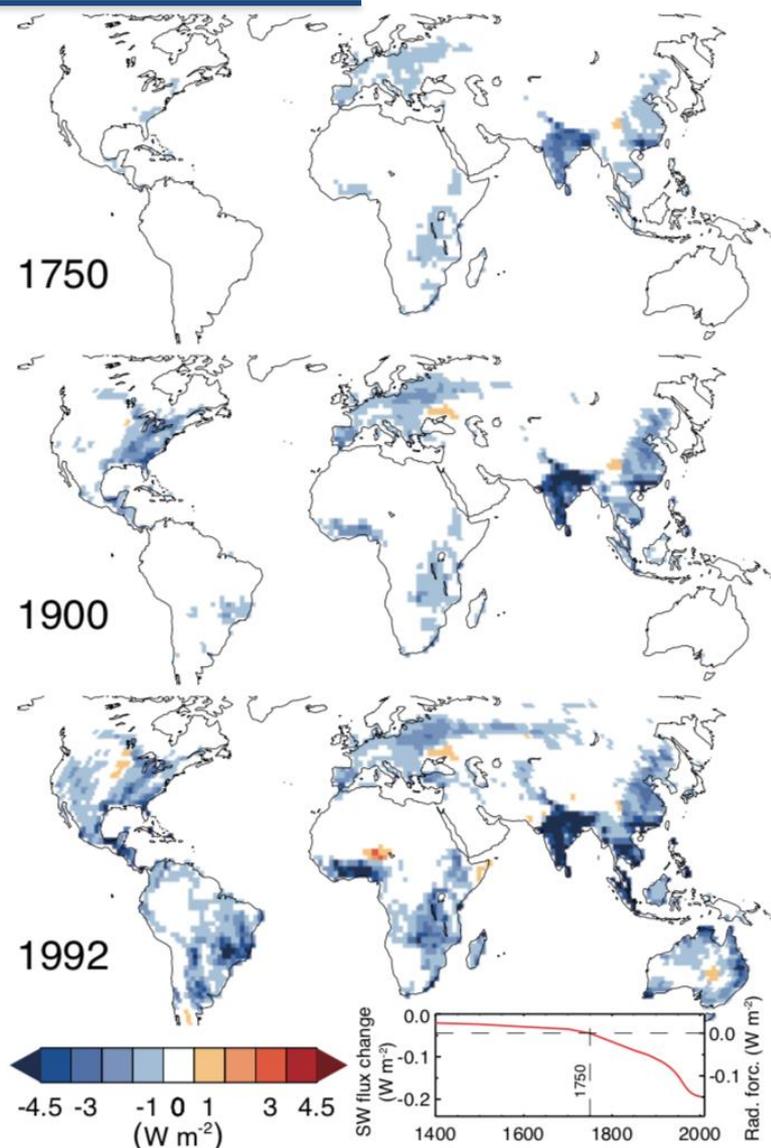
Влияние человека: землепользование (land-use)

Сведение лесов и распашка полей — влияние на климат (изменение альbedo поверхности).



=> человек стал влиять на климат несколько тысяч лет назад!

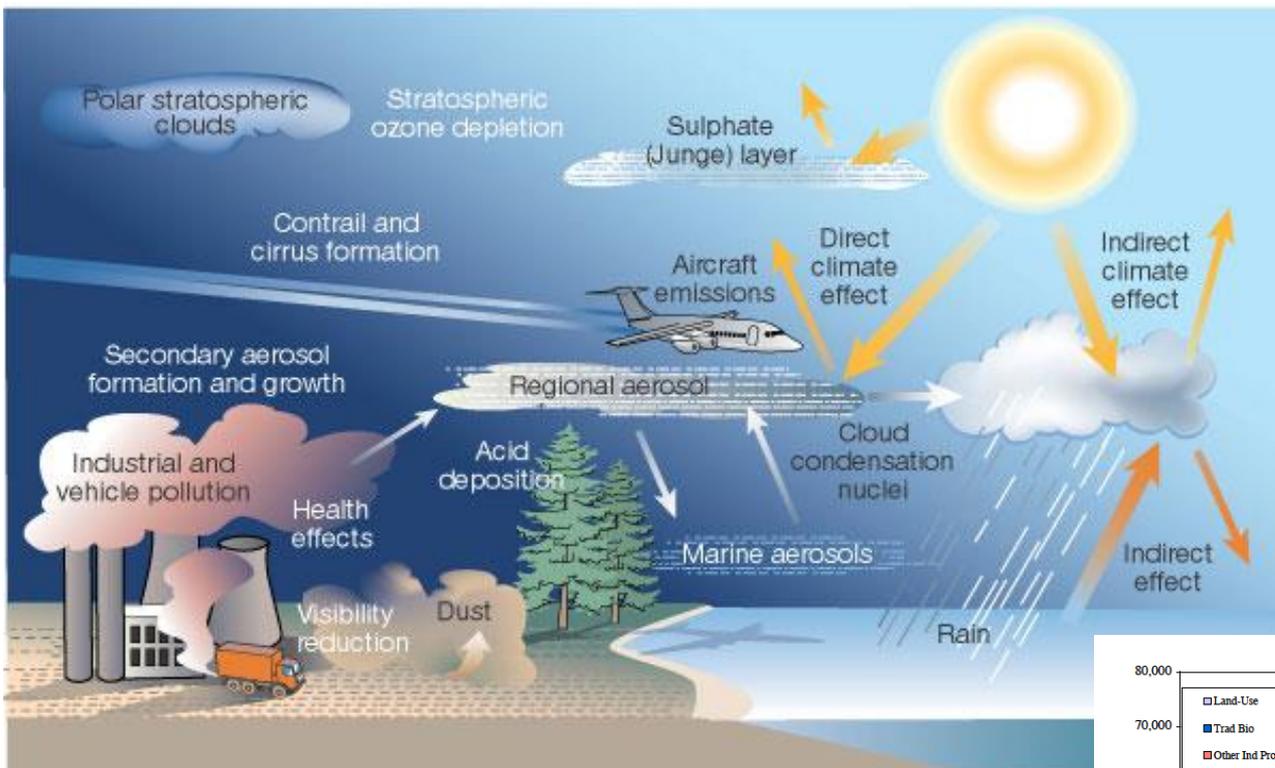
Изменение величины отраженной КВ радиации в результате изменений условий землепользования



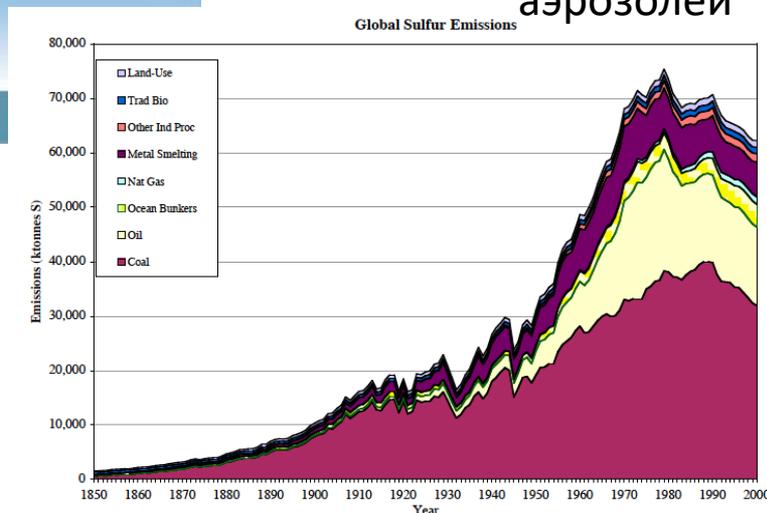
IPCC, 2014

Влияние человека: аэрозоли

Аэрозоли в ЗК



Эмиссии сульфатных аэрозолей



Аэрозоли: множественные эффекты (прямые, косвенные) — главным образом, охлаждающий эффект

IAS, PNNL

Влияние человека: парниковые газы

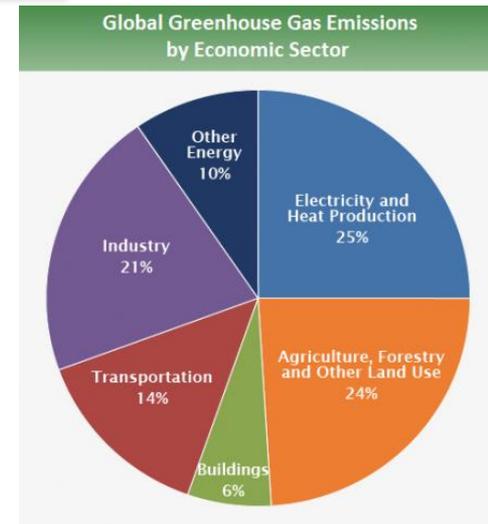
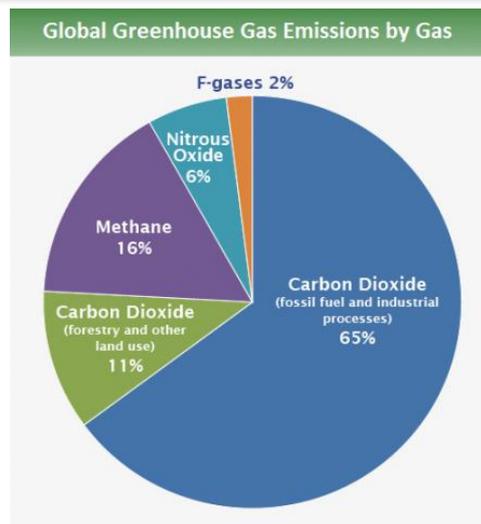
Выбросы CO₂, в первую очередь, за счёт сжигания ископаемого топлива — влияние на парниковый эффект

Эмиссии:

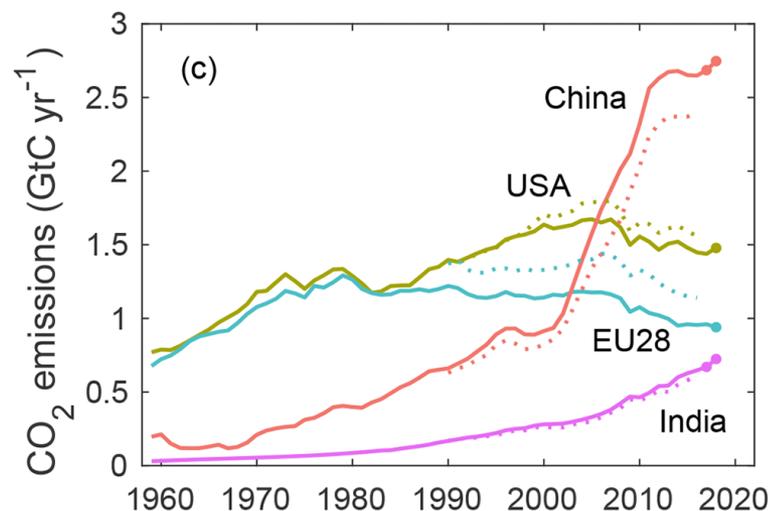
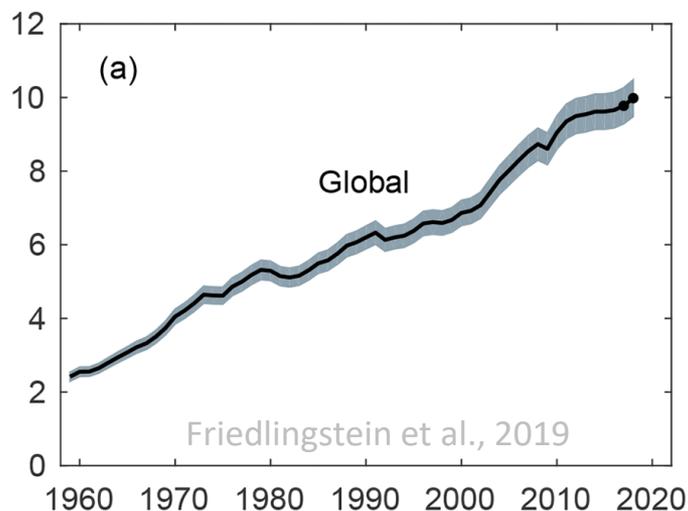
~35 млрд тонн CO₂/год

~10 млрд тонн C/год

(млрд тонн – гигатонны, петаграммы)



IPCC, 2014



-
- Климат и его современные изменения
 - Причины изменчивости климата
 - Парниковый эффект и основные доказательства антропогенного характера современного потепления
 - Обратные связи в климате
 - Уникально ли потепление?
 - Проекция климата на 21 век

Парниковый эффект

Парниковый эффект атмосферы Земли – повышение температуры нижних слоев атмосферы за счёт переотражения длинноволновой радиации основными парниковыми газами.

Основные парниковые газы:

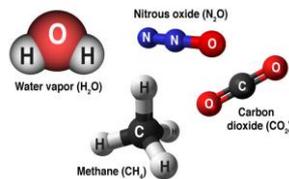
Водяной пар (H_2O)

Диоксид углерода (CO_2)

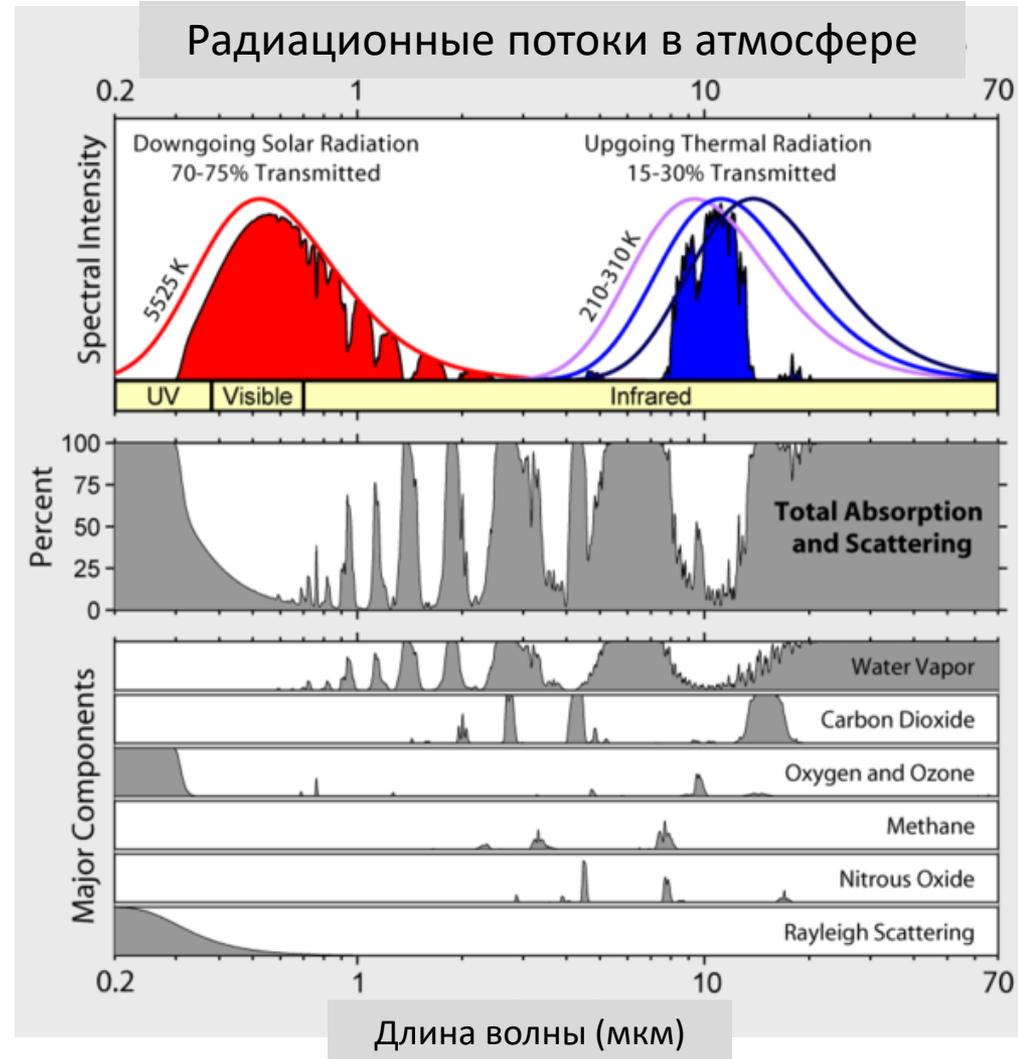
Метан (CH_4)

Озон (O_3)

Диоксид азота (NO_2)



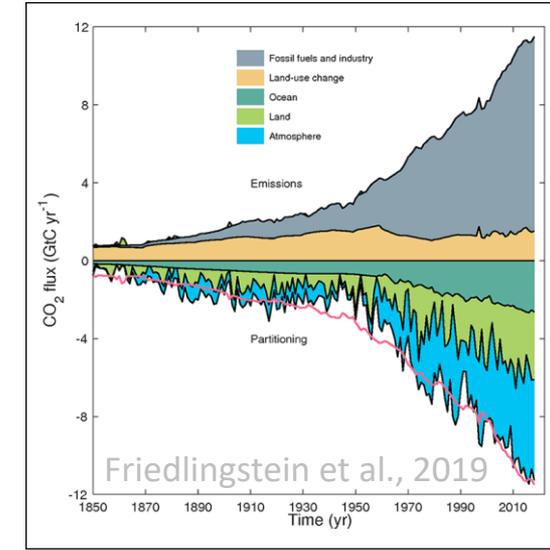
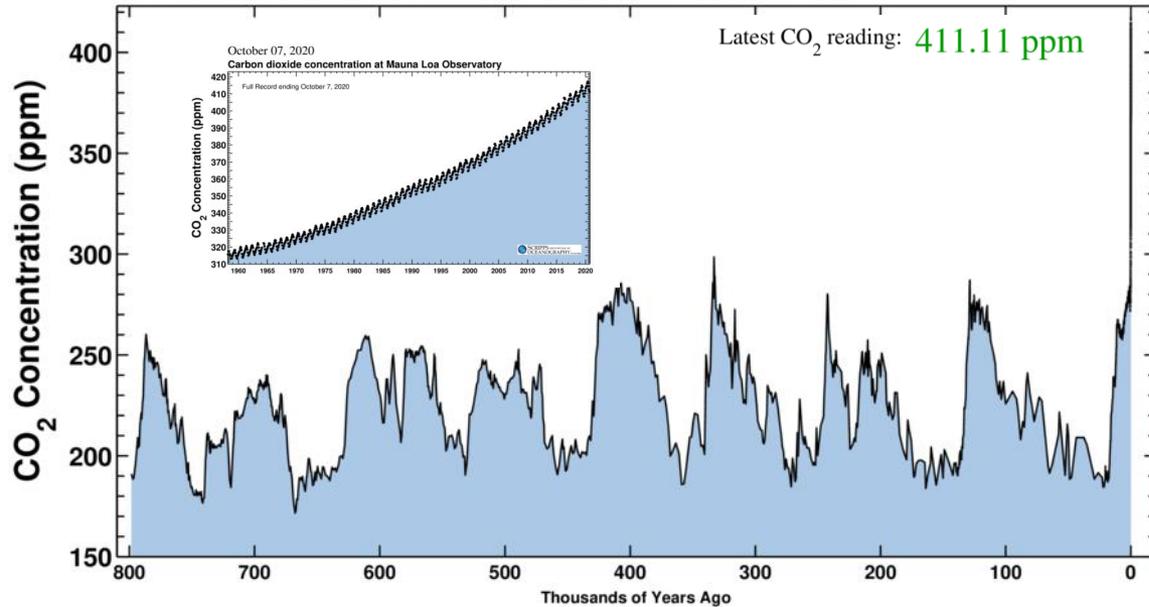
Без парникового эффекта средняя температура на поверхности Земли была бы $-18^\circ C$!



Атрибуция потепления: беспрецедентный рост CO₂

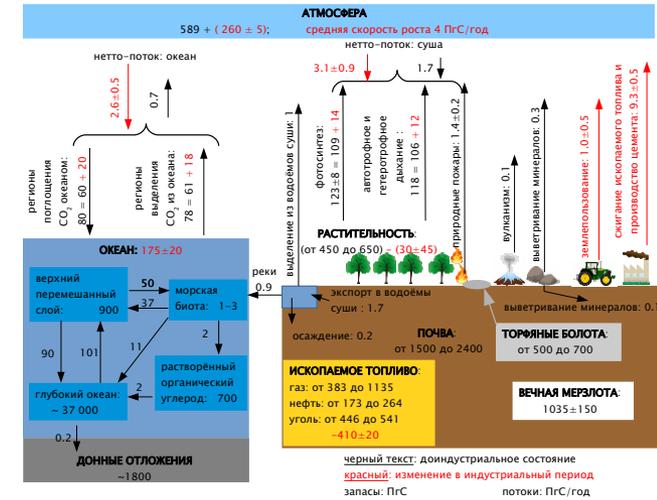
October 07, 2020

Ice-core data before 1958. Mauna Loa data after 1958. scripps.ucsd.edu, 2020



Беспрецедентный рост содержания парниковых газов (за последний 1 млн. лет)

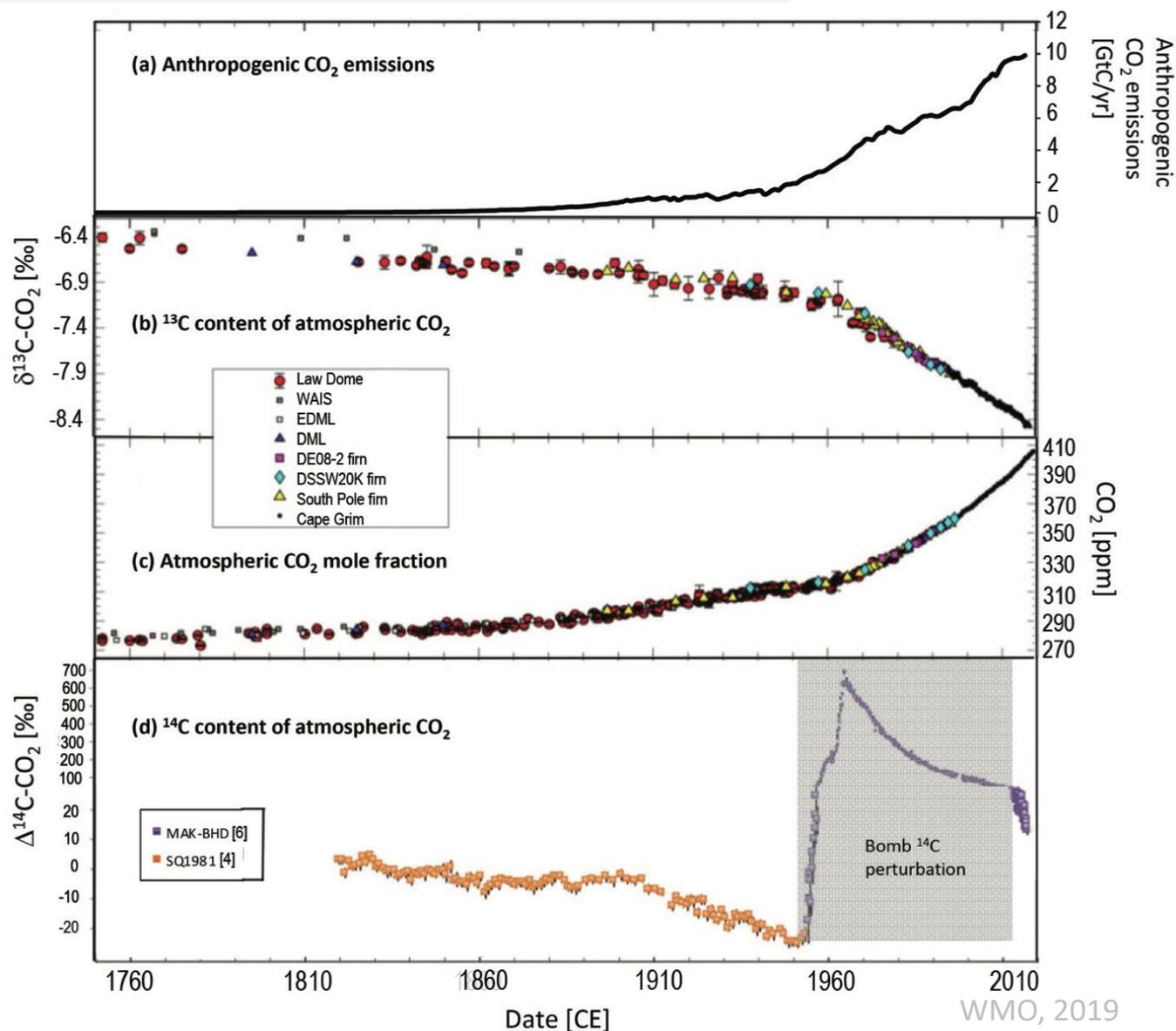
Антропогенный поток углерода: ок. 10 млрд тонн в год (около половины поглощается за счет увеличения стока в океан и биоту).



Елисеев, 2017

Антропогенное усиление ПЭ: Эффект Зюсса

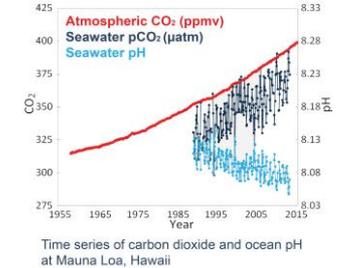
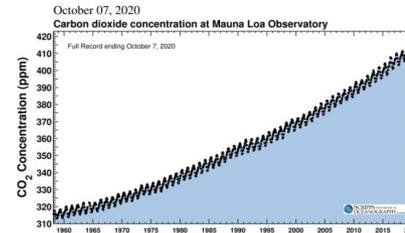
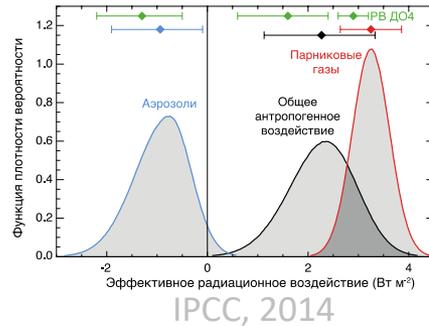
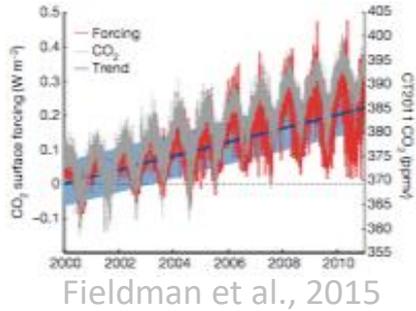
«Эффект Зюсса» (открыт в 1950х гг.): сокращение концентрации ^{14}C (образуется в верхних слоях атмосферы и не зависит от естественной климатической изменчивости) за счет роста содержания ^{12}C (попадает в атмосферу в результате сжигания ископаемого топлива (не содержит ^{14}C)). После ядерных испытаний в атмосферу попало большое количество ^{14}C : сейчас ученые смотрят на соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$.



WMO, 2019

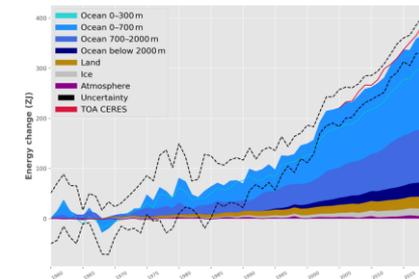
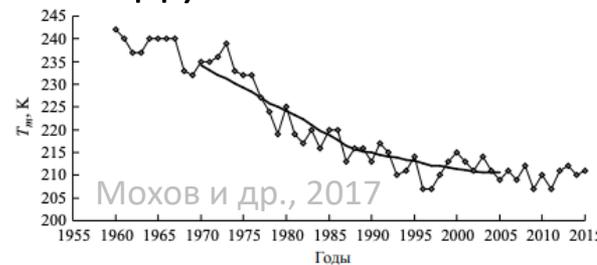
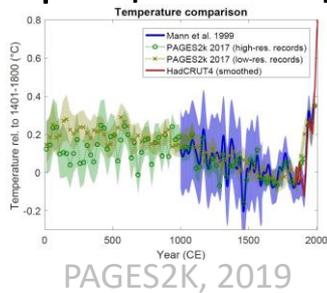
Атрибуция потепления: совокупность наблюдений

1. Рост концентрации парниковых газов, рост антропогенных эмиссий CO₂, прямые измерения радиационного эффекта CO₂, окисление океана.

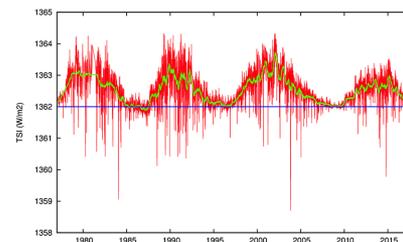


NOAA

2. Изменения в оболочках ЗКС (температура у поверхности и на высотах, влагосодержание атмосферы, накопление тепла в ЗКС, рост уровня океана, сокращение ледников и т.д.)

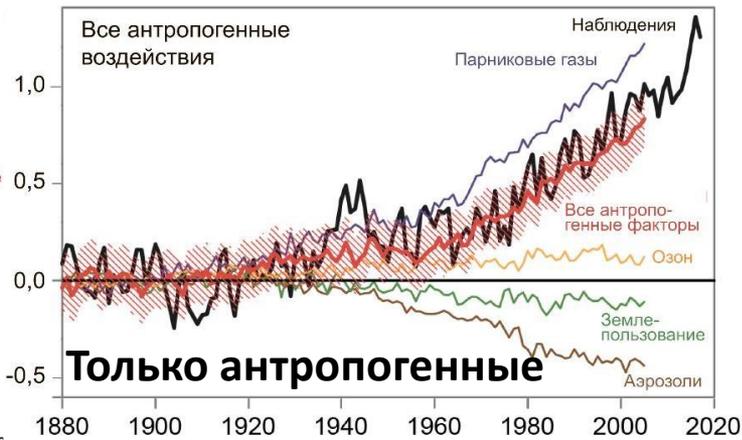
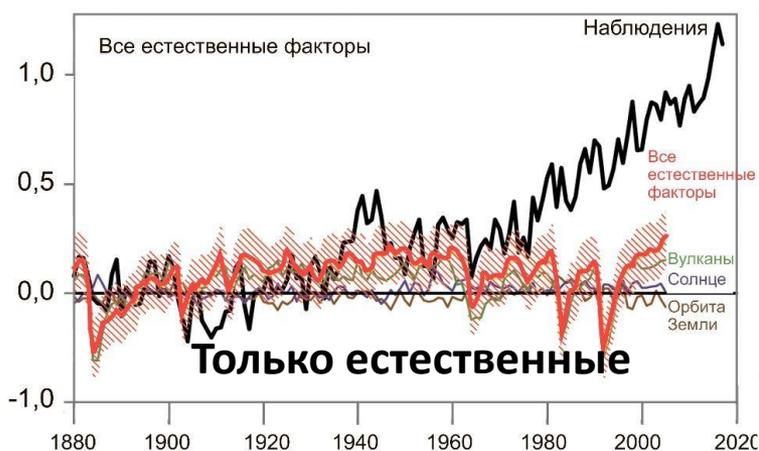


3. Отсутствие трендов в рядах других факторов климатической изменчивости

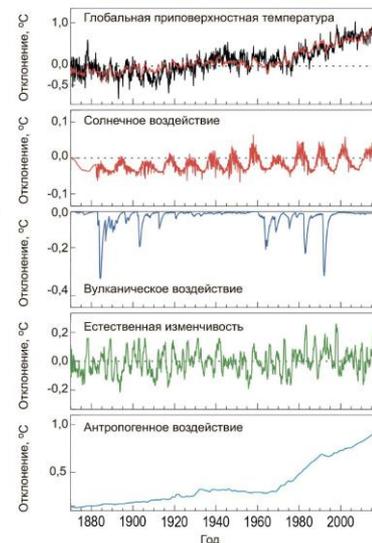
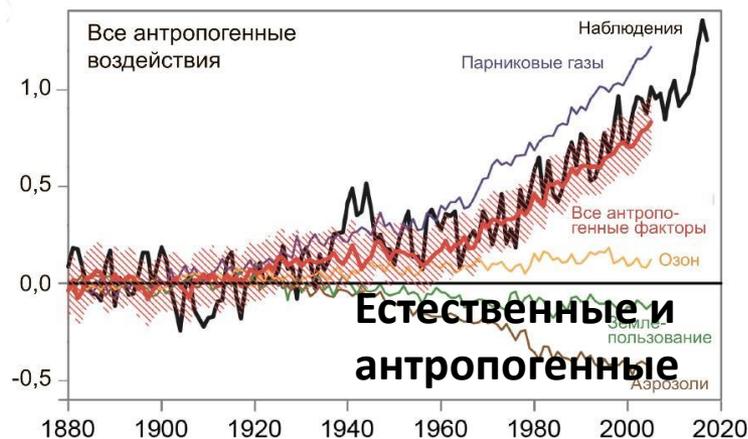


Изменение климата по модельным расчётам

Невозможность климатических моделей воспроизвести современные изменения климата без учета антропогенного воздействия: эмиссий парниковых газов и аэрозолей, изменений в землепользовании.



Оценка средней глобальной температуры при учёте разных факторов



USGCRP, 2019

Модели земной системы

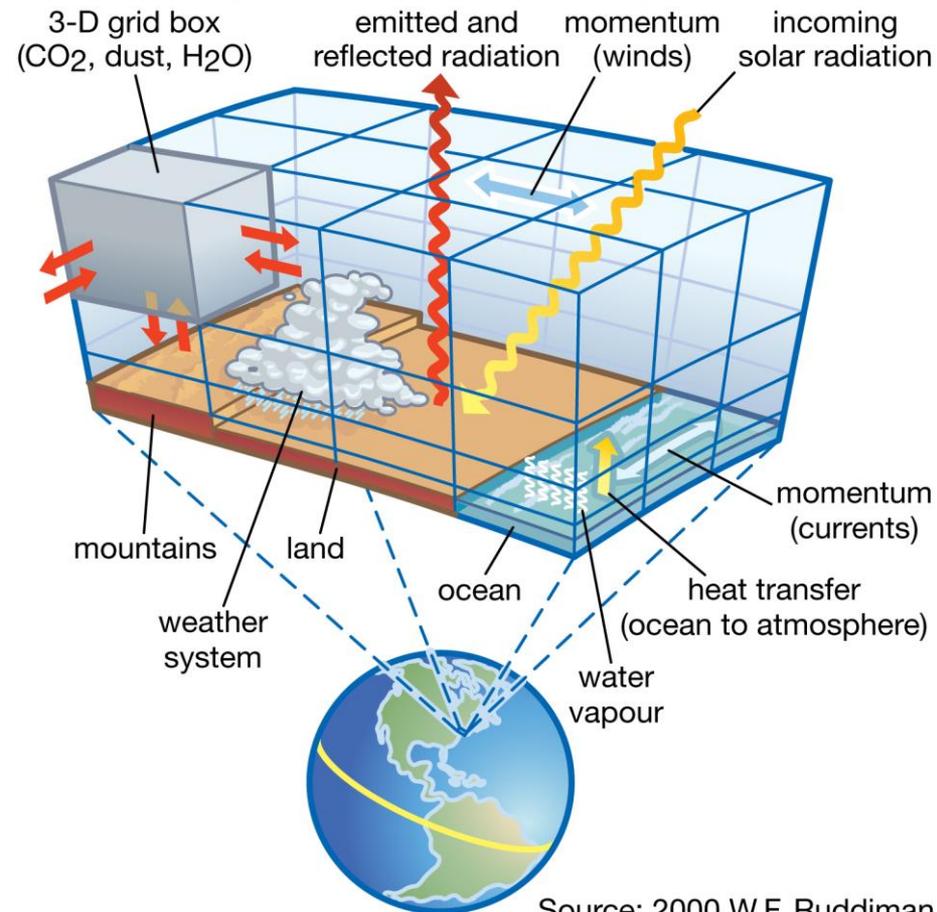
Модели климата (модели земной системы): блоки (субмодели) атмосферы, океана, льда (морского, горных и покровных ледников), земной поверхности, биоты. В МЗС воспроизводится углеродный цикл

Модель общей циркуляции атмосферы и океана: по сути модели прогноза погоды (основа – уравнения гидродинамики и состояния вещества).

Компоненты ЗКС связаны обменом массы, импульса и энергии.

Атмосфера – единственная компонента, обменивающаяся со всеми остальными.

Concept diagram of climate modeling



Парниковый эффект и глобальное потепление

1827 – описание механизма парникового эффекта (Фурье)

1859 – экспериментальное наблюдение парникового эффекта (Тиндалл).

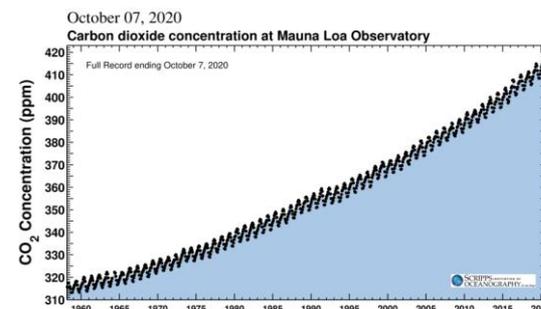
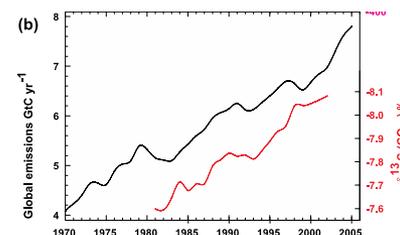
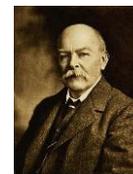
1896 – первый расчёт роста T атмосферы при $2 \cdot \text{CO}_2$ (Аррениус)

1901–1909 – Экхольм: парник, как метафора.
Пойнтинг: термин «парниковый эффект»

1938 – Каллендар: связь реальных наблюдений за T и CO_2 в атмосфере

1950е гг – Зюсс: обнаружение снижения концентрации изотопа ^{13}C в атмосфере

1956 – Килинг: обсерватория на Мауна-Лоа с регулярными измерениям концентрации CO_2 в атмосфере



Парниковый эффект и глобальное потепление

1969 – Будыко (СССР), Селлерс (США): расчёт роста температуры атмосферы при удвоении CO₂ с энерго-балансовыми моделями

1975 – появление термина «глобальное потепление» (Science, У.Брёкер) (в 1976 – использовано в СССР, статья Будыко и Винникова).

1979 – Чарни, Манабе, Хансен: расчёт с 3-мерными климатическими моделями. Вывод: климат теплеет из-за роста CO₂

1988 – основана МГЭИК (при ВМО и ООН), в 2013-14 гг. выпущен 5-й доклад (агрегация знаний)

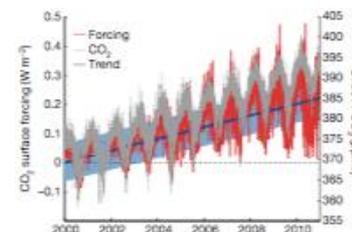
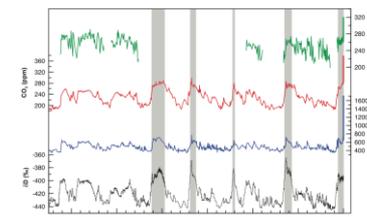
1999 – керны с оз. Восток. (абсолютные значения CO₂ и скорость роста – беспрецедентны для современных условий) (Petit et al.)

2007 – Нобелевская премия мира для МГЭИК

2015 – прямое наблюдение за приземным радиационным форсингом CO₂ (Fieldman et al.).



3. Peter
4. G. S. Cooper
5. W. H. Mook
6. J. W. Munnich and R.



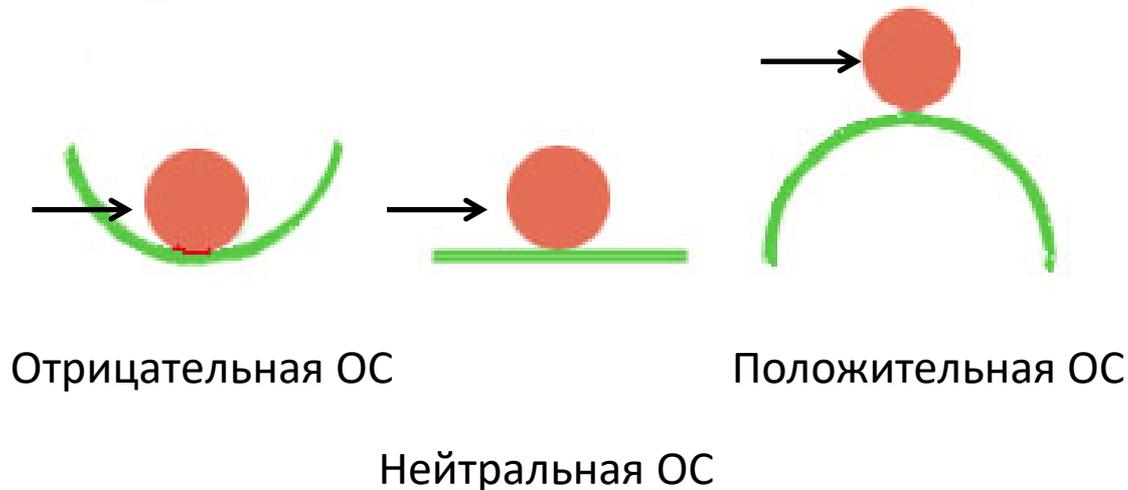
-
- Климат и его современные изменения
 - Причины изменчивости климата
 - Парниковый эффект и основные доказательства антропогенного характера современного потепления
 - **Обратные связи в климате**
 - Уникально ли потепление?
 - Проекция климата на 21 век

Обратные связи (ОС)

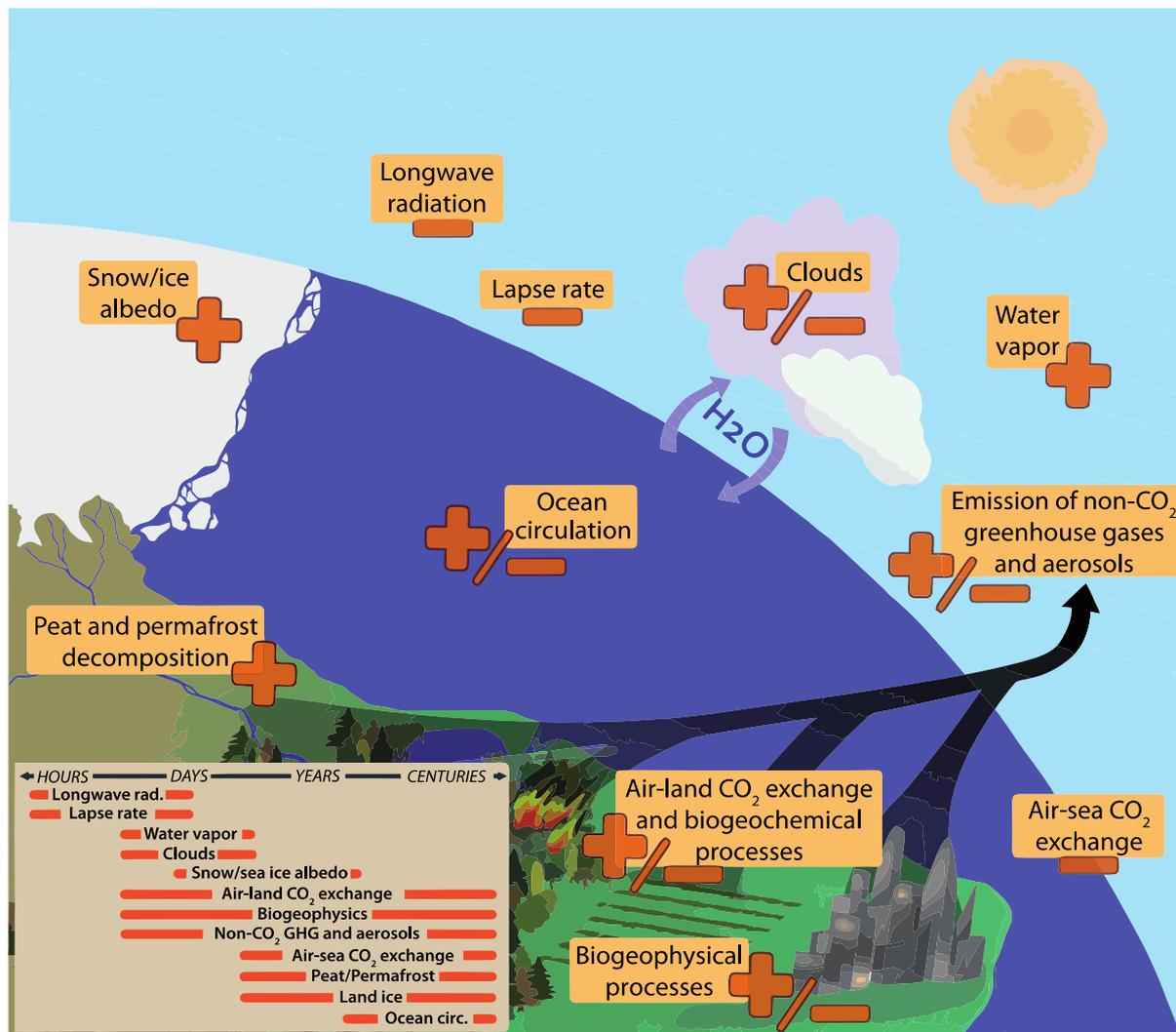
Обратная связь – отзыв, отклик, ответная реакция системы на какое-либо воздействие на эту систему.

Положительная ОС – ответная реакция системы, которая усиливает воздействие.

Отрицательная ОС – ответная реакция системы, которая ослабляет воздействие.



Обратные связи в ЗКС

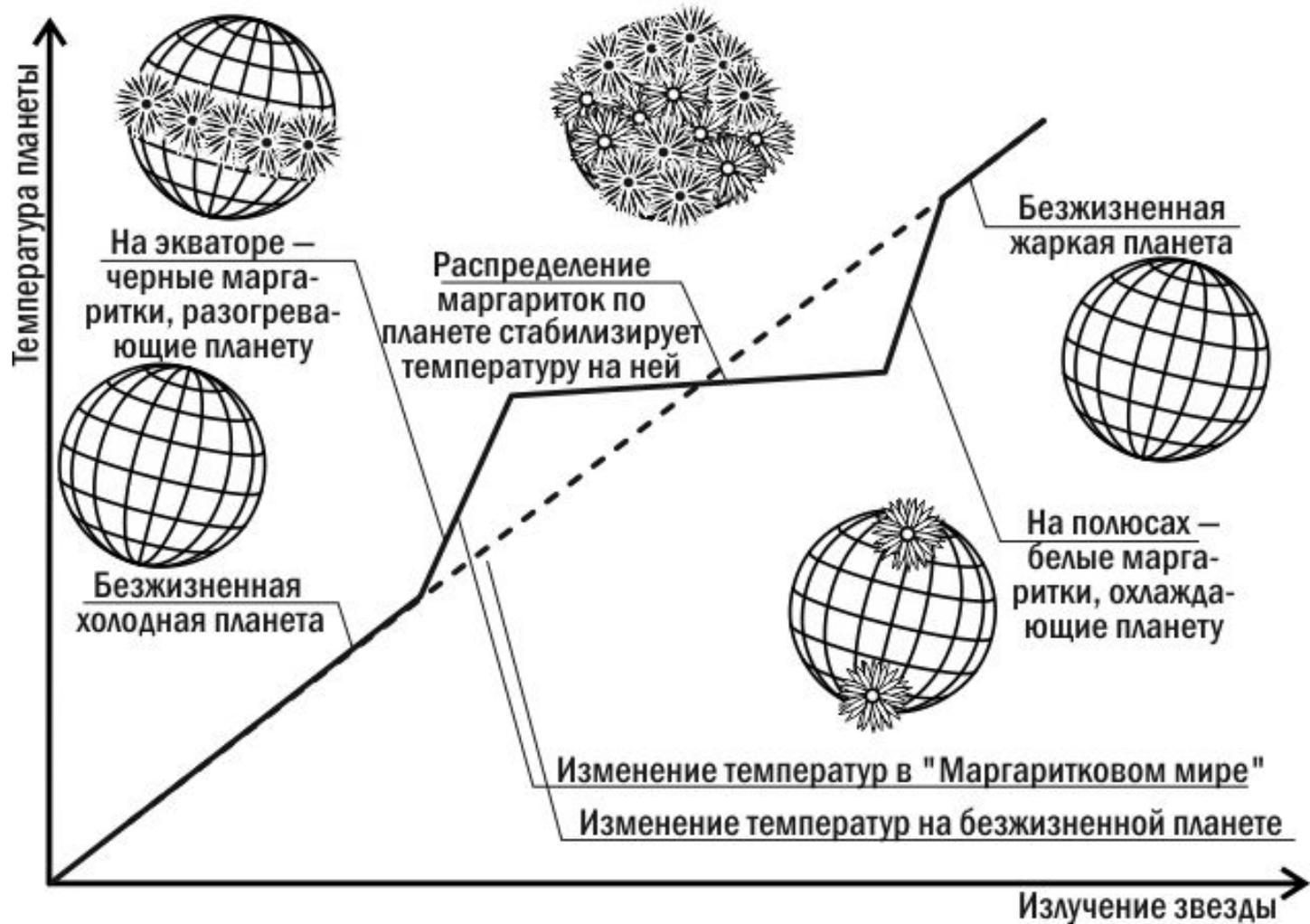
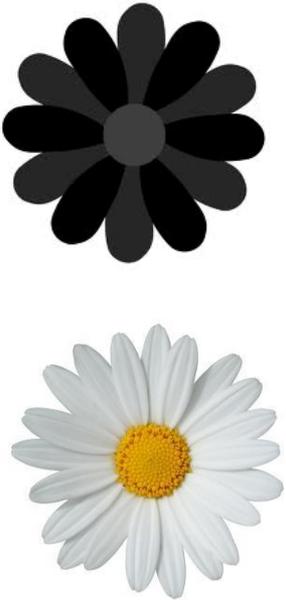


IPCC, 2014

Схема основных обратных связей в ЗКС:
+ положительные ОС
– отрицательные ОС

Показано также характерное время действия ОС (определяет то, какой фактор считать внешним, какой – внутренним).

Обратные связи и биота: «мир маргариток»



Lovelock and Watson, 1983

Обратная связь, обусловленная водяным паром

Чем теплее воздух, тем больше он может содержать водяного пара.

Чем больше водяного пара, тем больше парниковый эффект.

Теоретический уровень:

Соотношение Клазиуса-Клапейрона,
 $\sim 7\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

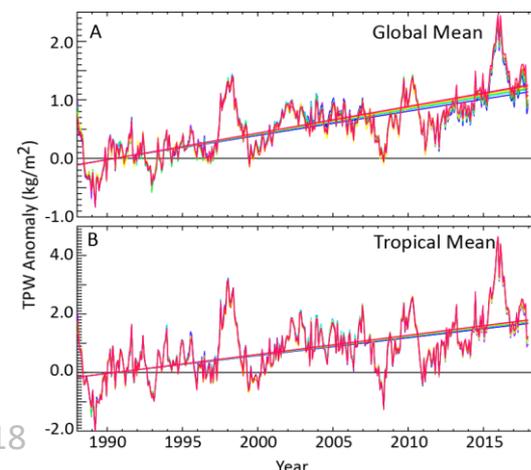
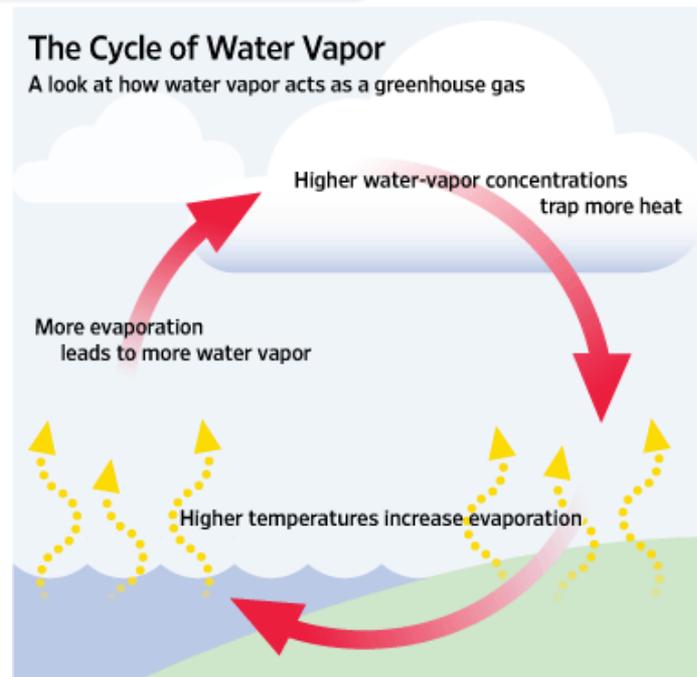
По наблюдениям (разные данные):

$1.19 \pm 0.46\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$2.21 \pm 0.85\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

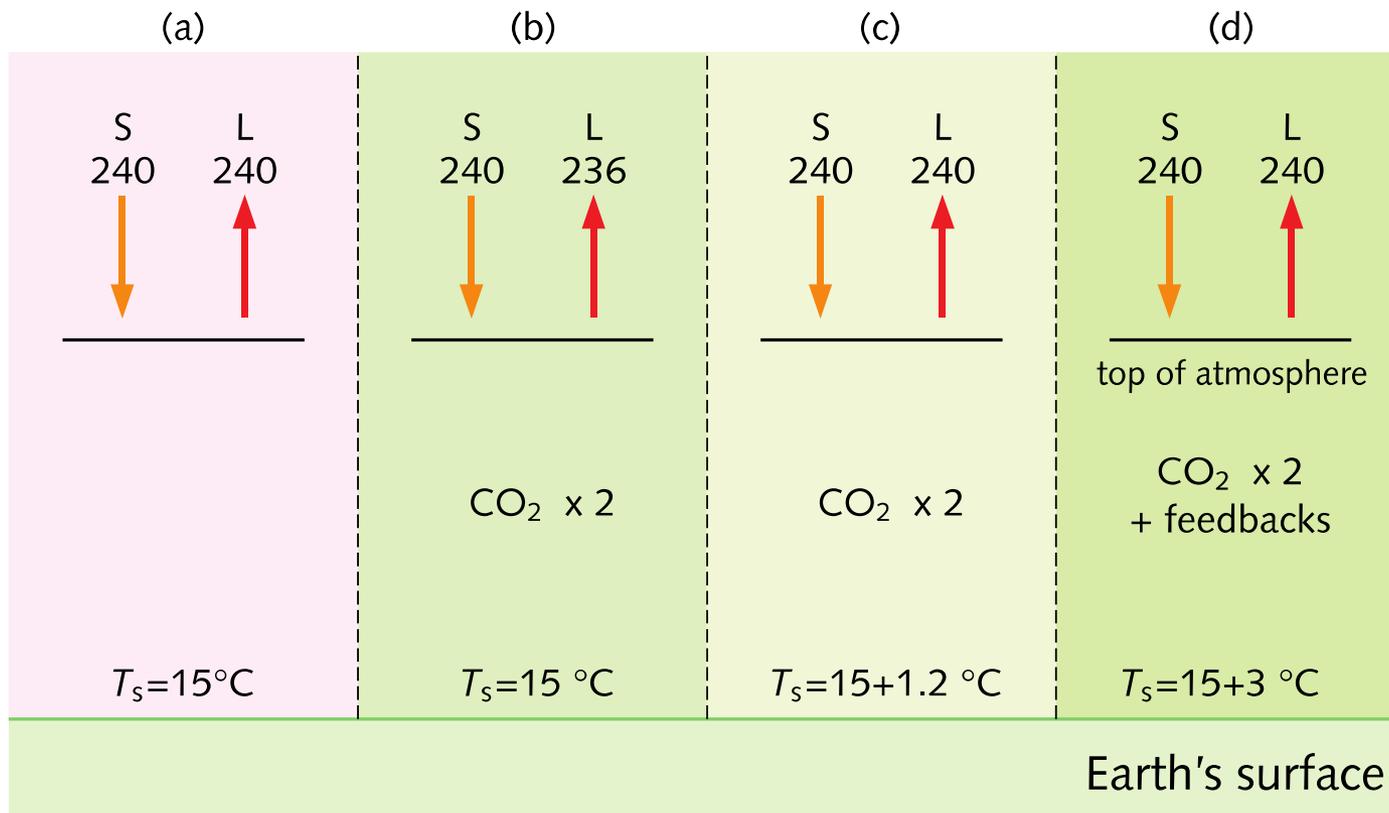
$2.54 \pm 0.96\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Skiriris et al., 2016



Mears et al., 2018

Усиление потепления за счет обратных связей

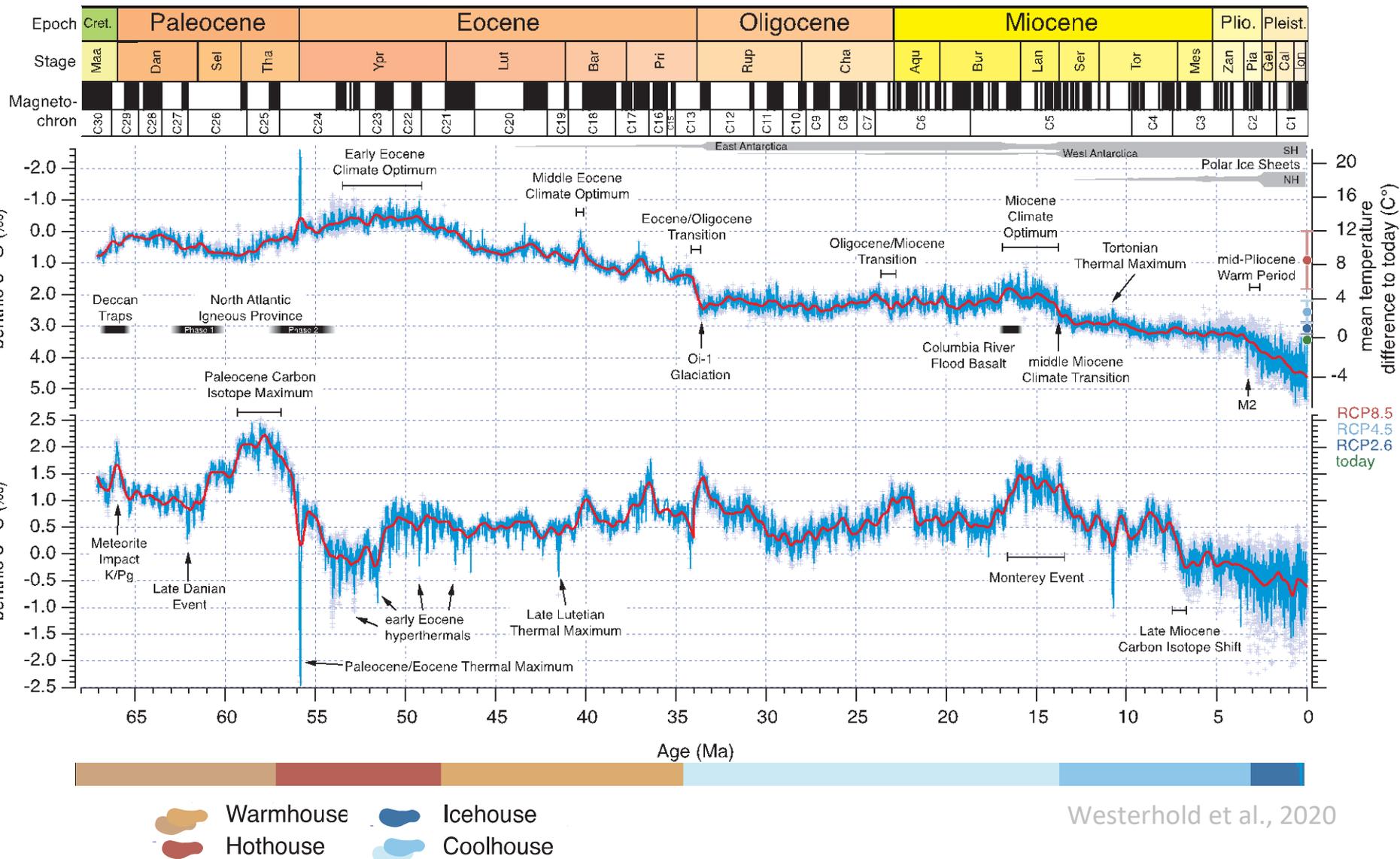


Houghton, 2010

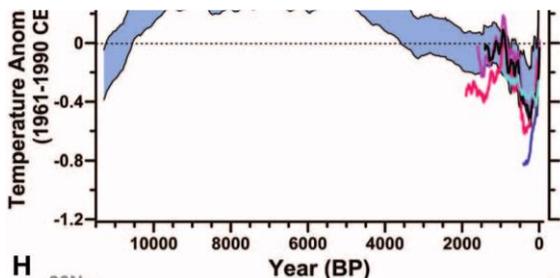
При учёте обратных связей отклик глобальной температуры на удвоение CO₂ возрастает в 2,5 раза.

-
- Климат и его современные изменения
 - Причины изменчивости климата
 - Парниковый эффект и основные доказательства антропогенного характера современного потепления
 - Обратные связи в климате
 - **Уникально ли потепление?**
 - Проекция климата на 21 век

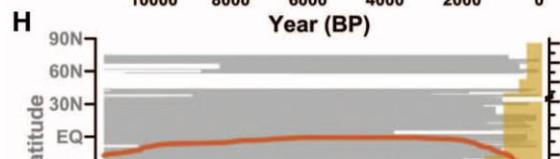
Температура на Земле в прошлом



Оптимум голоцена

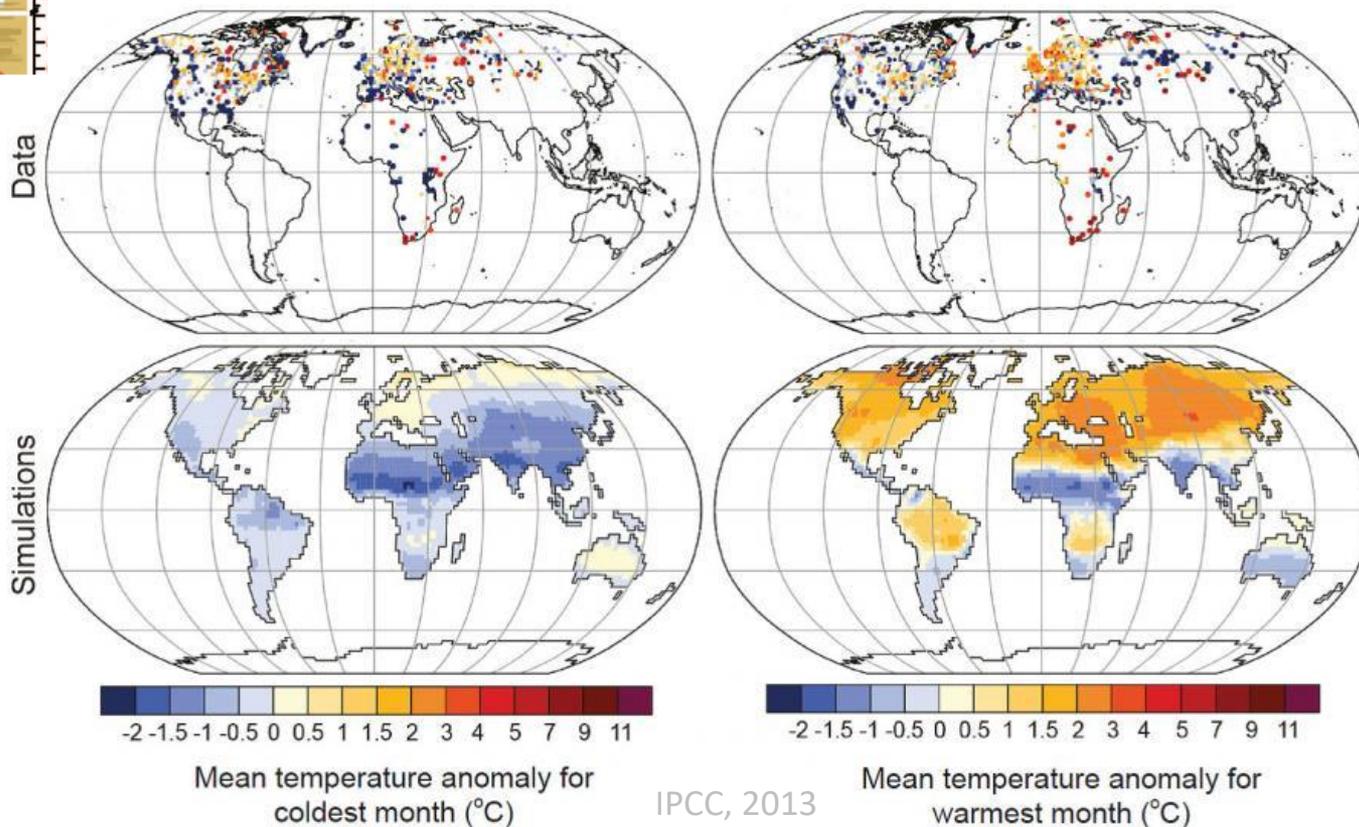


Аномалии глобальной температуры (относительно 1961-1990 гг.)

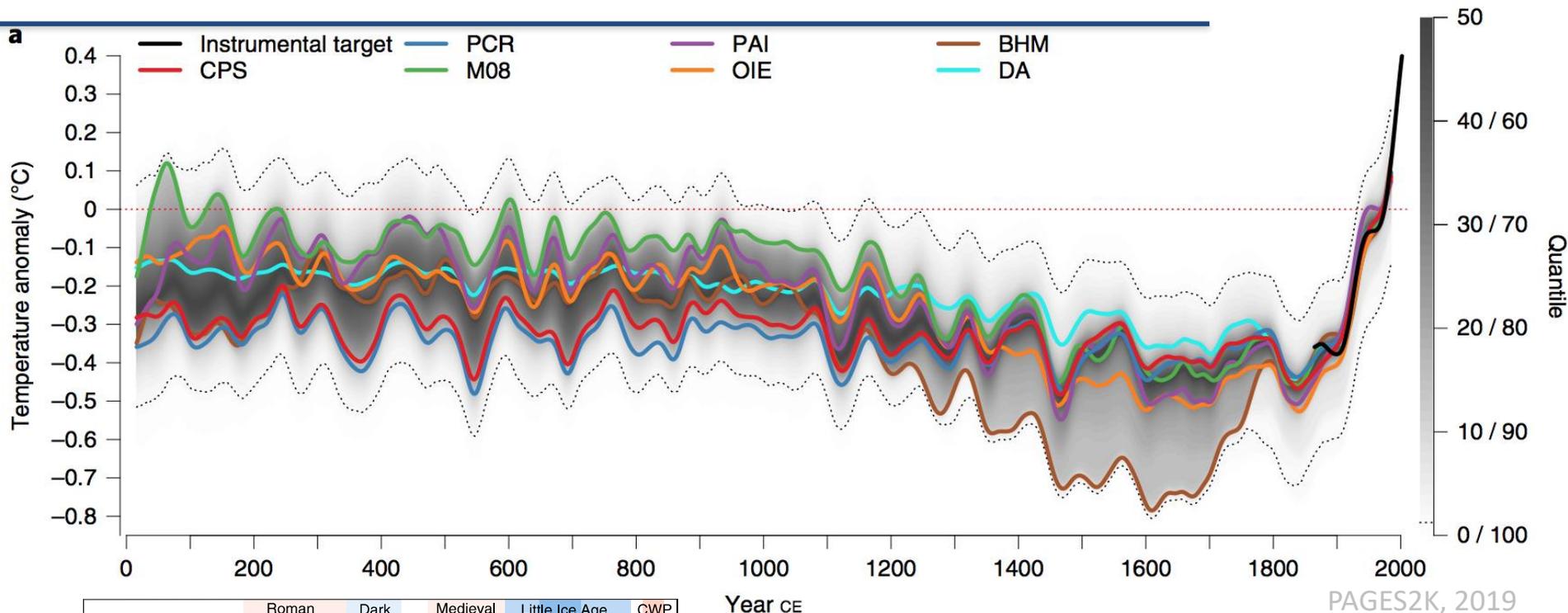


Marcott et al., 2013

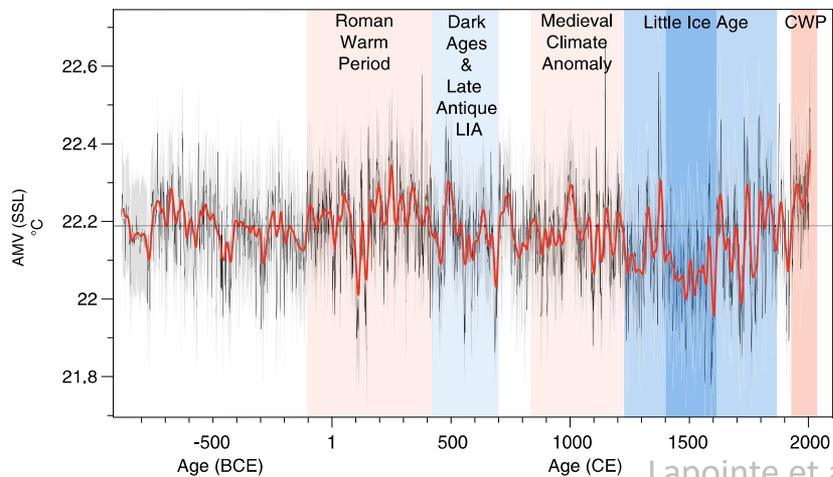
Аномалии региональной температуры воздуха



Последние 2 тысячи лет

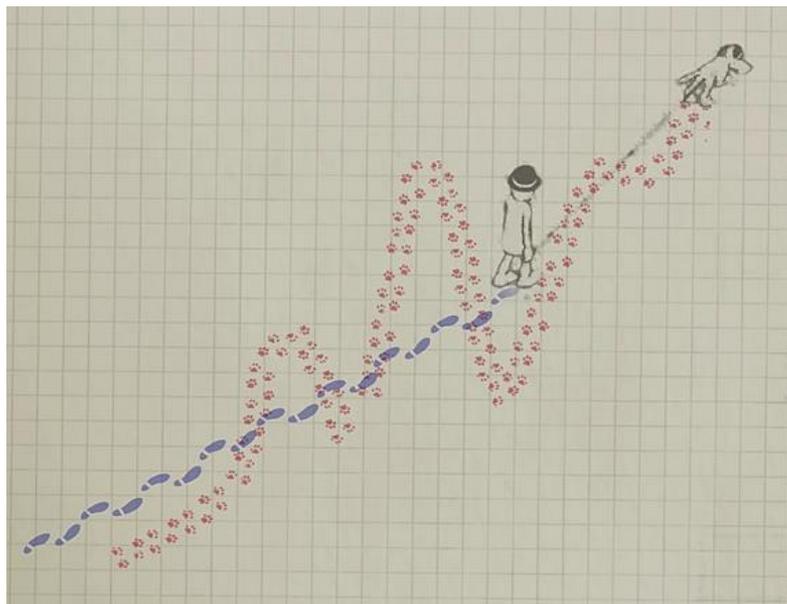


Аномалии глобальной температуры воздуха



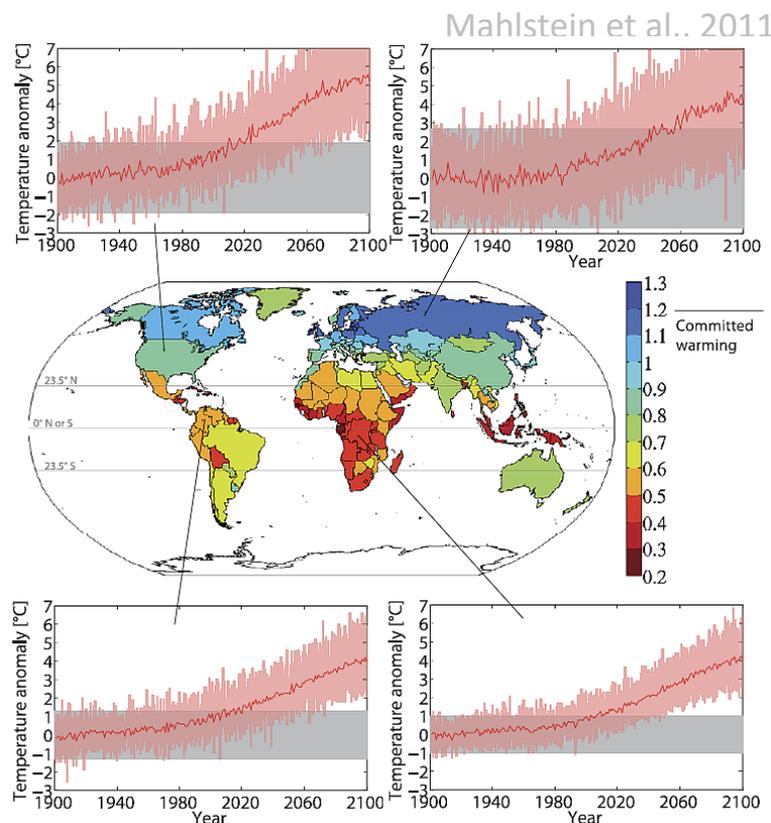
Температура поверхности океана в Северной Атлантике

Ощущаем ли мы потепление?



Люди в повседневной жизни способны анализировать изменения погоды, не изменения климата. Чем больше изменения погоды – тем труднее увидеть изменения климата

Ожидаемый год, когда превышение наблюдаемых климатических аномалий станет очевидно для «обывателя» (красная линия выйдет из серой зоны на графиках для разных регионов)



Теории учёных не-климатологов

- Нас скоро ждёт глобальное похолодание
Скоро – через 5-10 тысячи лет, пока параметры орбиты не меняются, высокая концентрация CO₂ может отсрочить начало следующего ЛП на 100 тыс. лет
- Главный фактор – солнечная активность, галактические лучи...
Солнечная активность: нет тренда (только цикличность); галактические лучи: нет тренда в облаках, никак не влияют на CO₂.
- Антропогенные потоки слишком малы; вулканы дают больше
Антропогенные потоки – около 10% от естественных, они не уравновешены!
Поток CO₂ из-за вулканов – около 1% от антропогенных потоков.
- Водяной пар – главный парниковый газ, да и облака нас спасут
Так и парниковый эффект: 33 градуса, а его «антропогенная» добавка – 1 градус
Обратные связи, обусловленные облаками, преимущественно положительные
- Климат менялся всё время, были и более теплые периоды...
Но тогда были другие причины, которые сейчас не работают. И так быстро парниковые газы не росли никогда!
- Единичные обратные примеры (напр., некоторые ледники нарастают)
Примеры вырваны из контекста и объясняются изменениями локальной циркуляции

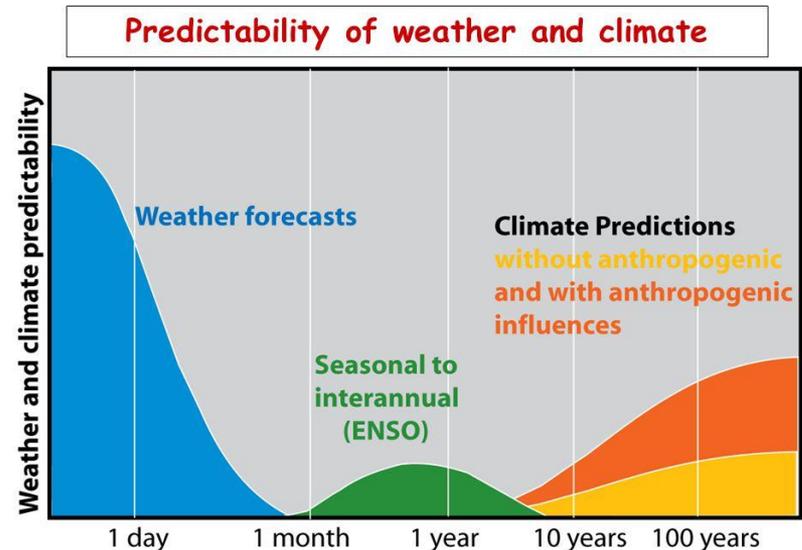
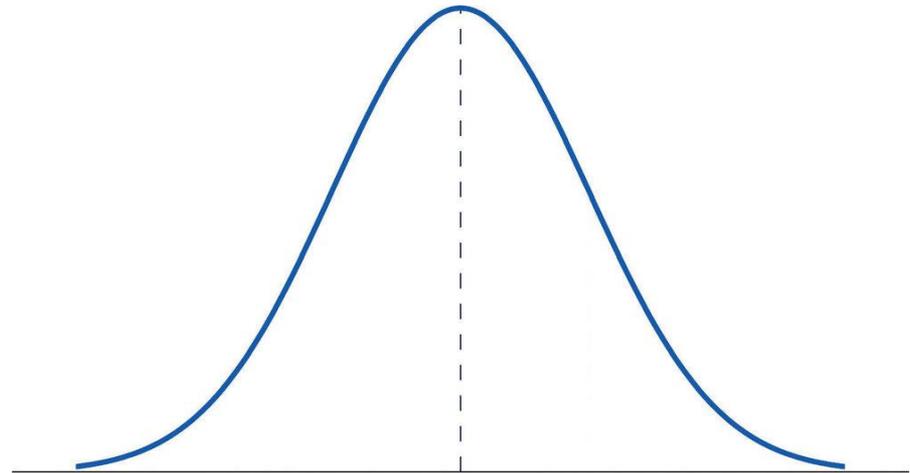
-
- Климат и его современные изменения
 - Причины изменчивости климата
 - Парниковый эффект и основные доказательства антропогенного характера современного потепления
 - Обратные связи в климате
 - Уникально ли потепление?
 - **Проекция климата на 21 век**

Климатический прогноз

Моделирование погоды – заданы и граничные и начальные условия, (прогноз 1-го рода).

Климатическое моделирование – моделирование с заданными граничными условиями (прогноз 2-го рода). Климатическое прогнозирование – проекции, расчет вероятности того или иного события.

Важная научная задача:
повысить качество декадного прогноза

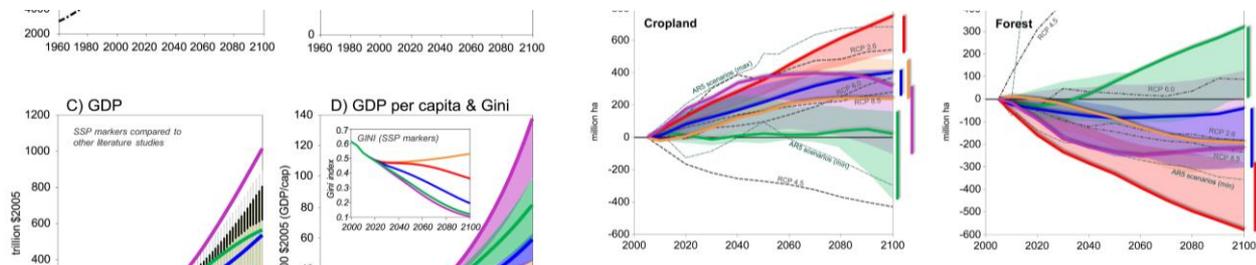


K. Trenberth

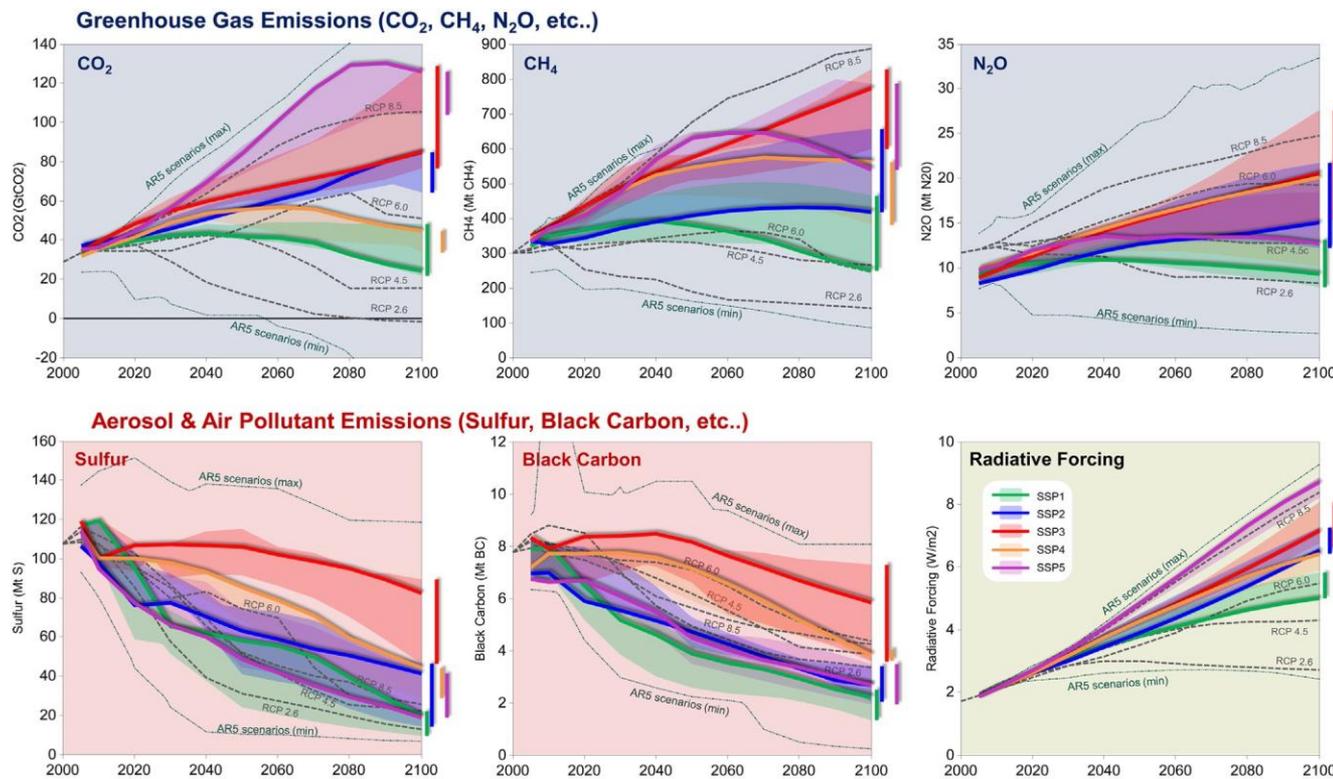
Граничные условия для проекций климата

SSP: shared socio-economic paths
Проекция климата на 21 век: сценарии эмиссий

парниковых газов в атмосфере и аэрозолей, землепользование, 11-летний цикл солнечной активности.
Не заложена информация о вулканах.



Riahi et al., 2017

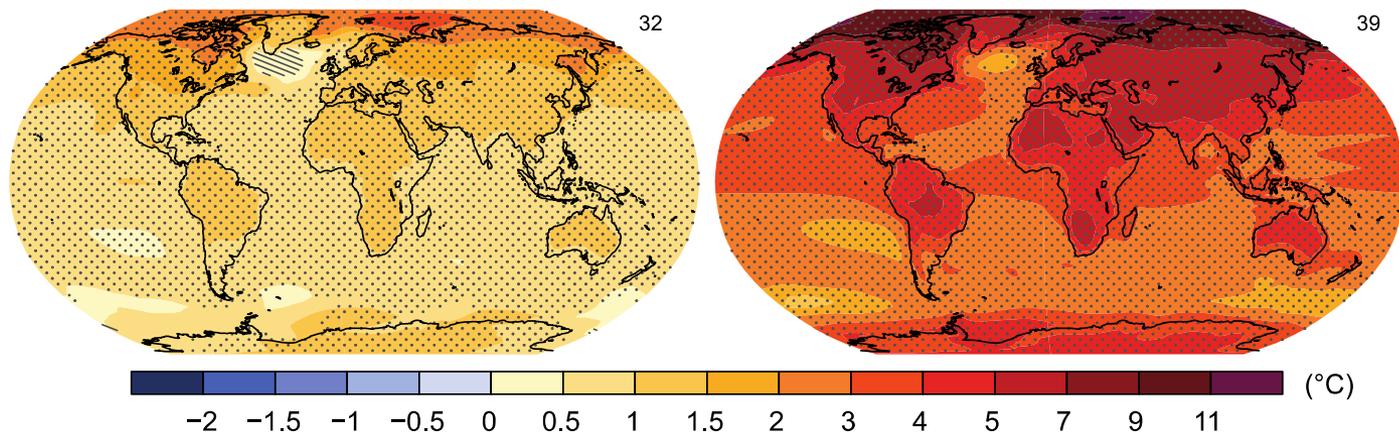


Климат 21 века: температура и осадки

РТК2.6

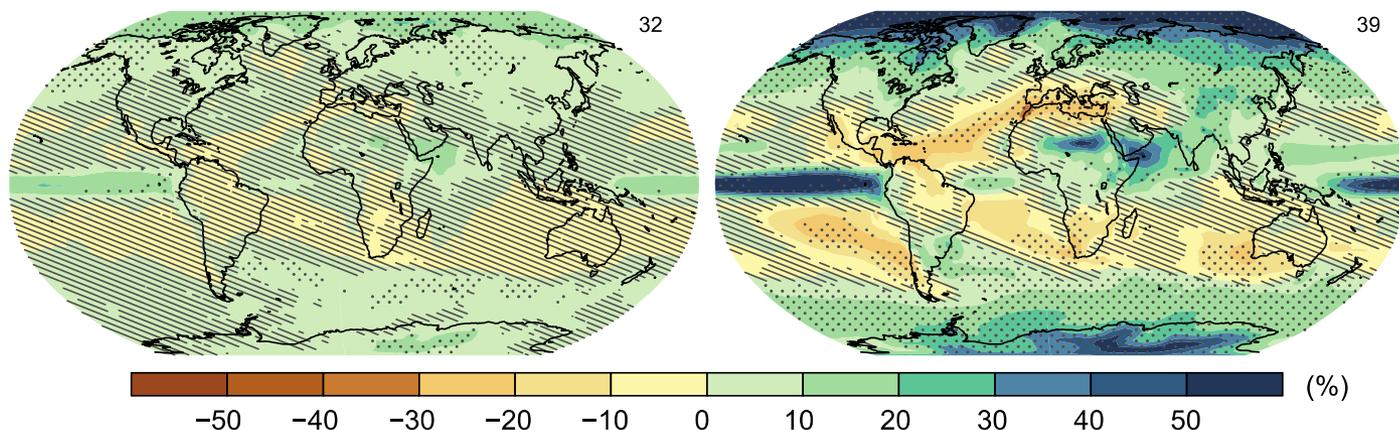
РТК8.5

а) Изменение средней приземной температуры (1986–2005 гг. – 2081–2100 гг.)



IPCC, 2013

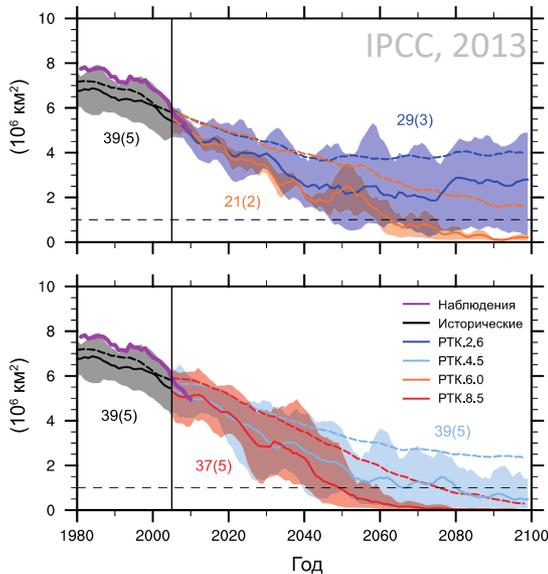
б) Изменение среднего количества осадков (1986–2005 гг. – 2081–2100 гг.)



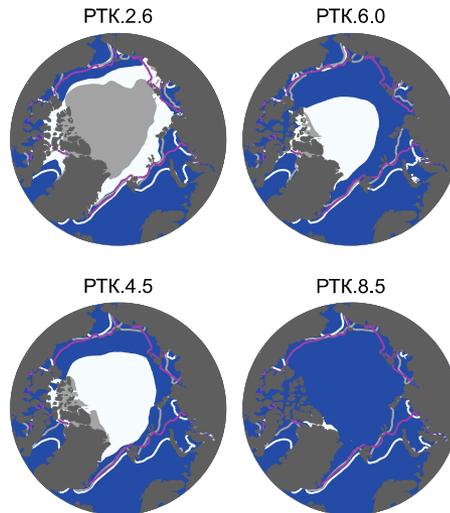
Изменения приземной температуры воздуха и количества осадков при различных сценариях (конец 21 в. относительно 1986-2005 гг.)

Изменения климата в Арктике

Протяженность морского льда в сентябре в СП

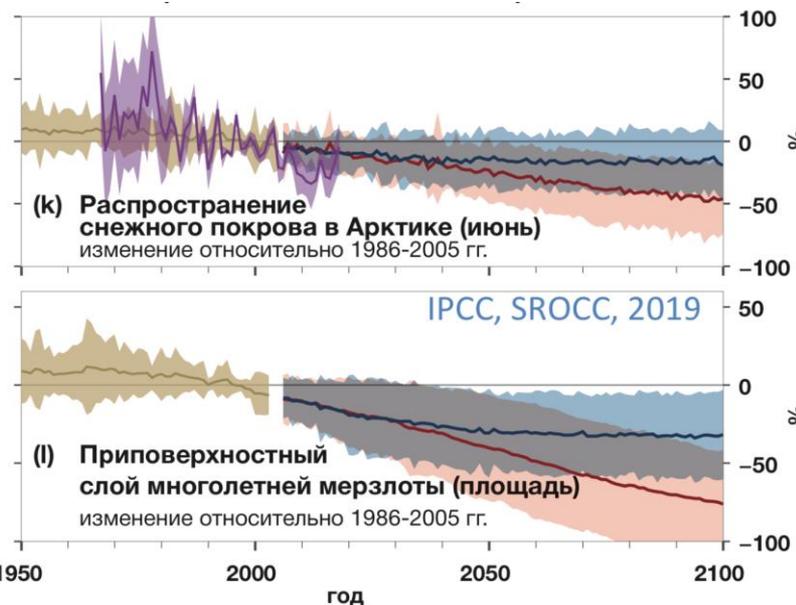


2081-2100 гг.

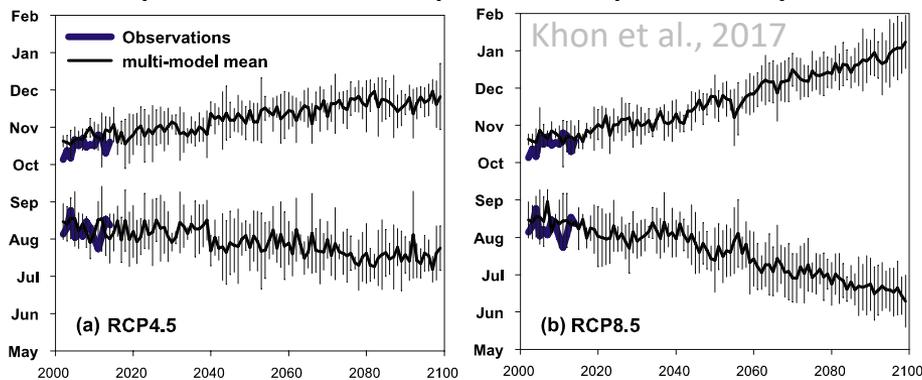


Изменение площади льда в Арктике

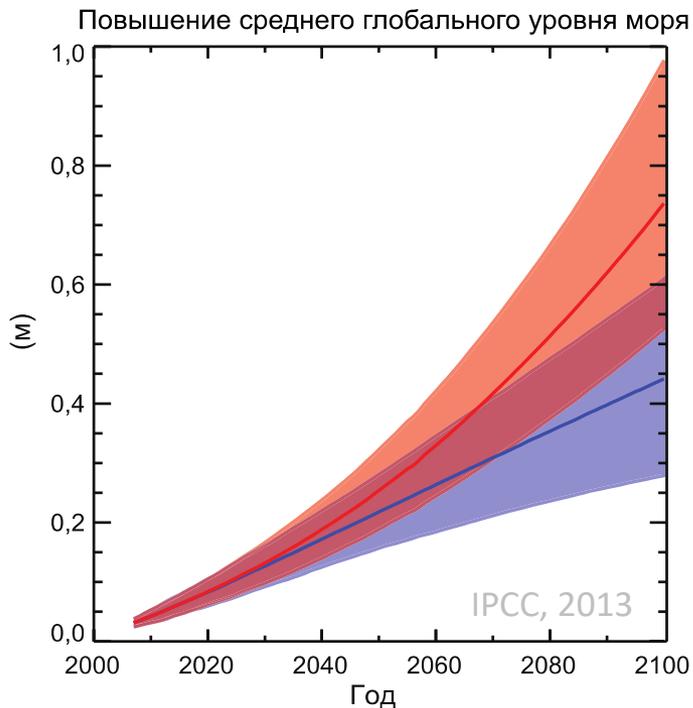
Изменение площади снежного покрова и вечной мерзлоты



Изменение продолжительности навигационного периода на Северном морском пути



Климат 21 века: изменения в океане

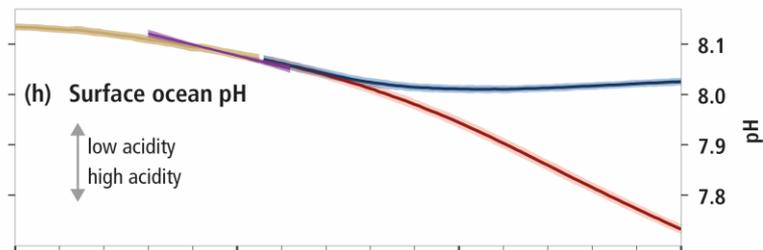


Изменение уровня моря

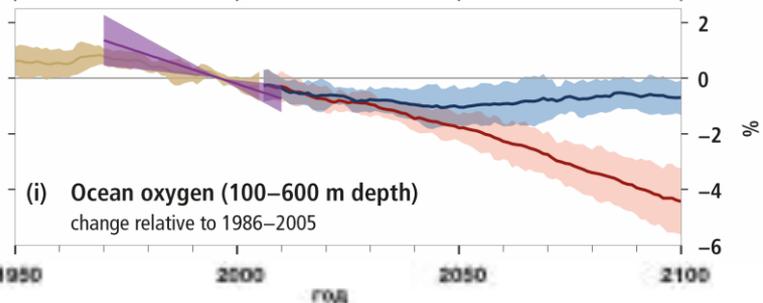


IPCC, SROCC, 2019

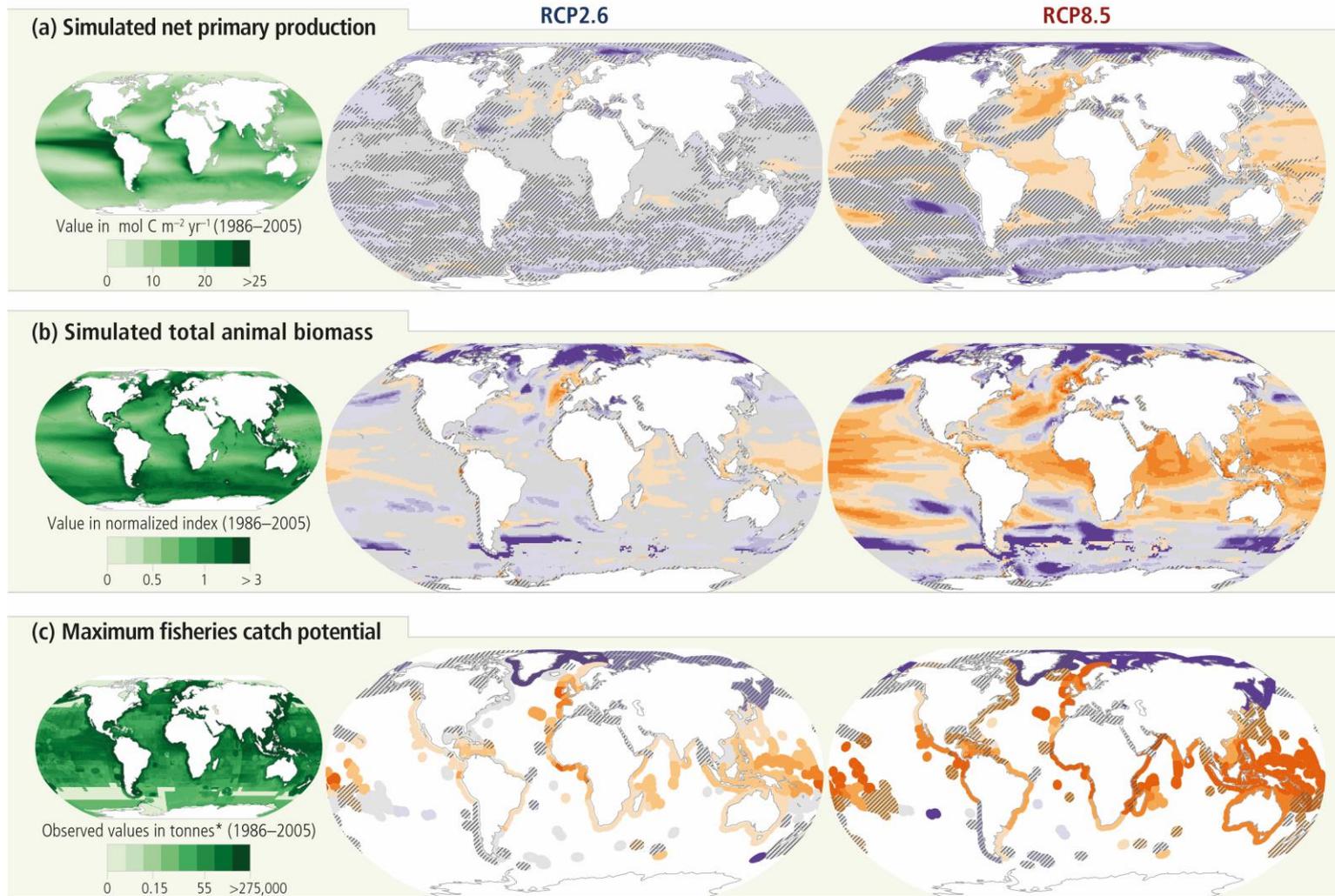
Изменение кислотности океана



Изменение содержания кислорода в океане

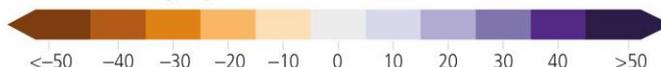


Изменение экосистем в океане



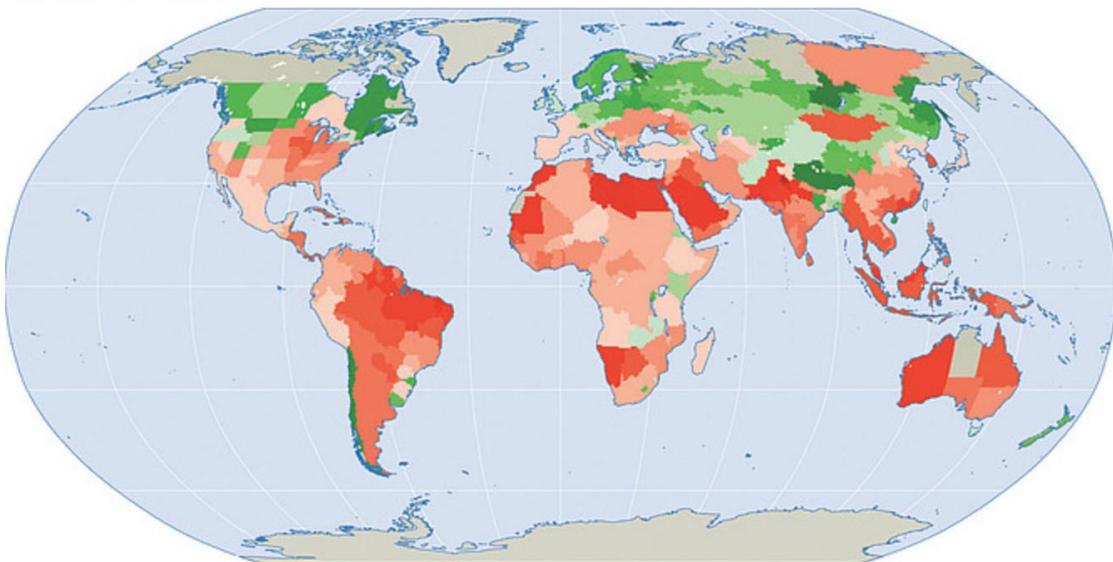
* See figure caption for details

Percent change
Average by 2081–2100, relative to 1986–2005



model disagreement
 no data

Изменение урожайности



Ожидаемое изменение урожайности (интегральная оценка для 11 основных с/х культур) в 2060 г относительно 2010 (в %)

Percentage change in yields between 2010 and 2050



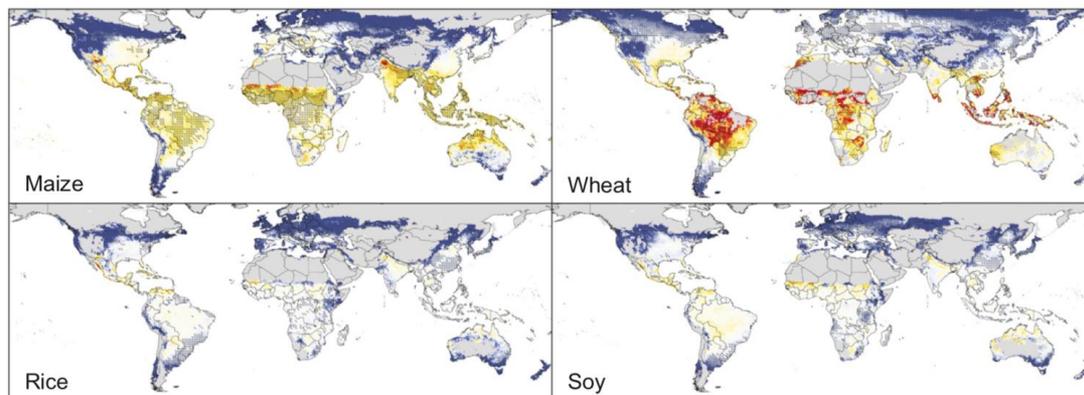
World Bank, 2010

No data

Source: World Bank (2010)

Rosenzweig et al. 2014

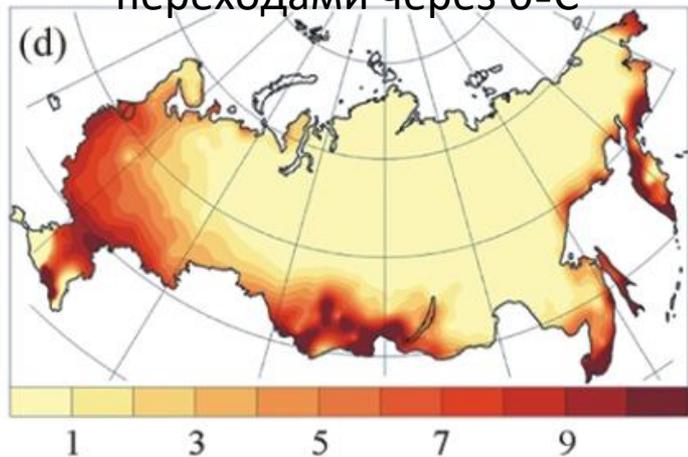
Ожидаемое изменение урожайности 4 с/х культур: кукурузы, пшеницы, риса и сои (в 2070–2099 относительно 1980–2010 гг., в %)



Ожидаемые изменения климата в России

Изменение к середине 21 века

Повторяемость дней с переходами через 0°C

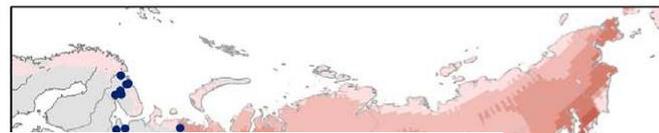


Катцов и др., 2020

Несущая способность вечной мерзлоты, %



Minimum

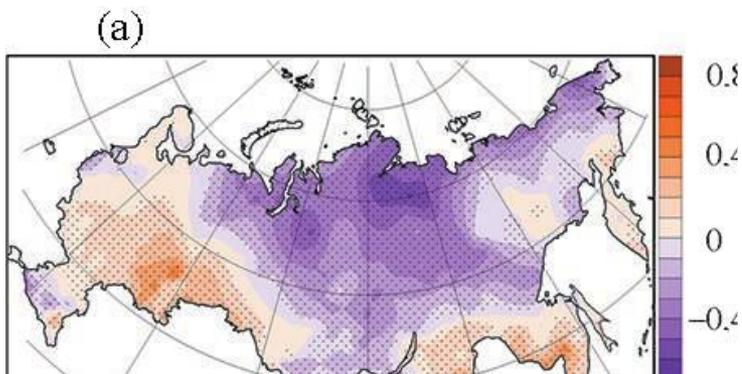


Mean



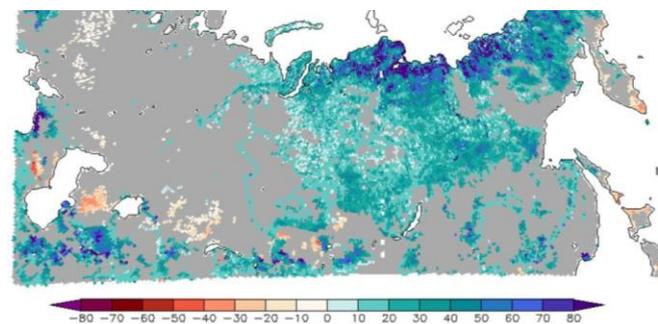
Streletsky et al., 2019

Продолжительность засушливых периодов, дни



Хлебникова и др., 2019

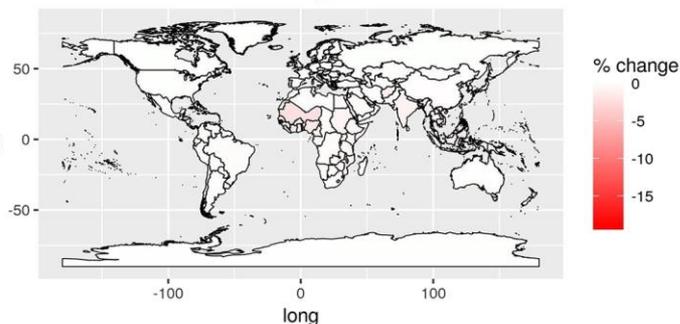
Весенний сток, %



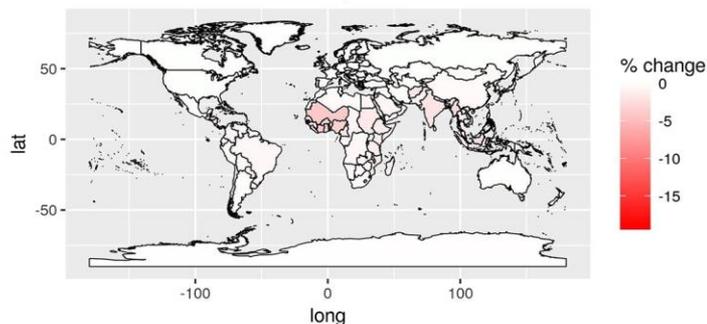
Shkolnik et al., 2018

«Цена» климатических изменений (% ВВП / год)

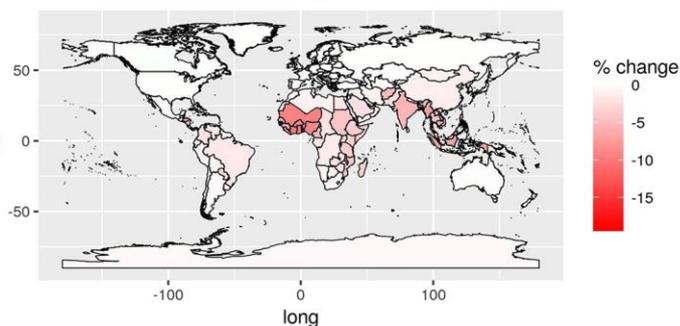
After 10 years



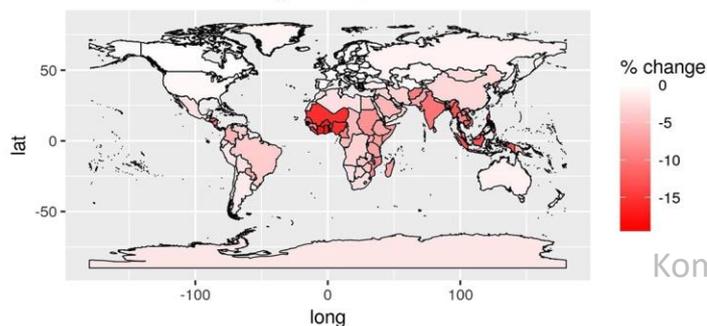
After 20 years



After 50 years



Long run impacts



Изменение % ВВП/год для разных стран при траектории глобального потепления на 3 градуса (без учета экстремальных погодных явлений)

Kompas et al, 2018

Изменение ВВП (%/год) к 2100 году при различном уровне потепления

	1 °C	2 °C	3 °C	4 °C
Казахстан	-0.37	-0.59	-0.82	-1.14
Россия	-0.27	-0.57	-0.94	-1.41
Китай	-0.76	-1.69	-2.92	-4.60
Индия	-2.92	-6.43	-10.35	-14.62

Последствия изменений климата

- Рост уровня океана (на 0,4–0,9 м. к концу 21 века), штормовых нагонов.
Затопление территорий, засоление прибрежных районов, исчезновение островов, рост числа беженцев.
- Рост температуры, рост частоты волн жары, рост засушливости.
Больше людей будет жить в экстремальных условиях; снижение расходов на отопление, рост расходов на кондиционирование.
- Изменение функций распределения осадков: сухие места станут ещё более сухими, увлажнённые – ещё более влажными.
Влияние на с/х (положительное только в северных странах, в мире в целом - отрицательное), продовольственную безопасность.
- Таяние ледников, морского льда, вечной мерзлоты.
Уменьшение доступа к питьевой воде, проблема для объектов строительства и инфраструктуры в северных регионах, доступ к Арктике (СМП, полезные ископаемые).
- Рост кислотности океана, уменьшение содержания кислорода в воде.
Исчезновение экосистем, сокращение рыбного промысла (в Арктике — рост).
- Рост интенсивности и частоты экстремальных погодных явлений
Экономический ущерб, рост числа жертв среди населения.