

Глобальные и региональные изменения климата: причины, прогнозы, последствия

Александр Чернокульский

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук

a.chernokulsky@ifaran.ru

5 июня 2024

IV Всероссийская школа молодых
учёных «Системный анализ
динамики природных процессов в
российской Арктике»

Что такое климат?

Климат — от греческого слова ‘*klima*’ (наклон)

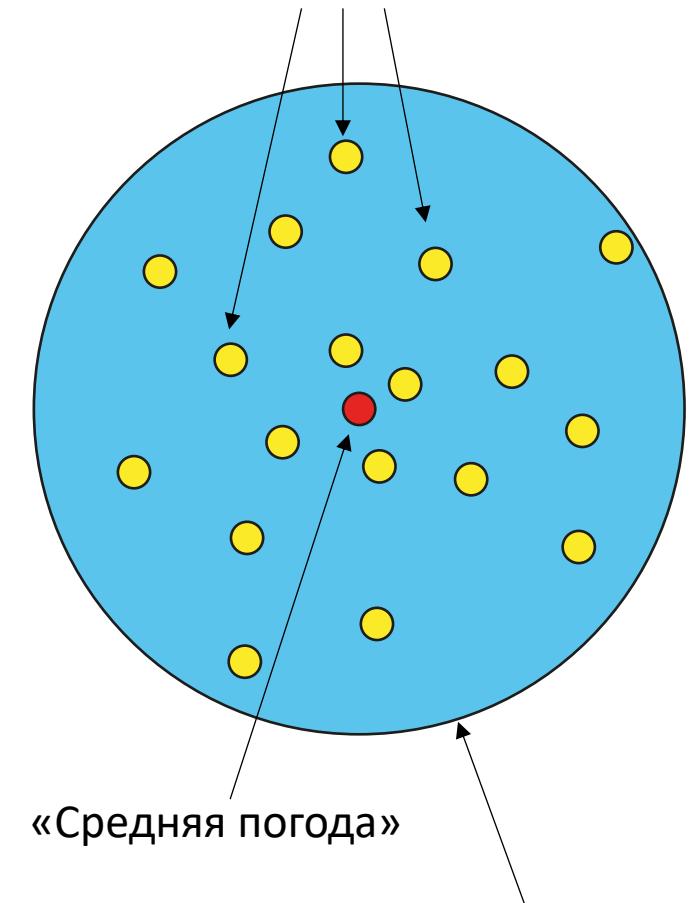
Состояние атмосферы (всех климатических оболочек) в единичный момент времени (глобально или в одном месте)

В узком («вульгарном») понимании, климат — это «средняя погода», присущая данному месту Земли в силу его положения

В более широком понимании, климат — это совокупность всех «глобальных» погод за много лет

В ещё более широком понимании, климат — это статистический режим (ансамбль состояний) не только атмосферы, но всех оболочек климатической системы, испытывающий колебания с длинными периодами

Эволюция представлений
о климате

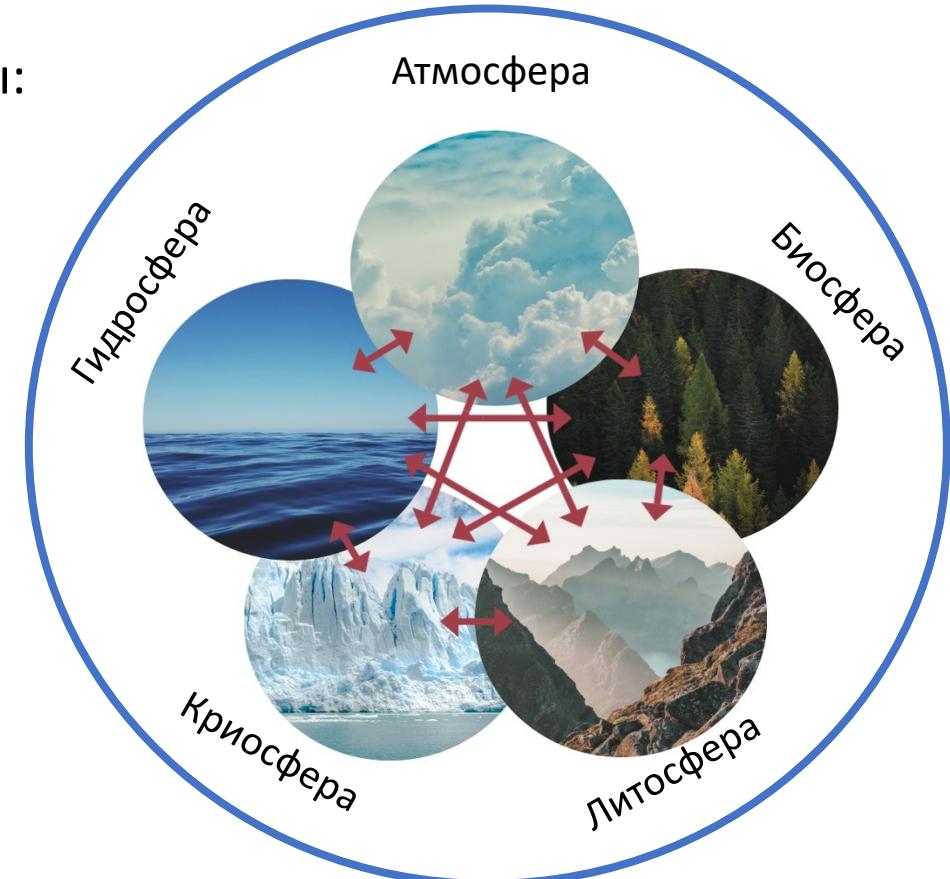
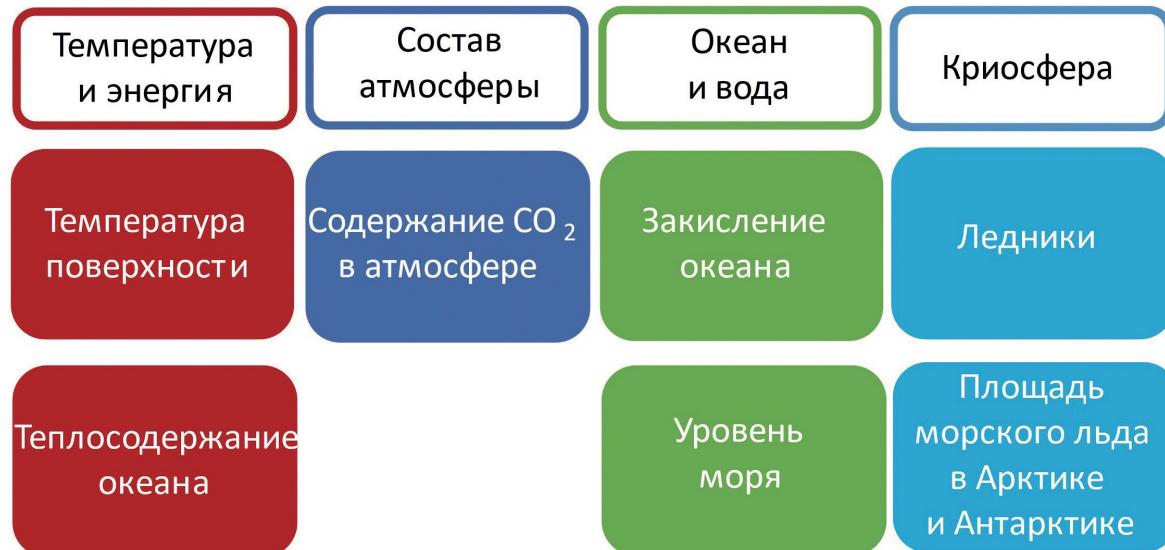


«Средняя погода»
Совокупность (ансамбль)
всех возможных состояний

Компоненты и индикаторы

Основные компоненты (оболочки) климатической системы:

- Атмосфера
- Гидросфера (океан, реки, болота и т.д.)
- Литосфера (верхний деятельный слой суши)
- Криосфера (ледники, снег, мерзлота)
- Биосфера (наземные и морские экосистемы)



Основные индикаторы изменений климата

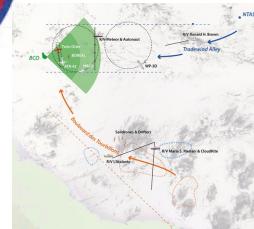
Совокупность знаний о климате

Систематические наблюдения



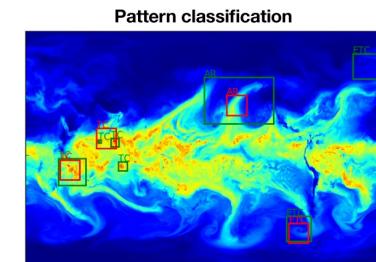
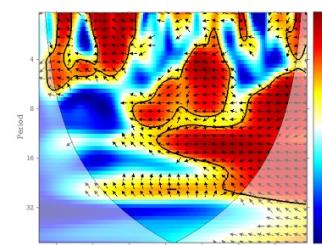
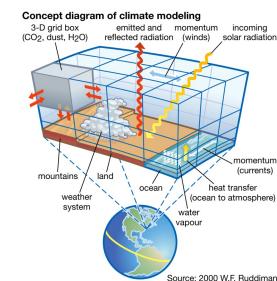
Системы мониторинга, наземные и спутниковые наблюдения, автоматизированные буи, радары, содары и т.д.

Proxy-данные



Эксперименты, палеоданные, наблюдательные кампании

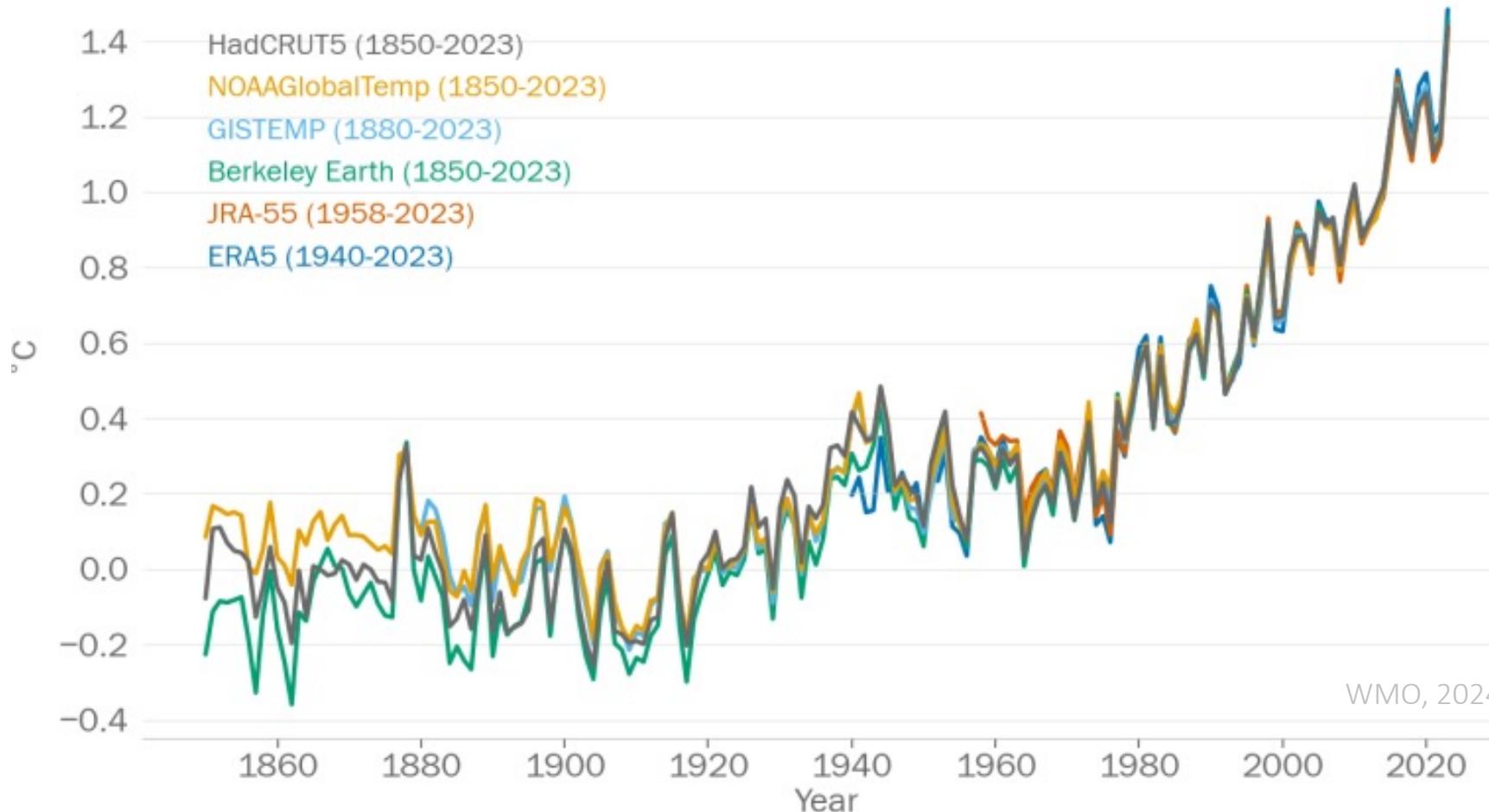
Теоретические методы



Численные модели климата, теоретические исследования гидродинамики, термодинамики, радиационного переноса, анализ рядов данных, машинное обучение

Изменение приповерхностной температуры

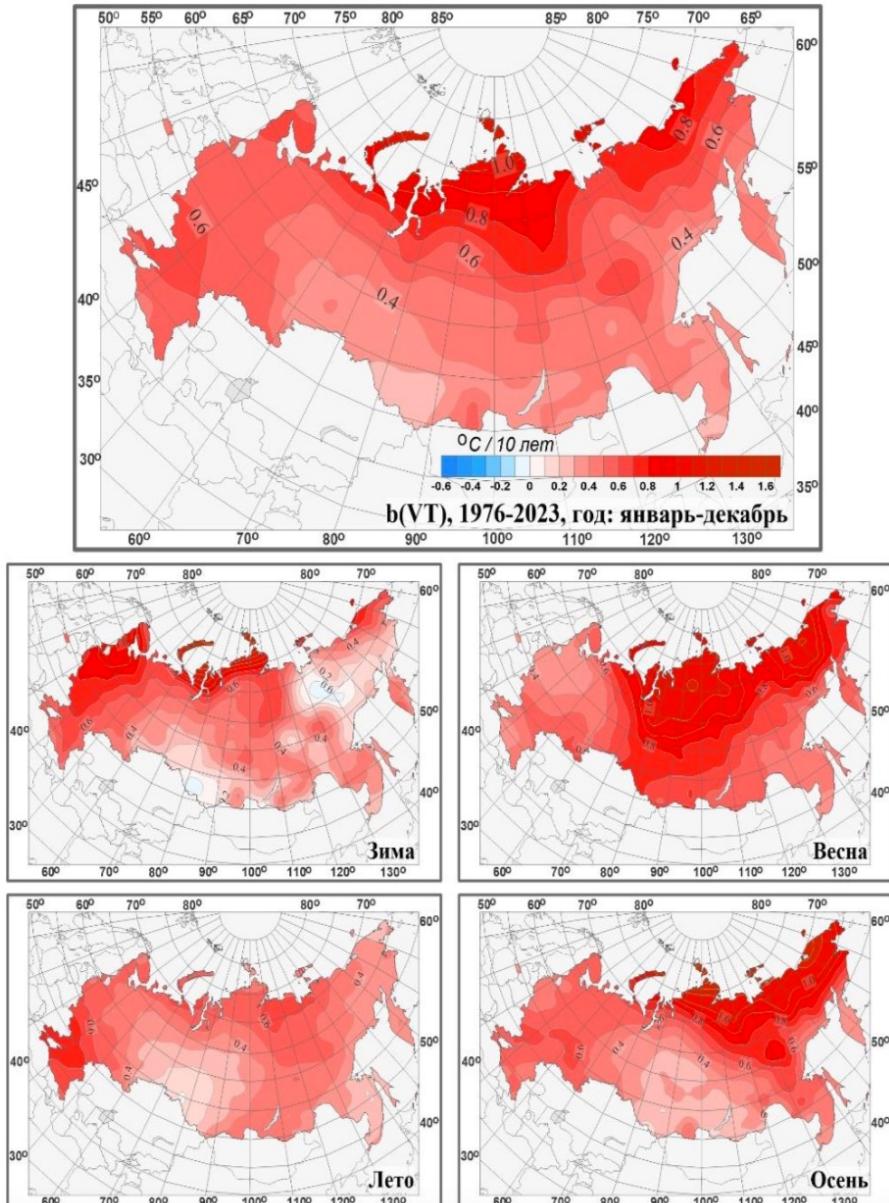
Аномалии глобальной приземной температуры
(относительно средней за 1850-1900 гг.)



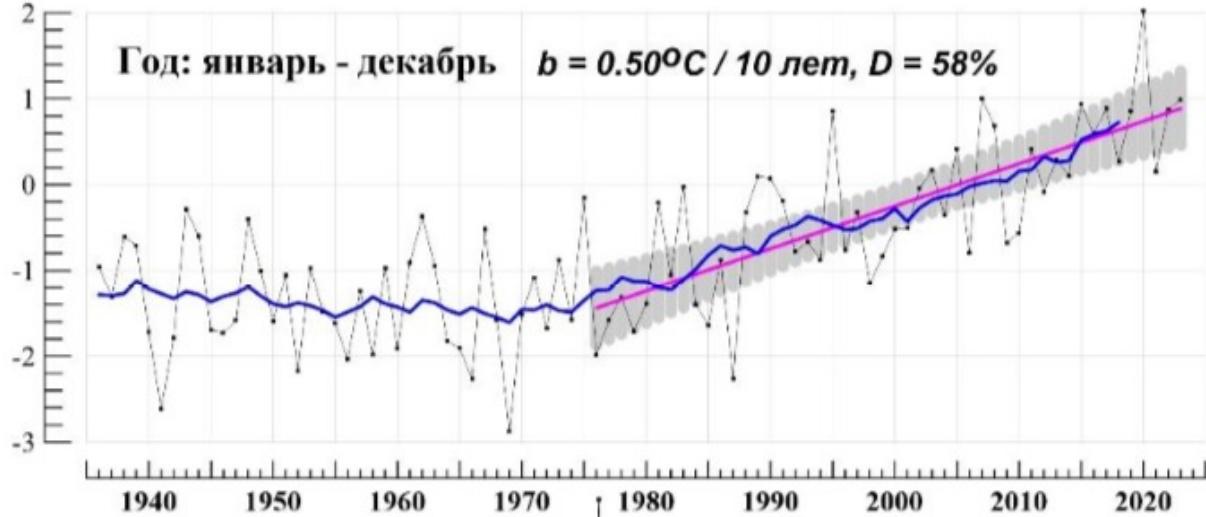
Аномалия глобальной температуры в 2023 году:
 $1.45 \pm 0.12 ^{\circ}\text{C}$

2023 – самый жаркий год в истории инструментальных наблюдений

Температура воздуха в России

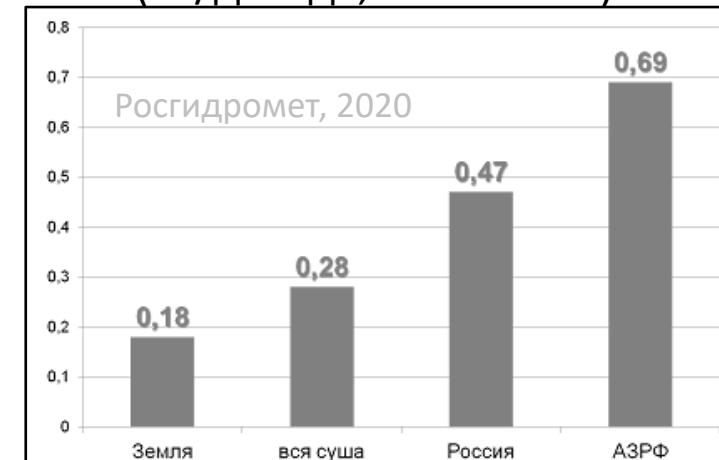


Изменение среднегодовой температуры воздуха над Россией



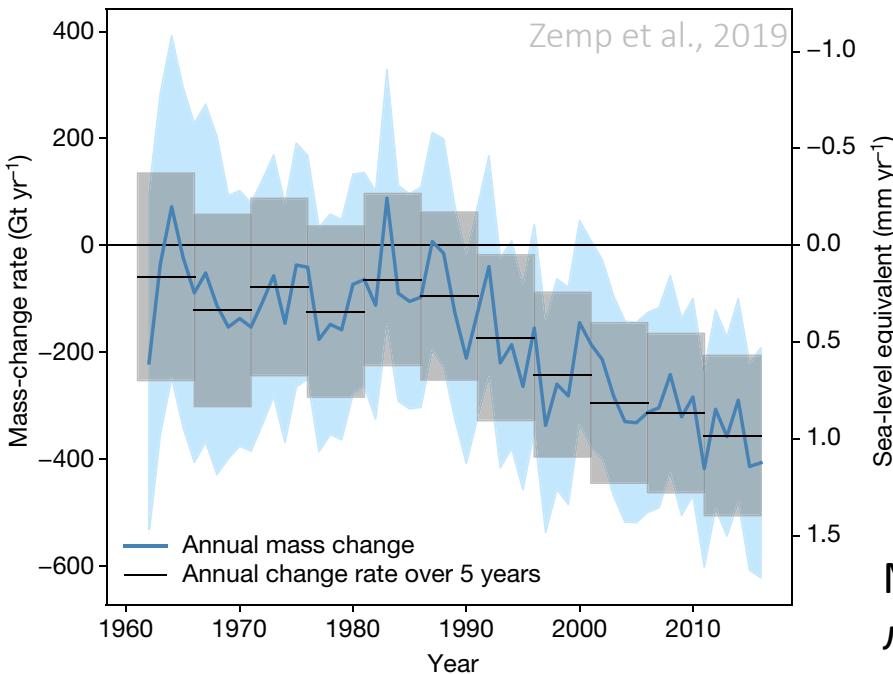
Росгидромет, 2024

Тренды температуры
(°C/декада, 1976–2019)



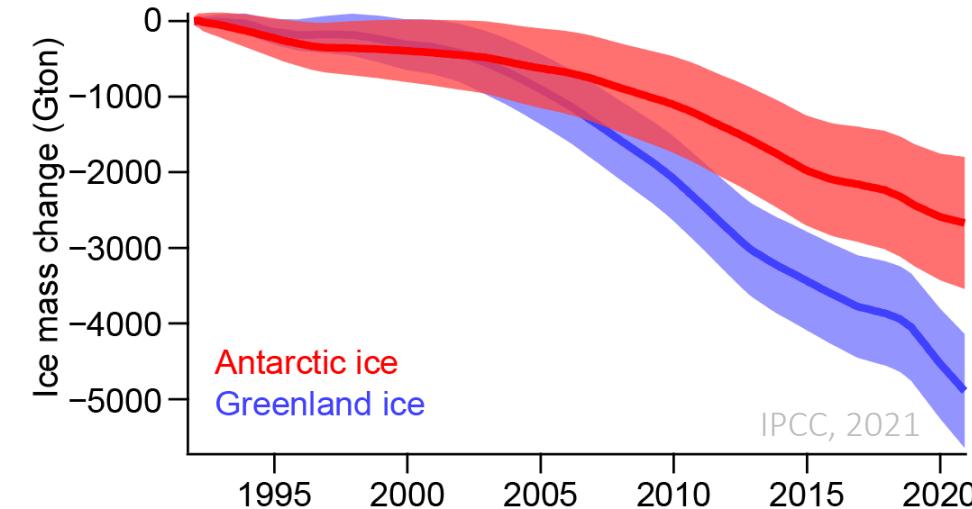
Коэффициент линейного тренда среднегодовой и средних сезонных значений температуры приземного воздуха на территории России за период 1976-2023 гг.

Ледники, морской лед, уровень моря

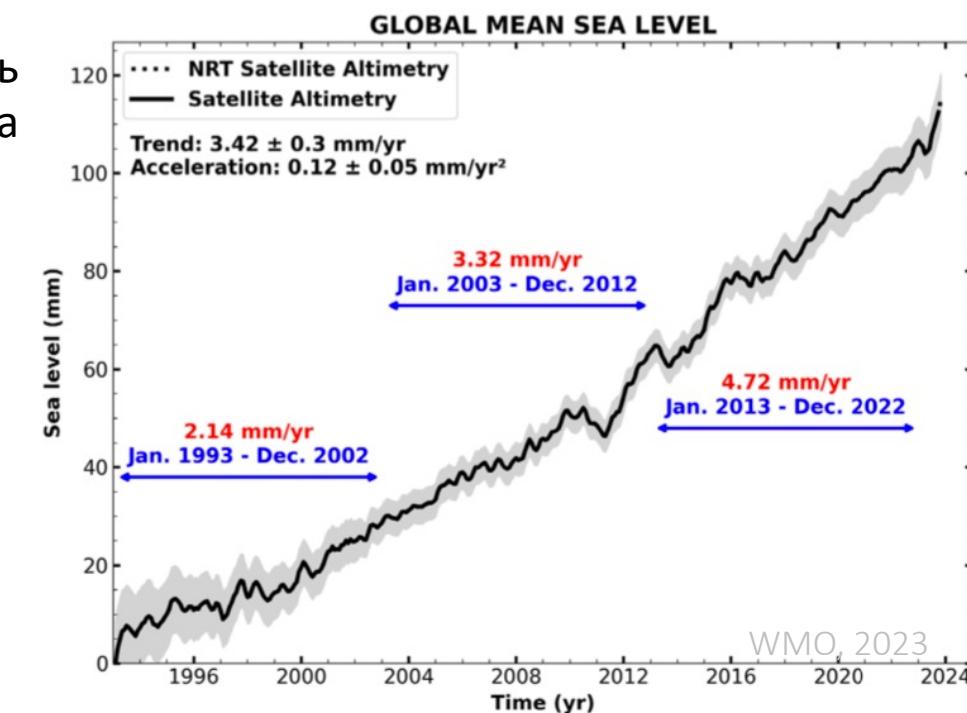


Уровень
океана

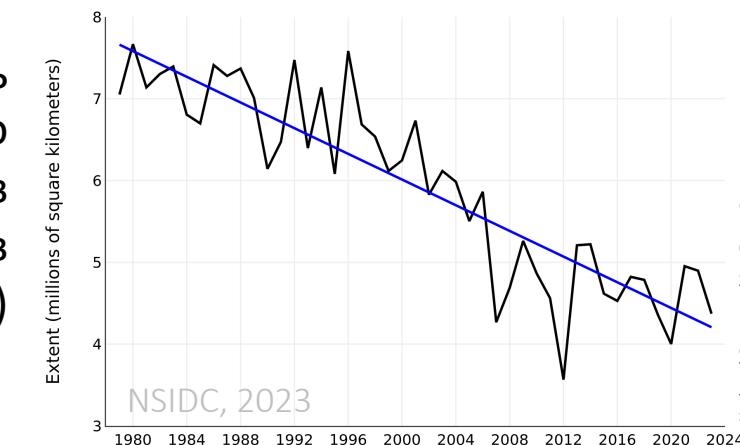
Масса горных
ледников



Масса
Антарктического и
Гренландского
ледовых щитов



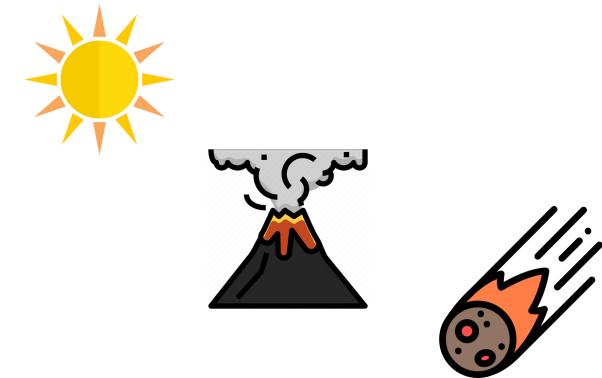
Площадь
морского
льда в
Арктике (в
сентябре)



Почему климат меняется?

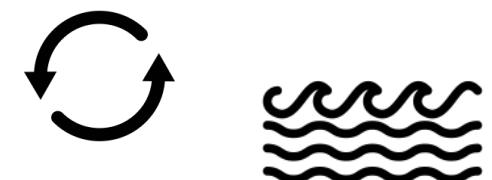
Внешние факторы:

- астрономические факторы (солнечная активность, параметры орбиты, магнитное поле Земли, космические лучи);
- геологические факторы (извержение вулканов, внутреннее тепло);
- импактные события (удар метеоритов).



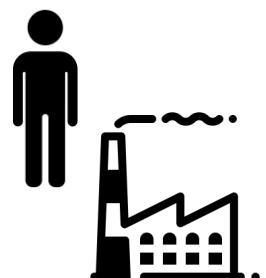
Внутренние факторы:

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

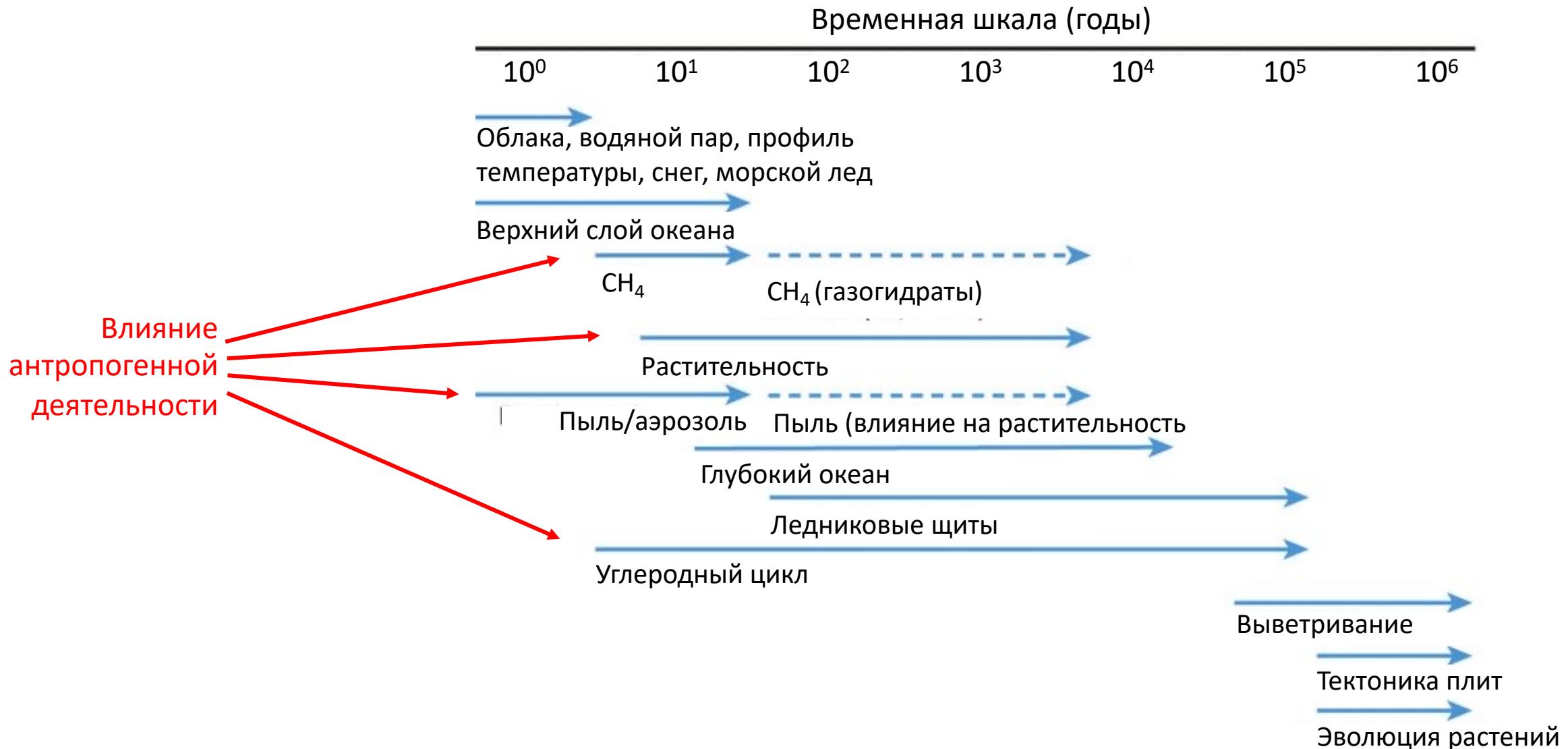


Антропогенный фактор (внешний → внутренний фактор):

- изменение свойств земной поверхности (выведение лесов, распашка, ветровые и гелиоэнергетические установки);
 - изменение состава воздуха (парниковый эффект, аэрозоли, воздействие на озоновый слой и т.д.);
- + гипотетическое влияние: геоинжиниринг, «ядерная зима».



Изменчивость на разных временных масштабах



Адаптировано из: PALAEOSENS Project, 2012

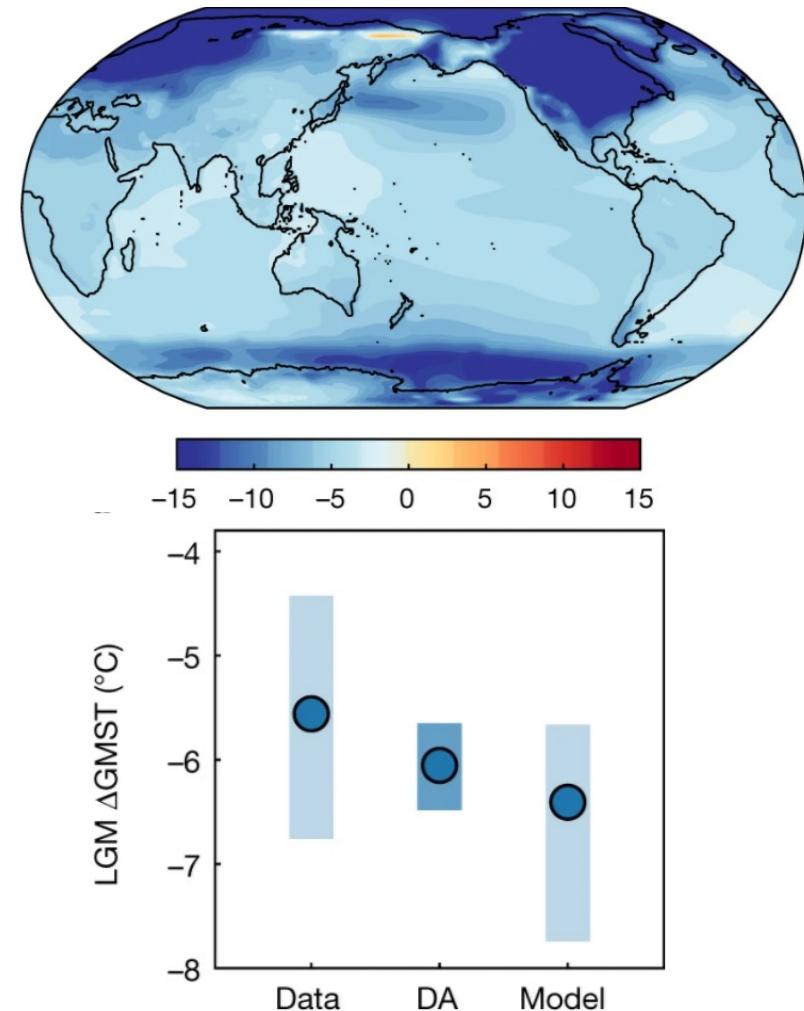
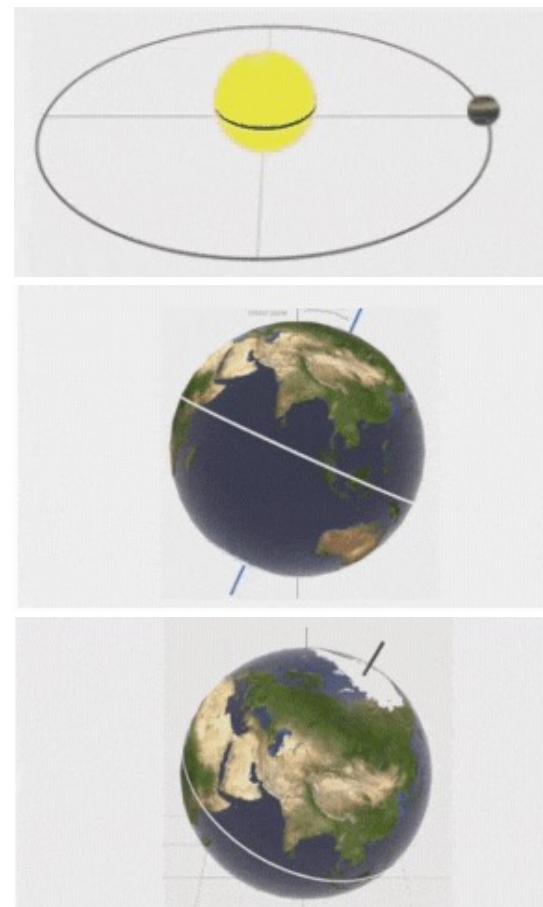
Циклы Миланковича



Циклы Миланковича (в честь сербского ученого Милутина Миланковича) – долгопериодные колебания солнечной энергии, приходящей к поверхности Земли, обусловленные изменением астрономических характеристик.

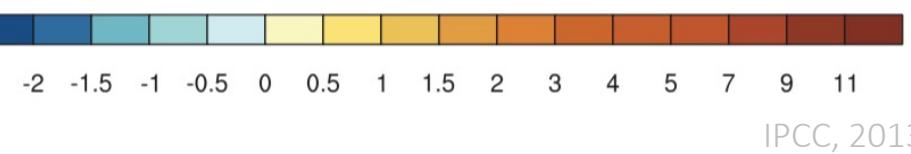
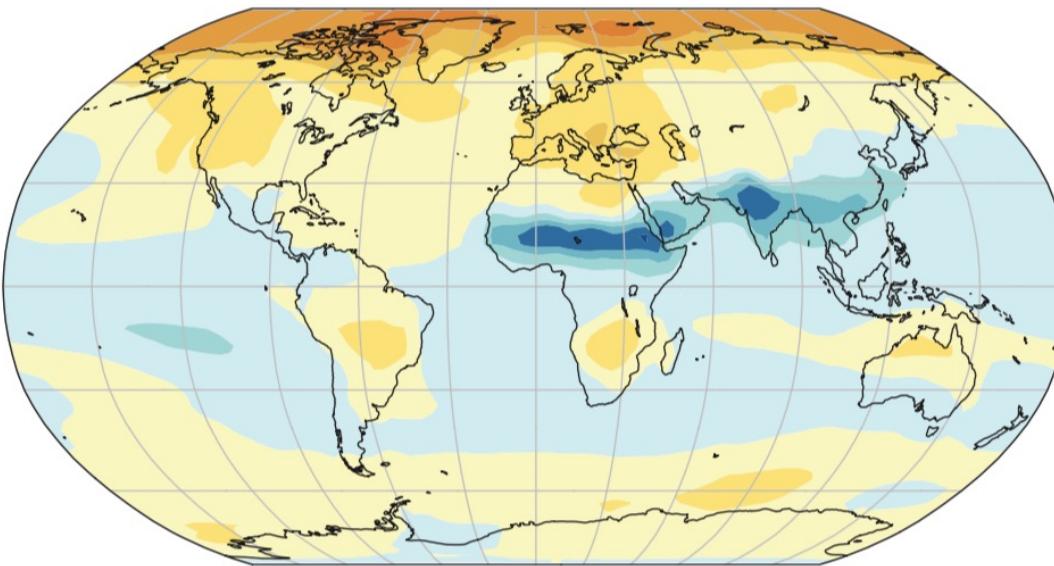
Период циклов:

- Эксцентриситет орбиты Земли: **95, 125, 400 тыс. лет**
- Колебания угла наклона земной оси к плоскости её орбиты: **41 тыс. лет**
- Прецессия оси орбиты: **19, 22, 24 тыс. лет**

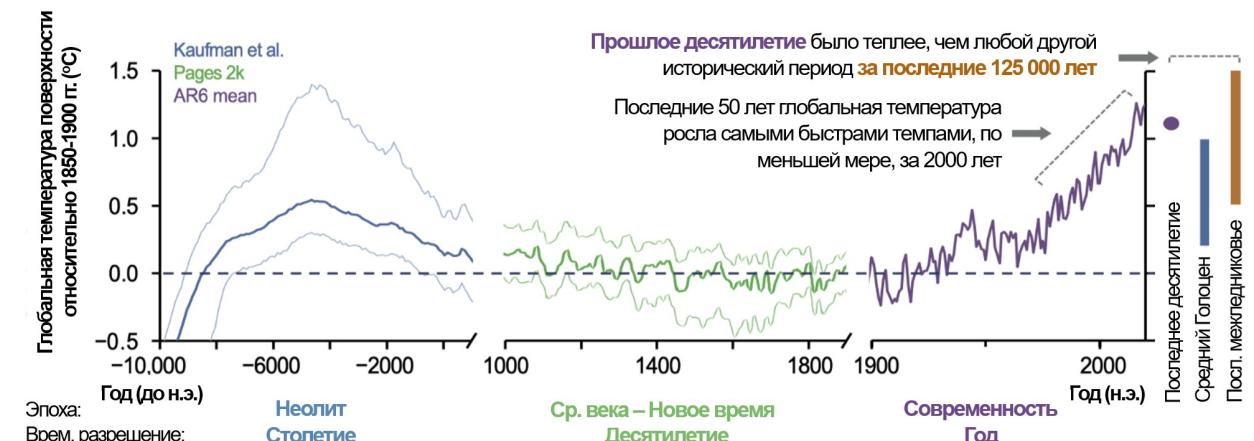


Разница глобальной температуры воздуха между ледниковыми и межледниковыми эпохами

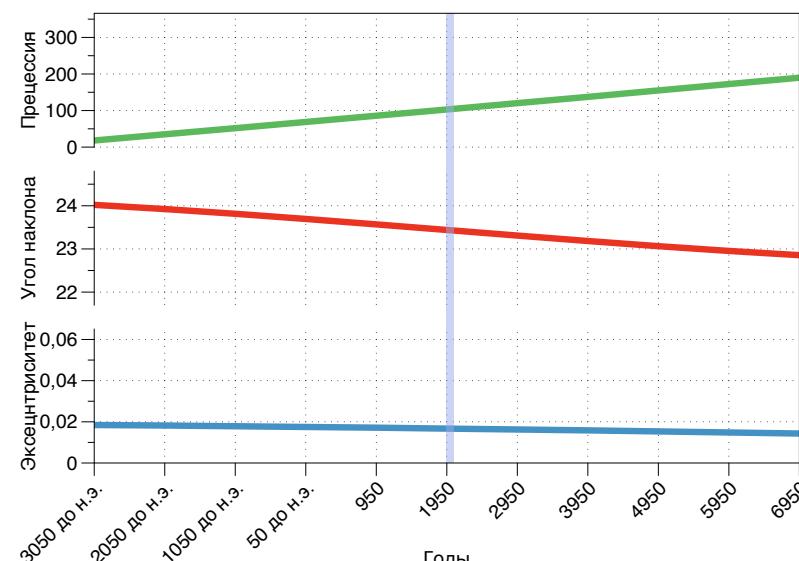
Максимум межледниковых и современная Т



Разница глобальной температуры
воздуха между максимумом
межледниковых и современным
потеплением



Глобальная температура за последние 10
тысяч лет

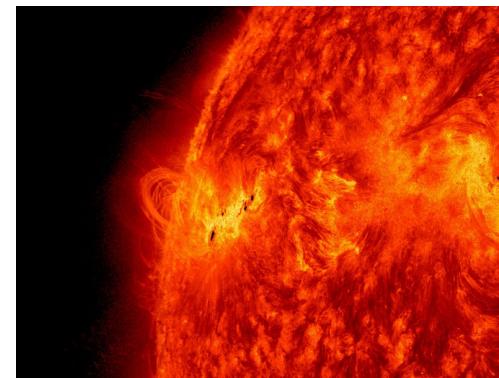


Laskar et al, 2004

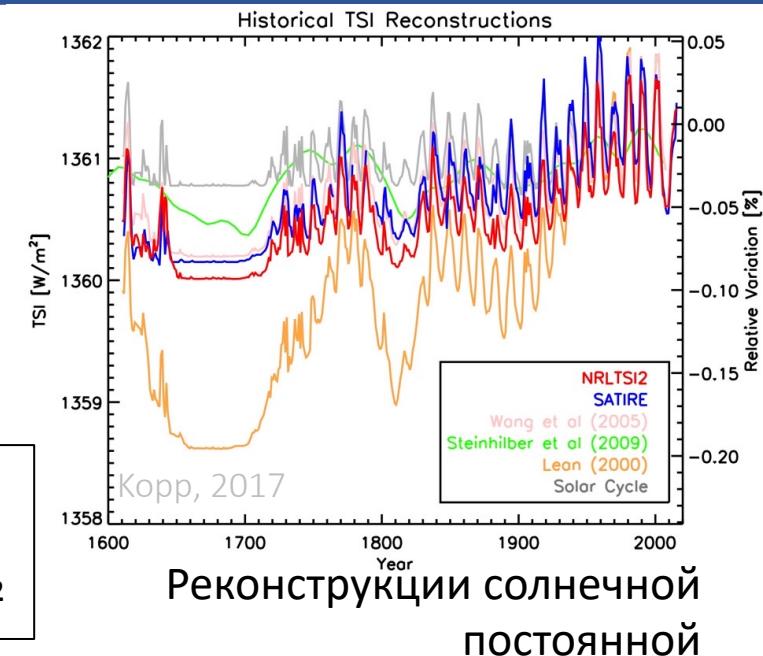
Солнечная активность

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 (с
конца 1970х солнечное излучение
оценивается по спутниковым данным)
Циклы: 11-летний (цикл Швабе), 70-100
летний (цикл Глейсберга).



Изменчивость солнечной
постоянной: $\sim 1 \text{ Вт}/\text{м}^2$
Для поверхности Земли: $<0.2 \text{ Вт}/\text{м}^2$

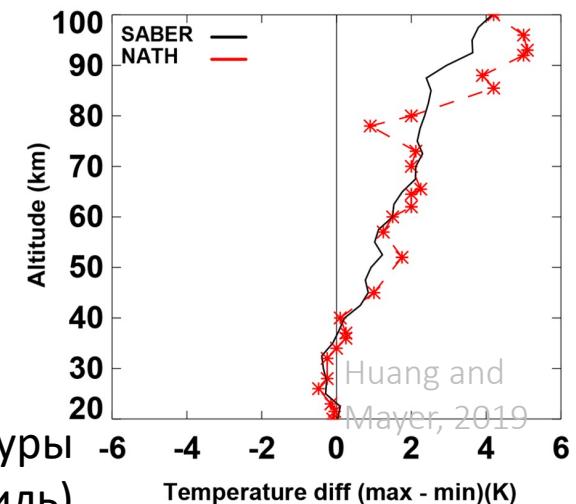


Изменение групповых солнечных пятен



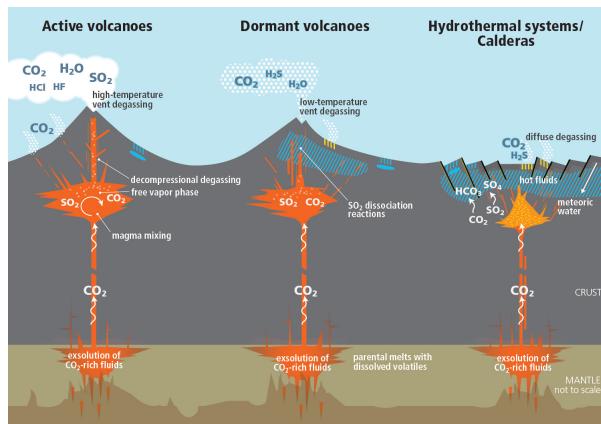
Clette et al., 2014

Отклик температуры
(вертикальный профиль)



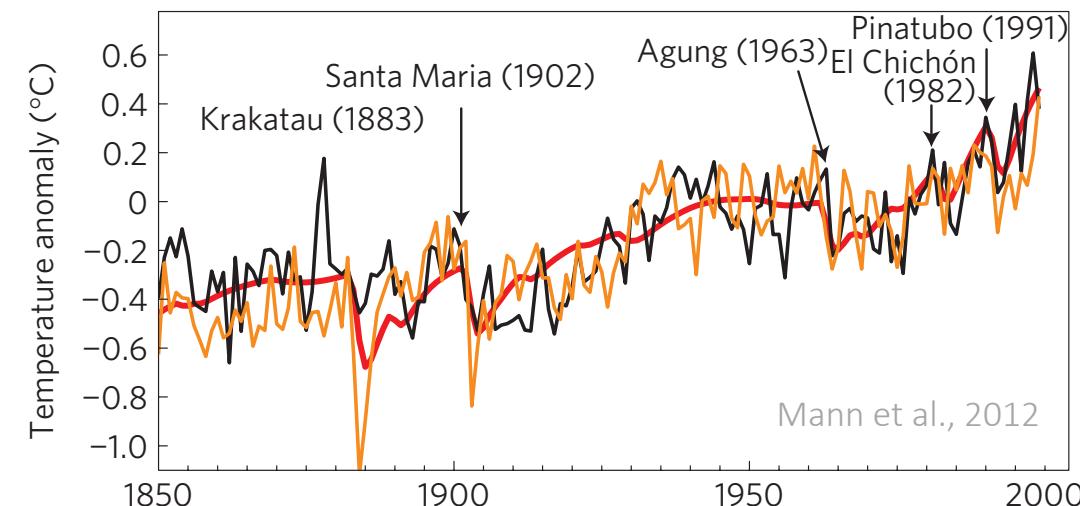
Влияние вулканов на климат

Крупные извержения вулканов в тропиках: выброс в стратосферу огромного количества пепла и сульфатных аэрозолей создает «экран», отражающий часть солнечного света. Это ведет к похолоданию. Периоды с повышенной вулканической активностью - > холодный климат.



Поток CO₂ от вулканов: ~300–400 млн тонн CO₂/год
Антropогенная деятельность: ~38 млрд тонн CO₂/год

Извержение Пинатубо (1991): ~42 млн тонн CO₂
Антrop. деятельность в 1991: ~23 млрд тонн CO₂



Изменение температуры и извержения вулканов

Импактные события

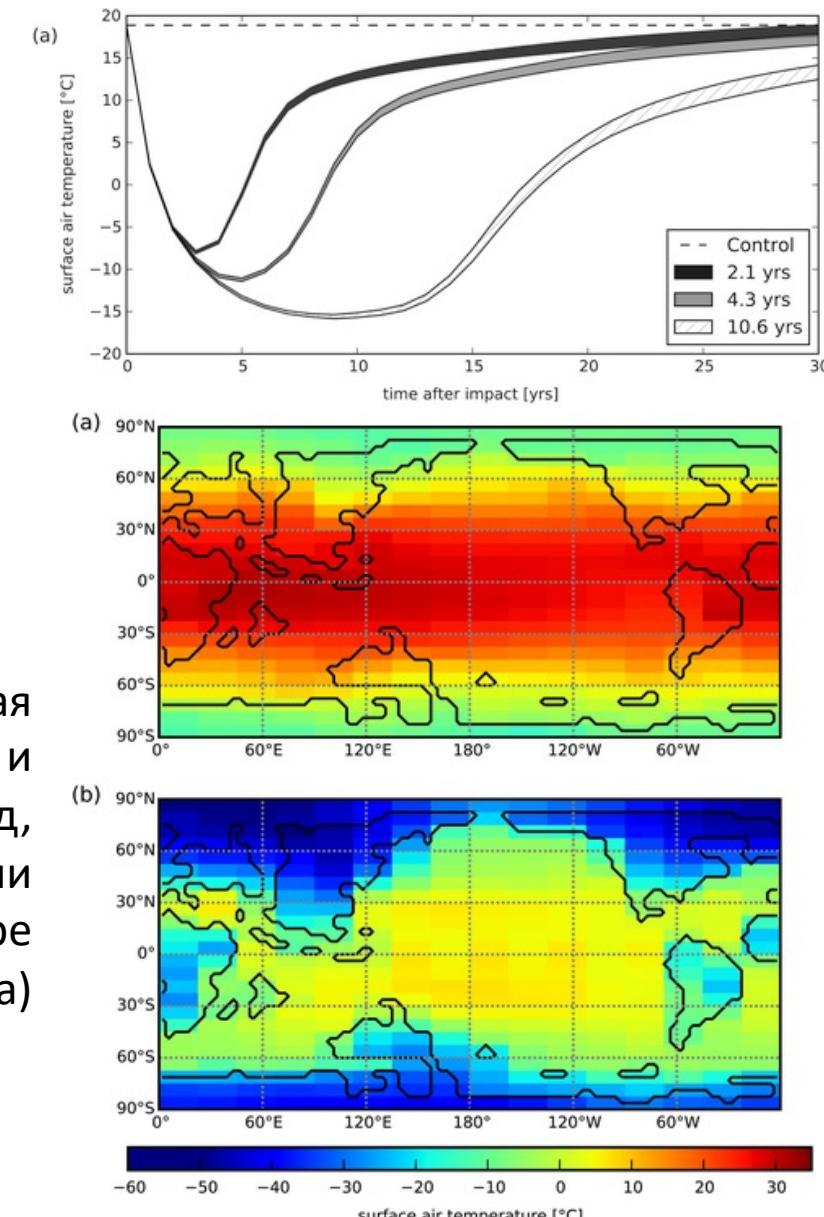


Чикшулуб — древний ударный кратер диаметром около 180 км (один из крупнейших на земле), от метеорита диаметром около 10 км.
66,5 млн лет назад

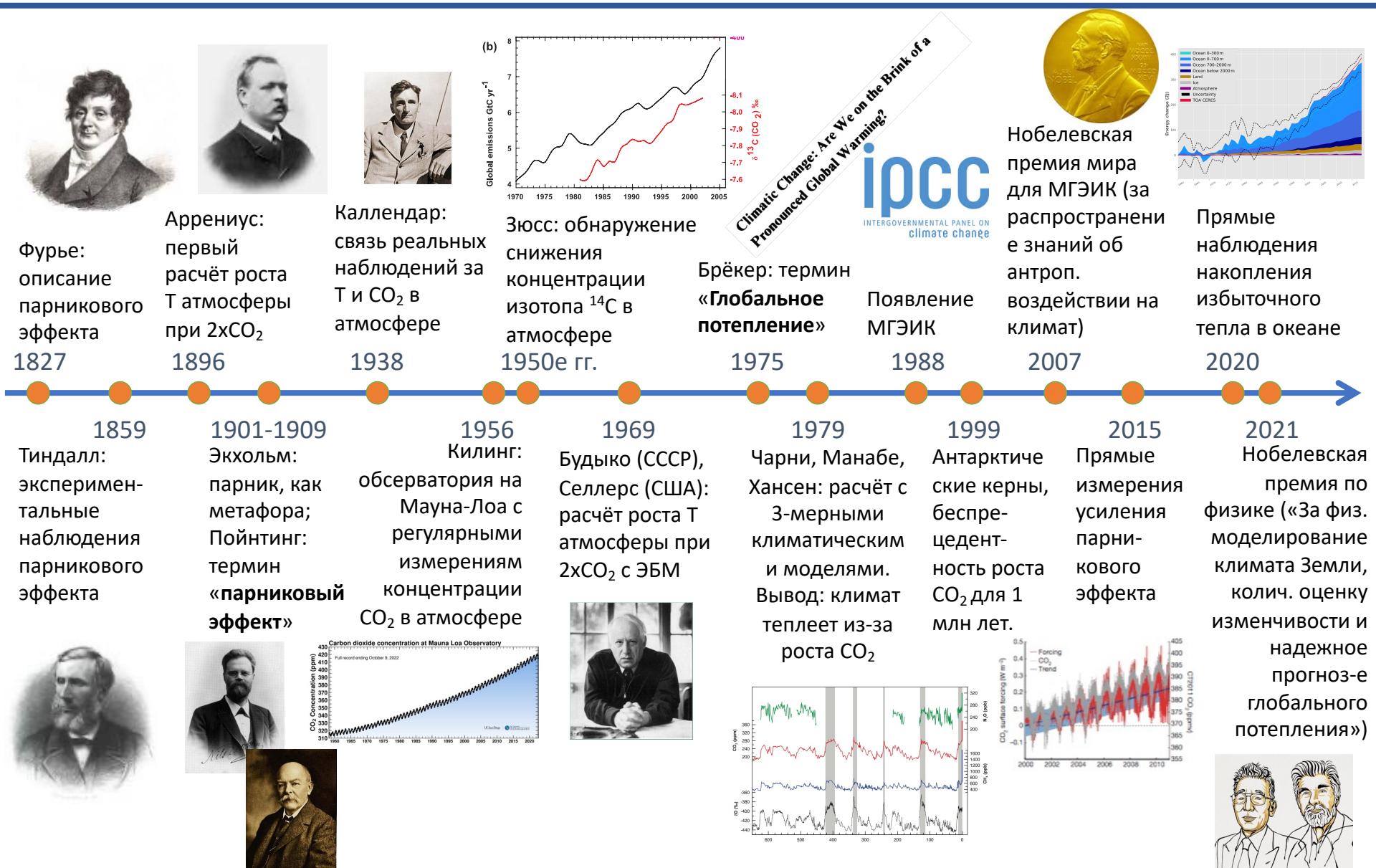
Энергия удара оценивается в 100 тератонн в тротиловом эквиваленте (суммарная мощь ядерных боеголовок всего человечества порядка 0,005 тератонны)
Мог быть одной из причин мел-палеогенового вымирания видов

Изменение глобальной температуры по данным численного моделирования (при разной жизни аэрозоля в стратосфере)

Среднегодовая температура (до удара и в самый холодный год, для времени жизни аэрозолей в стратосфере в 2.1 года)

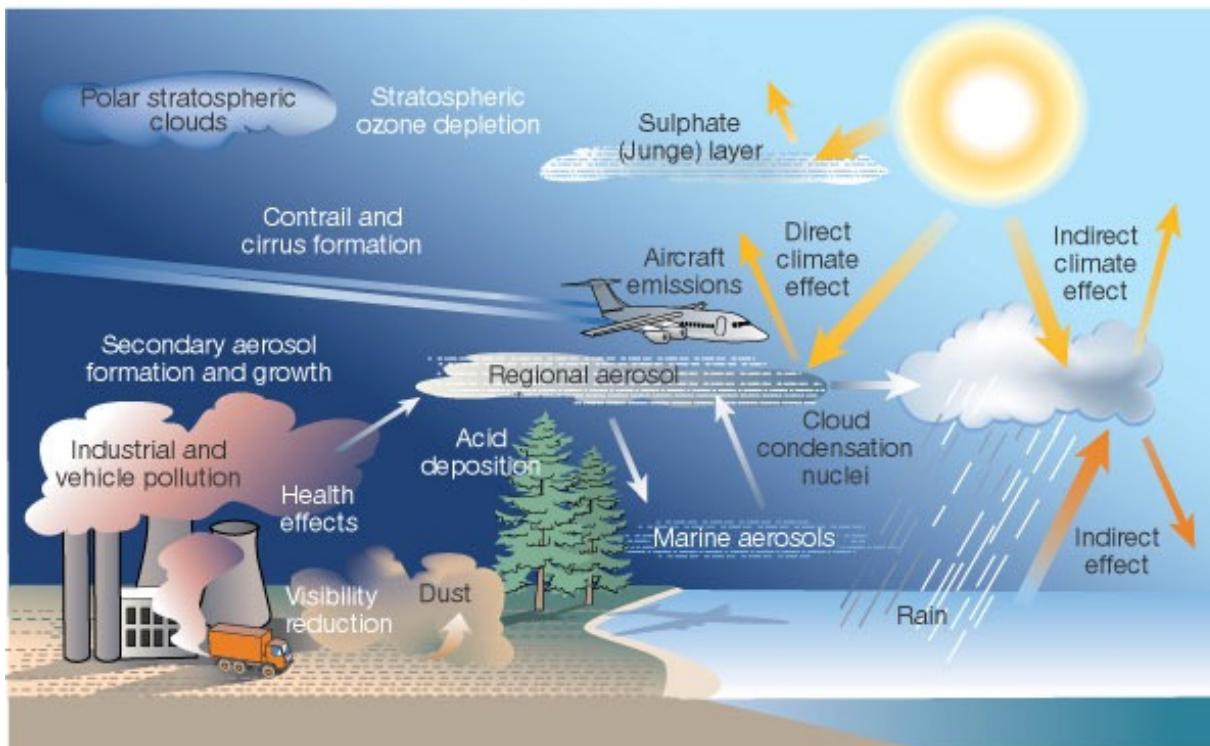


Теория антропогенной природы изменений климата



Влияние человека: эмиссии аэрозолей

Аэрозоли: множественные эффекты (прямые, косвенные) — главным образом, охлаждающий эффект для климата (сульфатные аэрозоли), сажа — и охлаждающий и нагревающий эффекты. Аэрозоли ухудшают качество воздуха

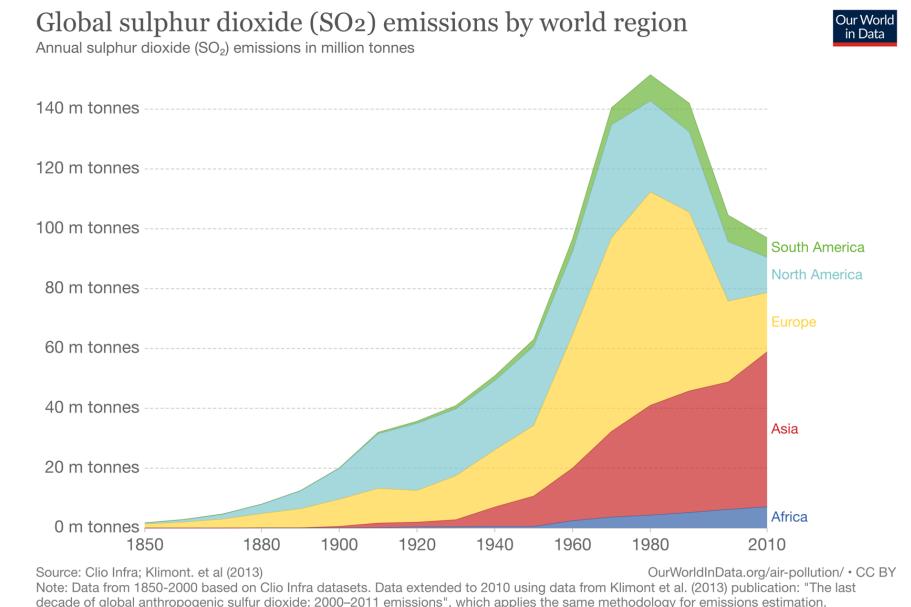


Petzold and Karcher, 2012

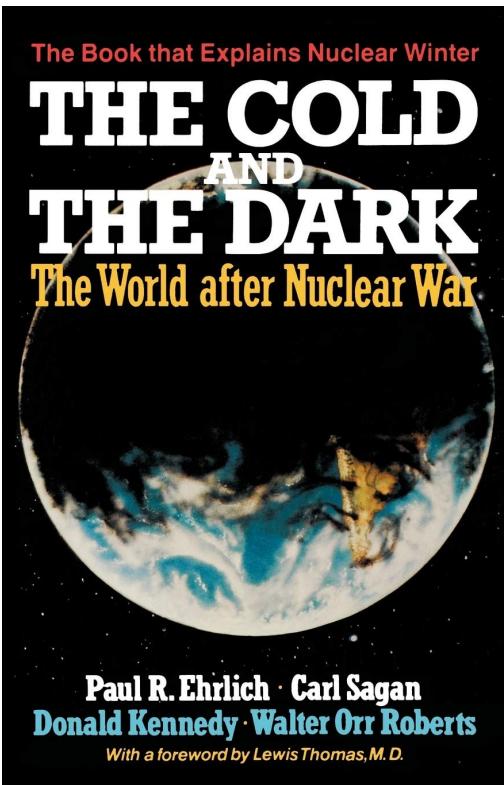


Лондон, декабрь 1952, «Великий смог»

Эмиссии сульфатных аэрозолей



«Ядерная зима»



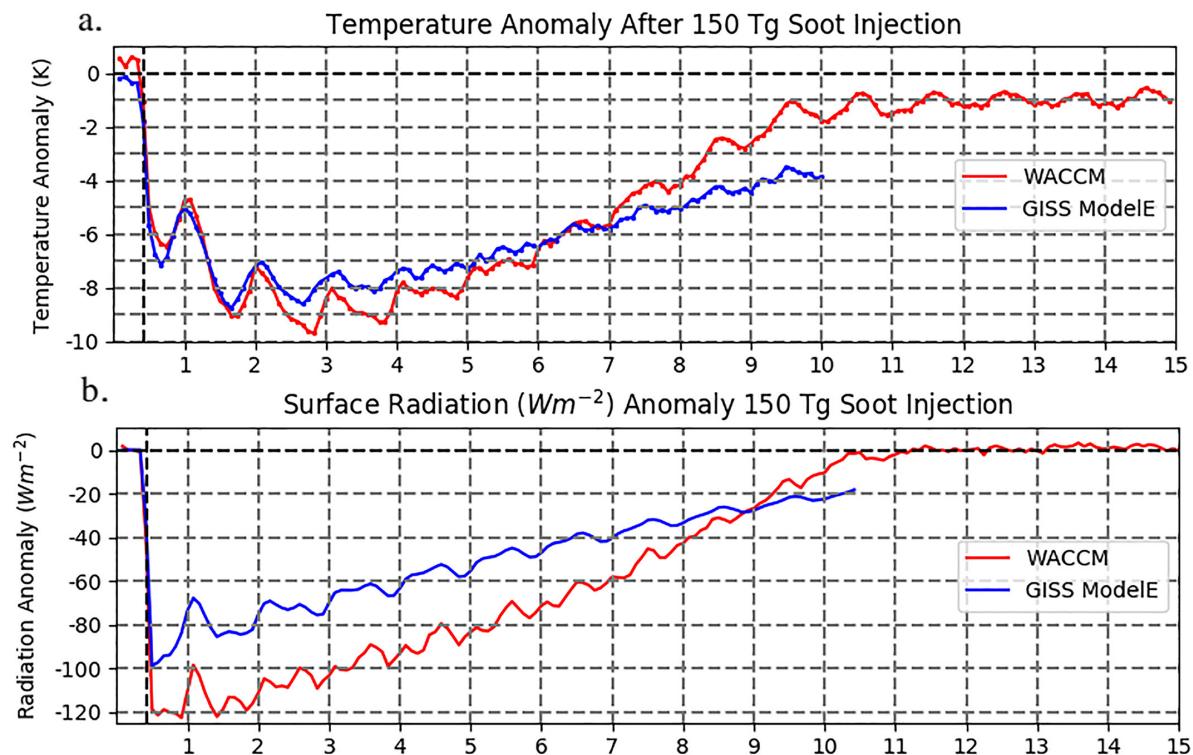
1980-е гг: работы Крутцена, Сагана, Голицына, Гинзбурга, Моисеева, Александрова, Стенчикова: в результате ядерных ударов в атмосферу попадет большое количество сажи от пожаров, которая создаст аэрозольный экран, отражающий часть солнечного света в космос. В результате на поверхности Земли температура понизится на 5–10°, существенно сократится вегетационный период.

Georgi Golitsyn
Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences
Aleksandr Ginsburg
Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Natural analogs
of a nuclear catastrophe

Today mankind has reached such a level of development that it can modify natural situation on the Earth more than all catastrophes, known or conceivable, except perhaps for collision with a large celestial body. Beyond the direct material destruction and the immediate loss of human life by the hundreds of millions, a nuclear war causes radioactive contamination over vast land spaces, depletion of the protective stratospheric ozone layer, multiple urban and forest fires, and firestorms. There are more or less relevant physical analogs in nature for some of the effects that might be expected as a result of a nuclear war. On the Earth, such catastrophic natural phenomena include earthquakes, floods, droughts, falls of large meteorites, volcanic eruptions, and massive wildfires. On Mars, there are global dust storms. Investigation of these phenomena provides a better understanding and more accurate conception of the possible consequences of a nuclear war. The nuclear war would be unlike any war or natural disaster known to us from past history due to the massive and unpredictable secondary long-term effects. They are consequences which, in the case of a nuclear war, would be critical for the immediate survivors of nuclear blasts. Far from all of the likely global consequences—human and ecological—a few remote regions of the Earth. A nuclear war would spell catastrophe for everyone without exception.

Изменение аномалий температуры и приходящей к поверхности радиации после гипотетической ЯВ

Coupe et al., 2019



Эмиссии парниковых газов

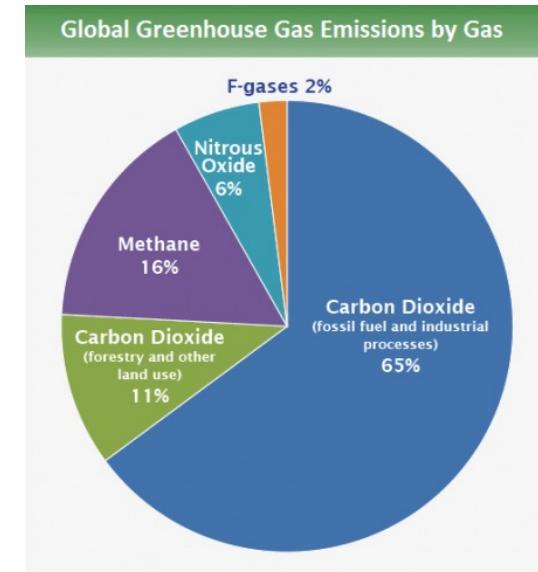


Выбросы парниковых газов, в первую очередь CO₂ — влияние на парниковый эффект

Эмиссии:

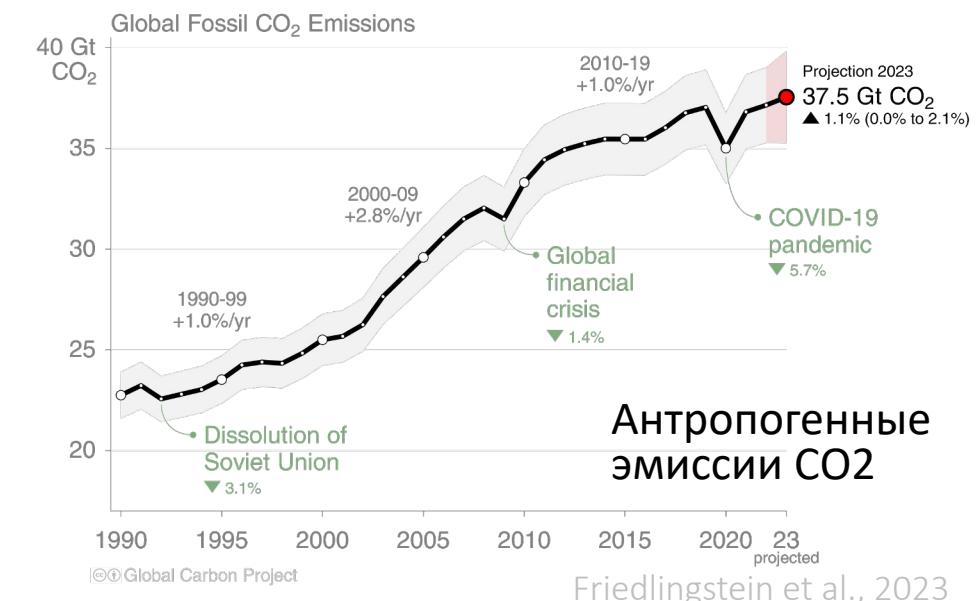
~37 млрд тонн CO₂/год
~10 млрд тонн C/год
~50 млрд тонн CO₂e/год

(млрд тонн – гигатонны, петаграммы)
CO₂/C = 44/12 = 3.67

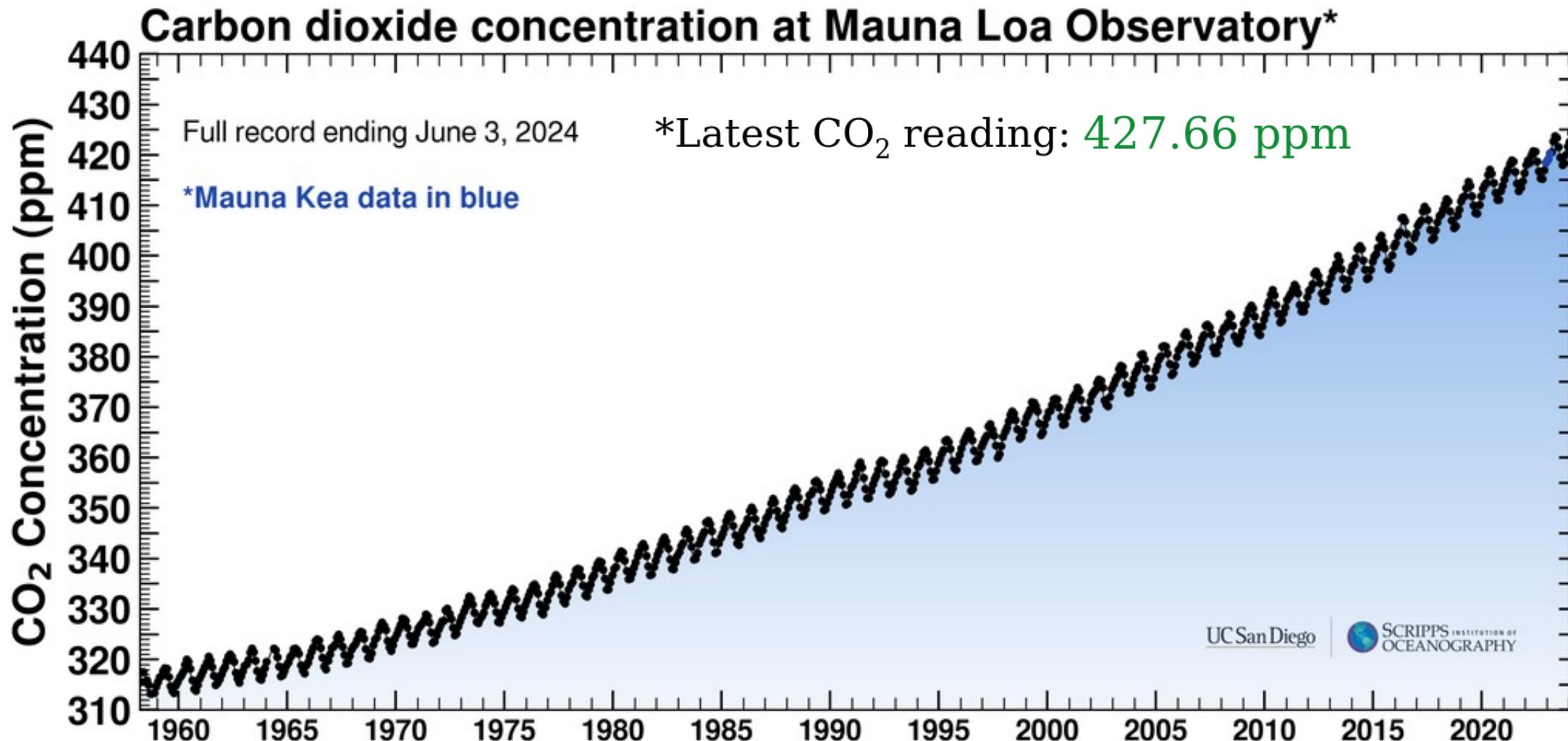


IPCC, 2014

CO₂-эквивалент: условная единица, используемая для сравнения выбросов различных парниковых газов на основе их потенциала глобального потепления (обычно — на временном горизонте 100 лет) путем преобразования количества других газов в эквивалентное количество диоксида углерода с таким же потенциалом глобального потепления.



Концентрация CO₂ в атмосфере



Концентрация CO₂ в атмосфере по данным наблюдений на обсерватории Мауна-Лоа

Парниковый эффект

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

Основные парниковые газы:

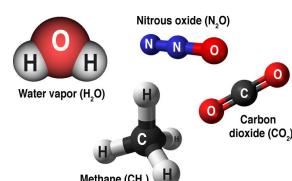
Водяной пар (H_2O)

Диоксид углерода (CO_2)

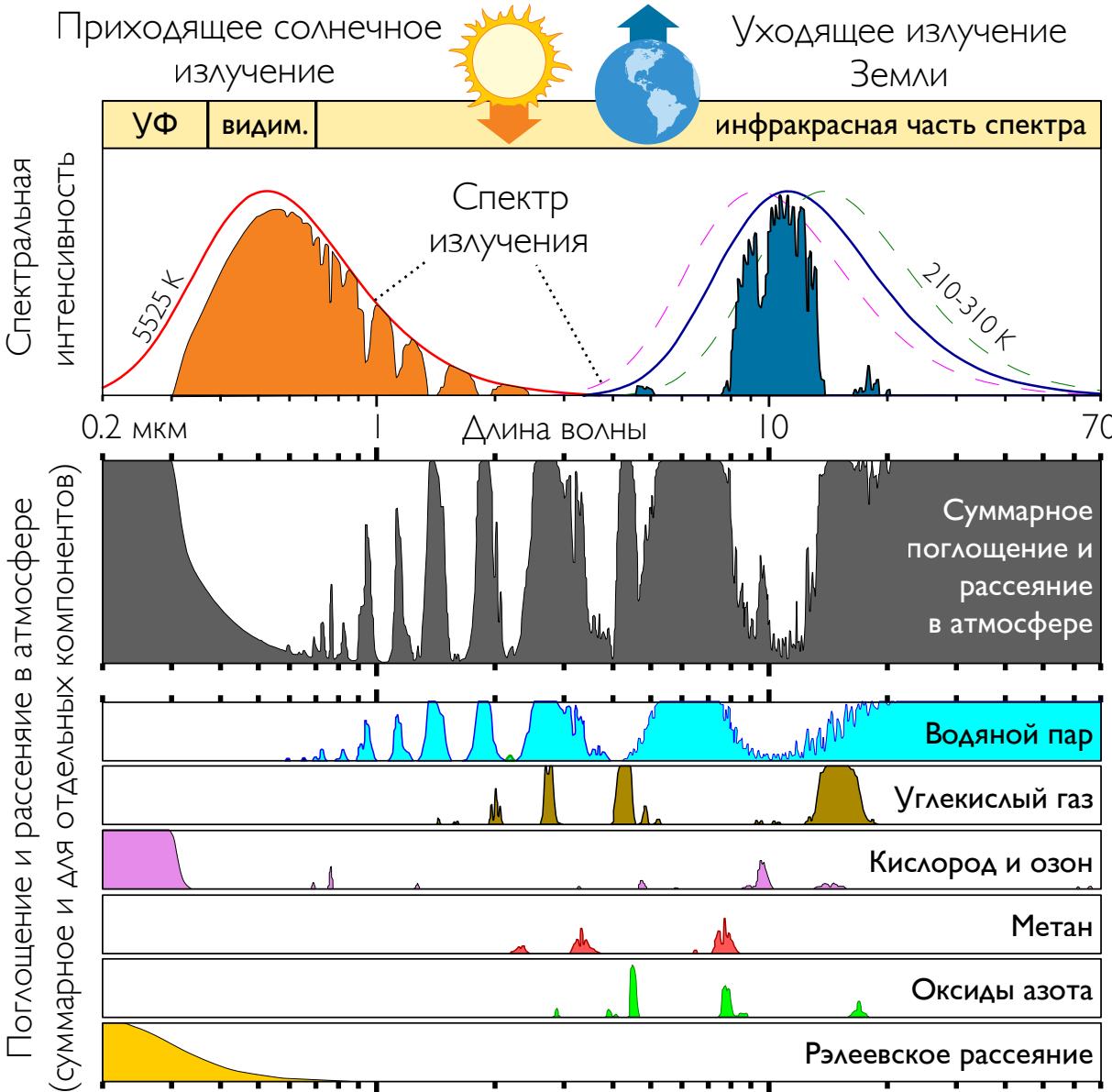
Метан (CH_4)

Озон (O_3)

Закись азота (NO_2)

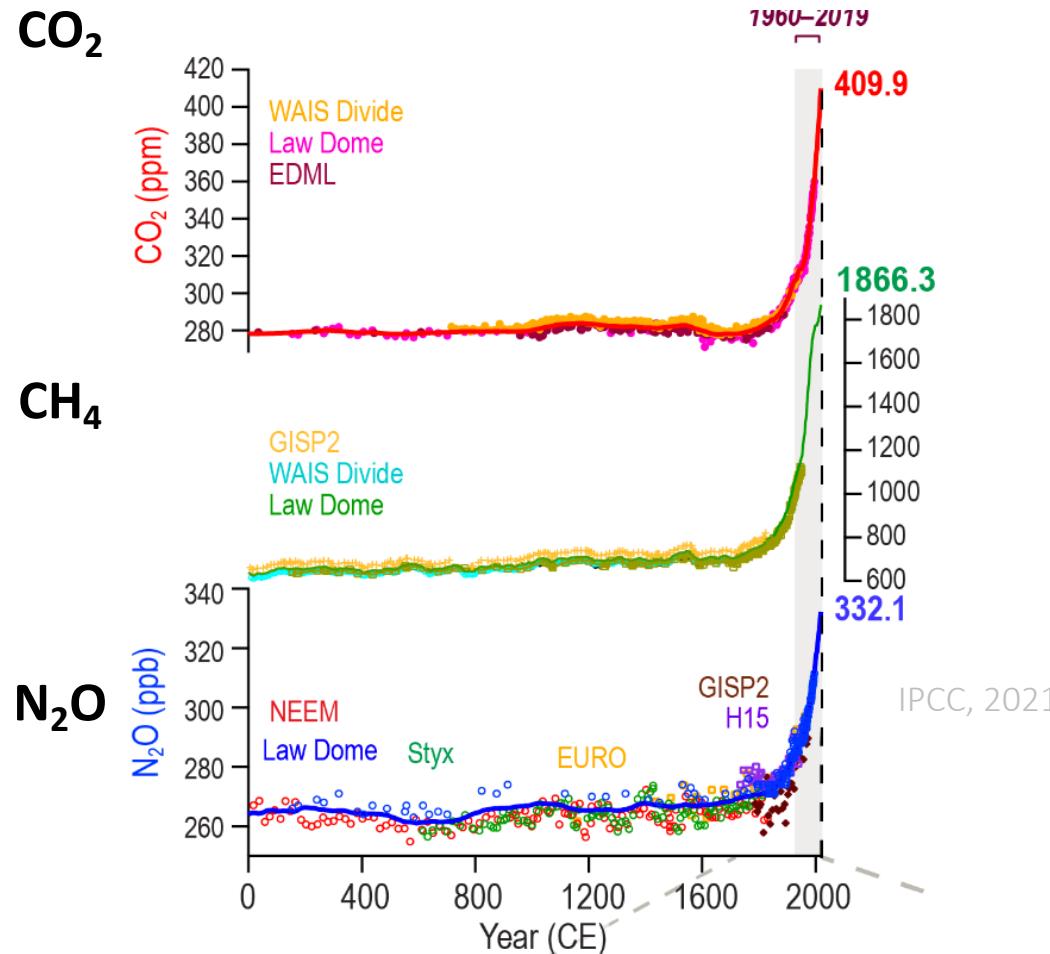


Без парникового эффекта средняя температура на поверхности Земли была бы $-18^{\circ} C$! (а с эффектом: $+15^{\circ} C$)

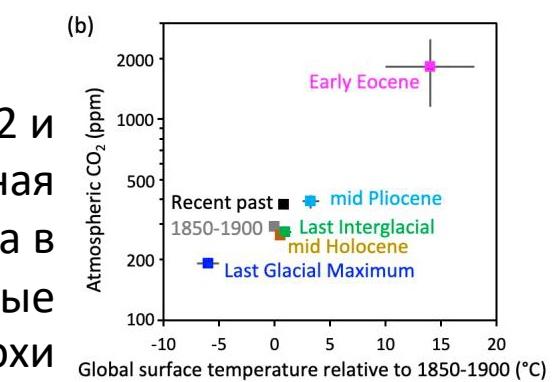
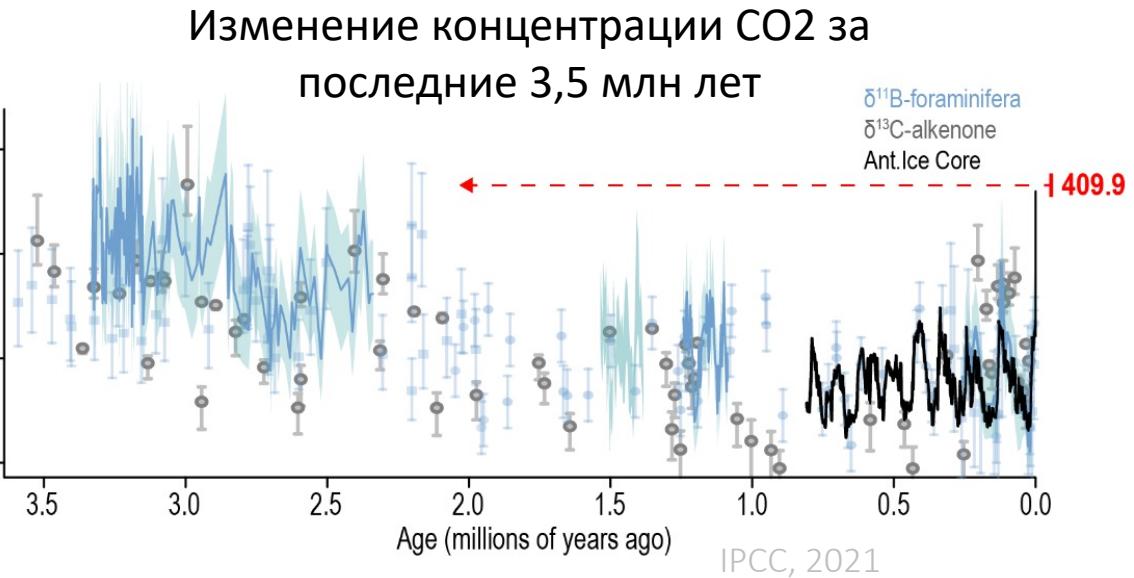


Концентрации парниковых газов

*Latest CO₂ reading: 426.89 ppm

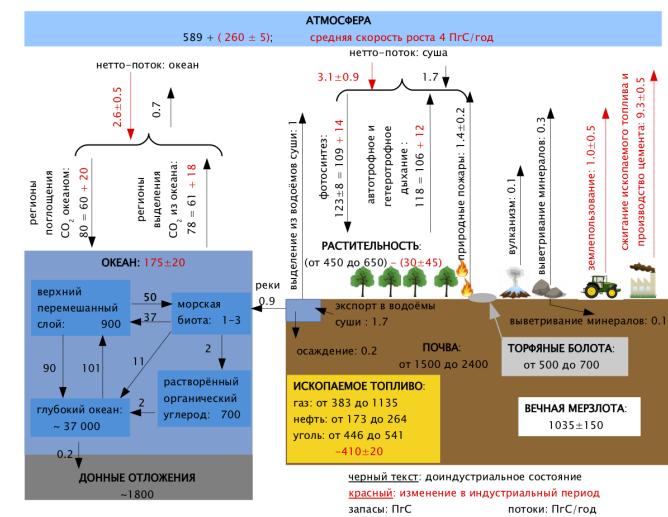
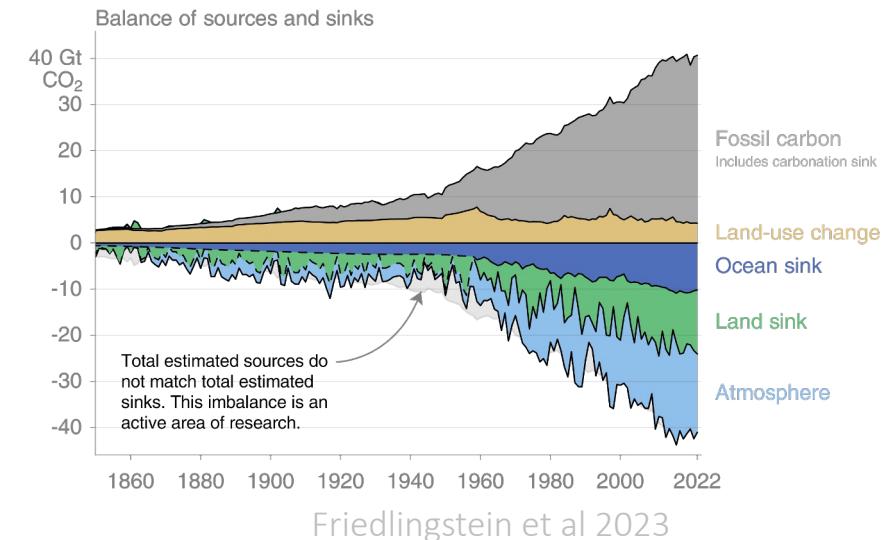
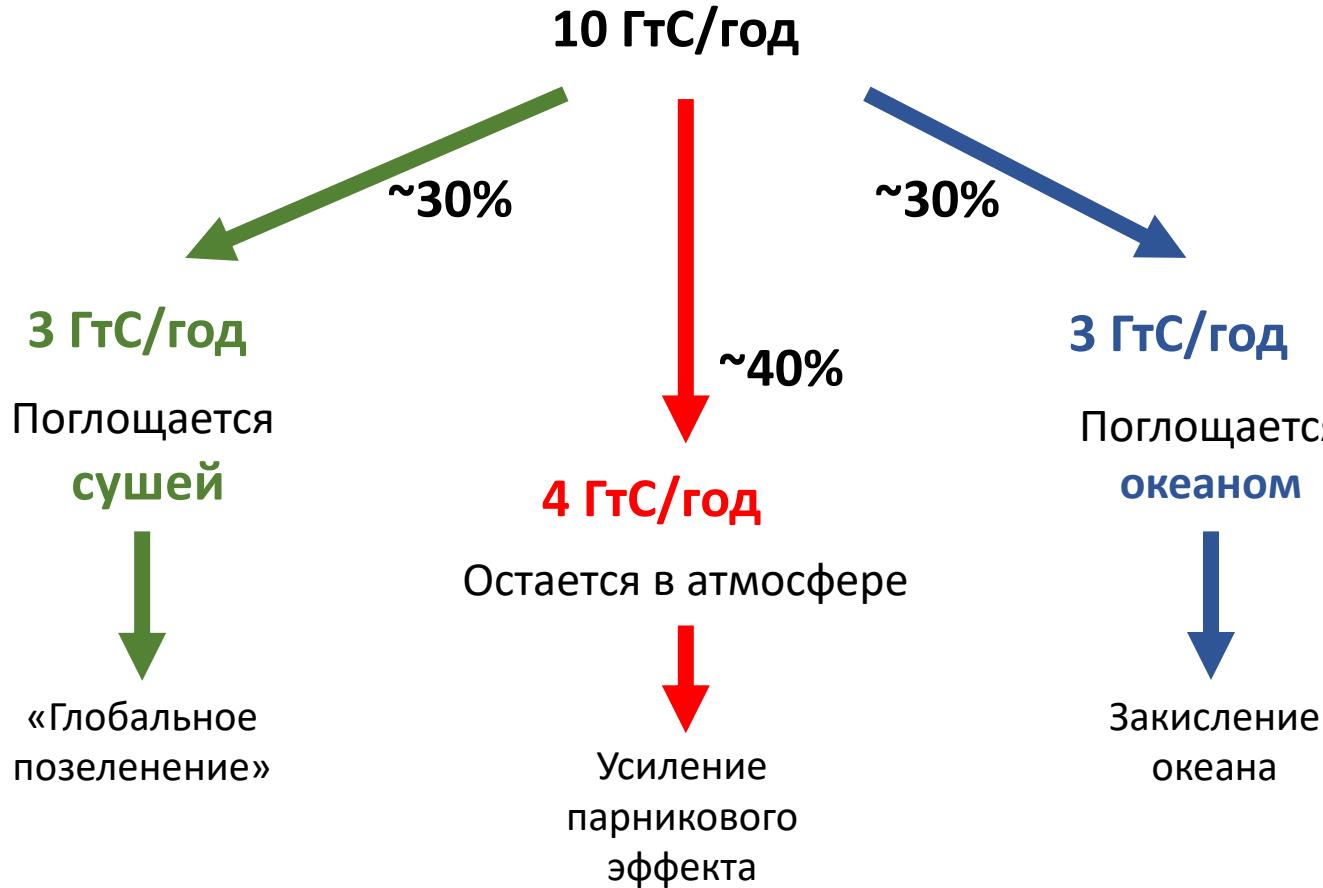


Изменение концентрации углекислого газа, метана и закиси азота в атмосфере за последние 2 тысячи лет



Концентрация CO₂ и глобальная температура в разные геологические эпохи

Куда уходит избыток CO₂?



Елисеев, 2017

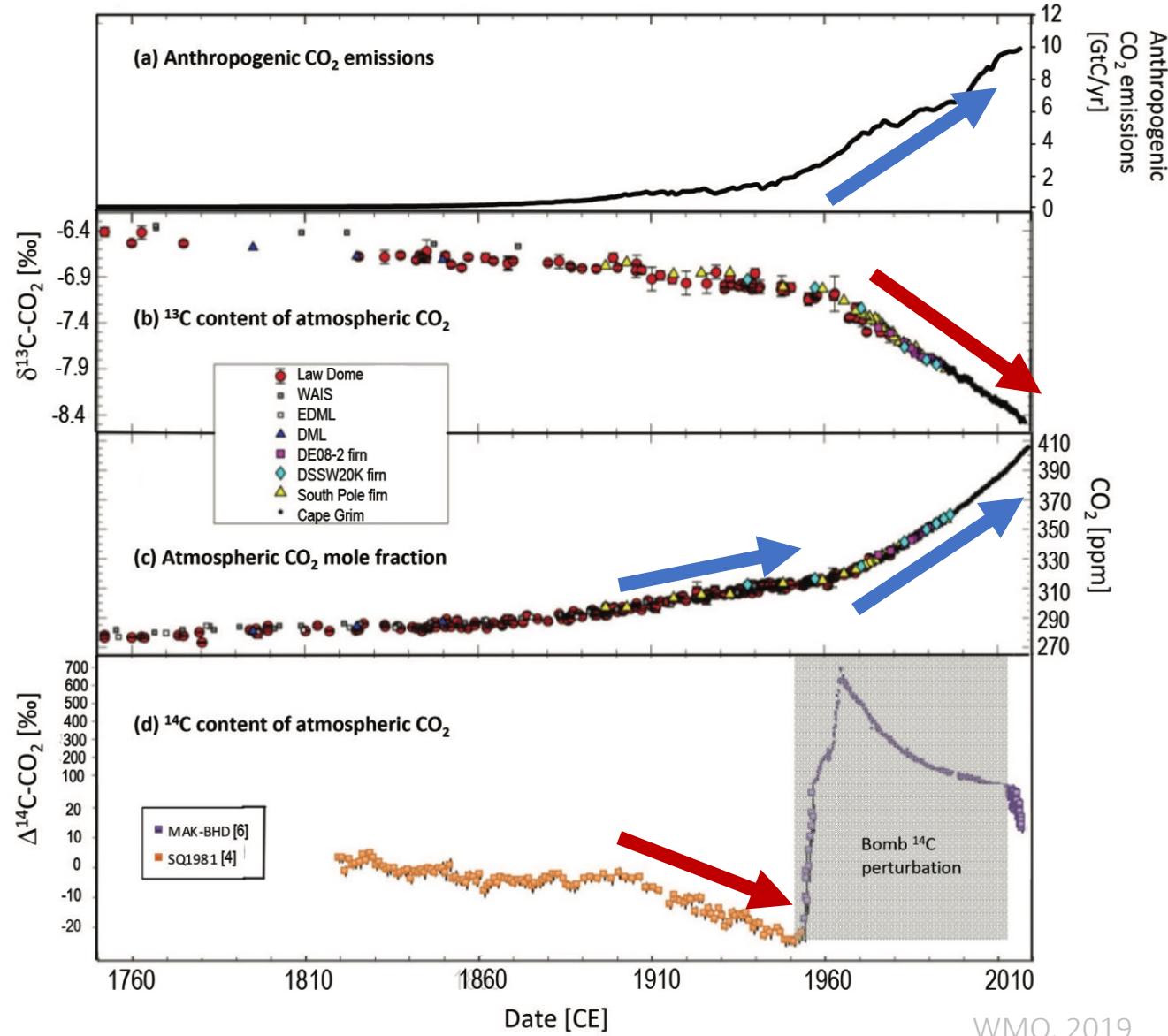
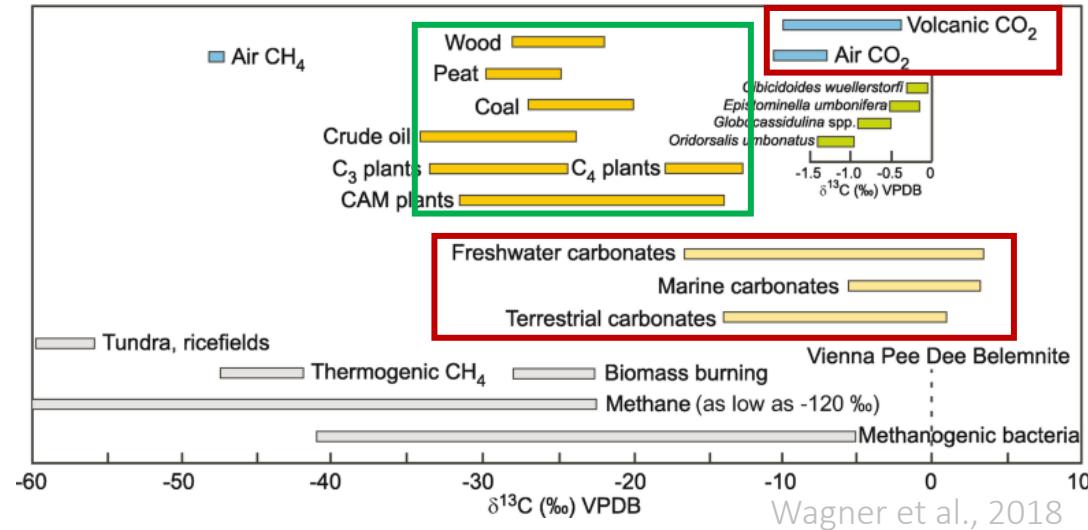
Изотопное доказательство

«Эффект Зюсса» (открыт в 1950х гг.): сокращение концентрации ^{14}C (время полураспада ок.5700 лет) в результате сжигания ископаемого топлива (не содержит ^{14}C).



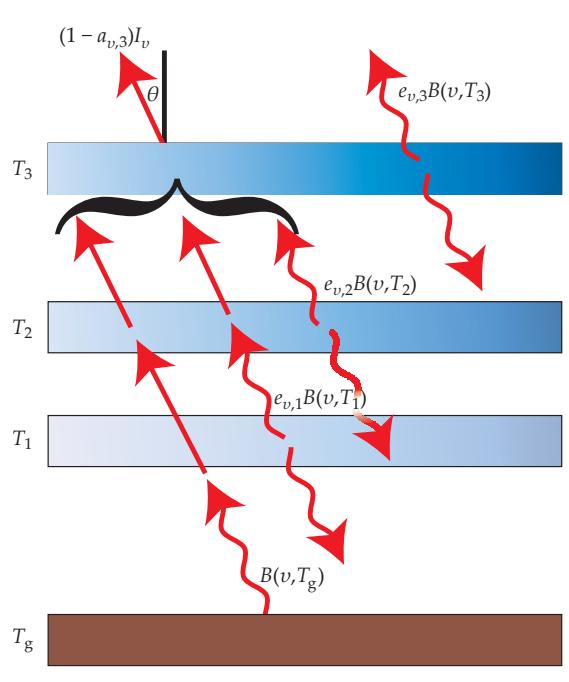
После ядерных испытаний в атмосферу попало большое количество ^{14}C .

Сейчас ученые смотрят на соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$.

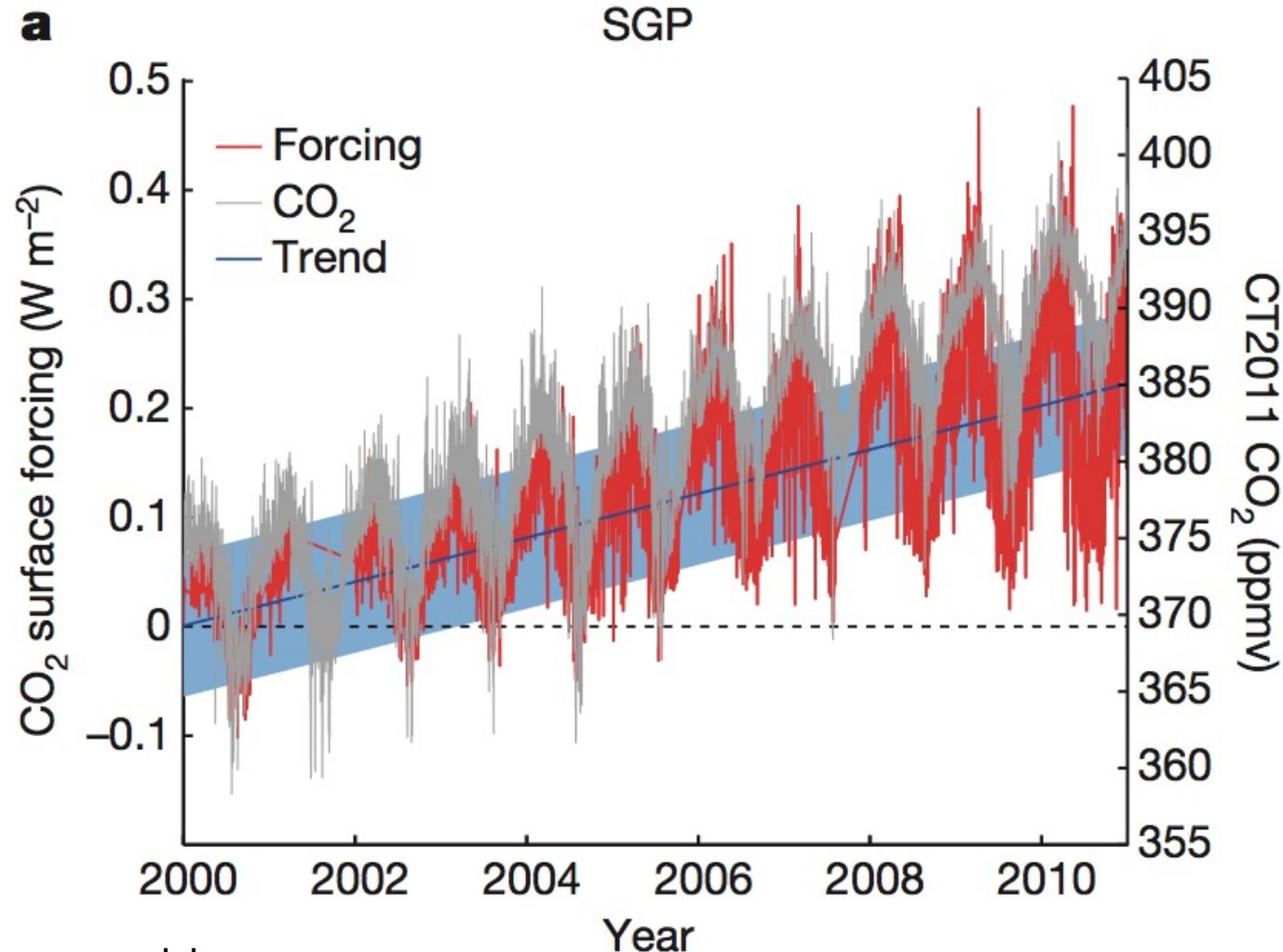


Прямые наблюдения усиления ПЭ

Наблюданное радиационное воздействие на поверхности Земли (красный цвет — интегральное значение для волновых чисел 520–1800 cm^{-1}), обусловленное ростом концентрации CO_2 (серый цвет)

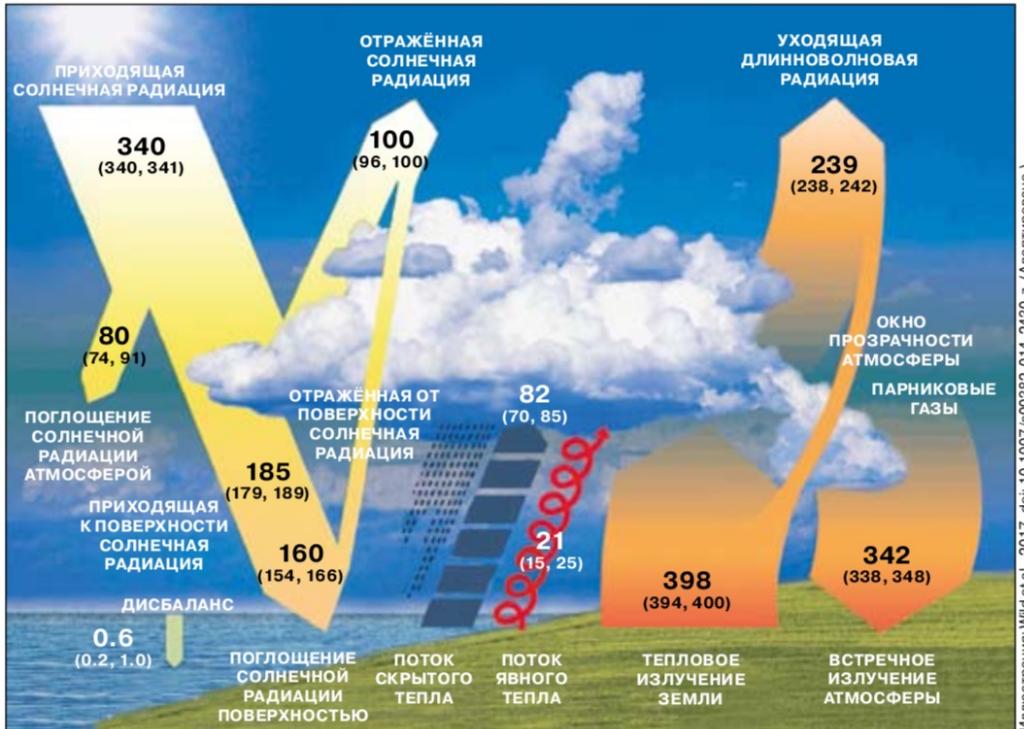


Усиление парникового эффекта — за счет увеличения концентрации CO_2 , по сути, «добавления» еще одного слоя.



Feldman, 2015

Энергетический разбаланс

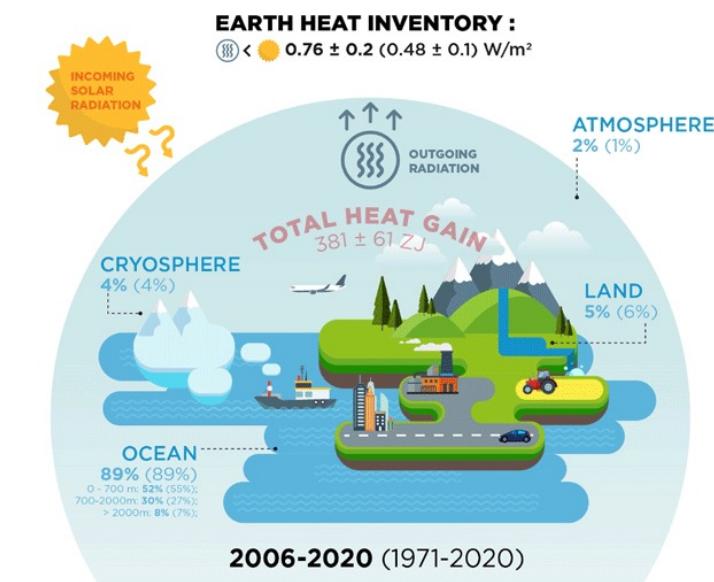
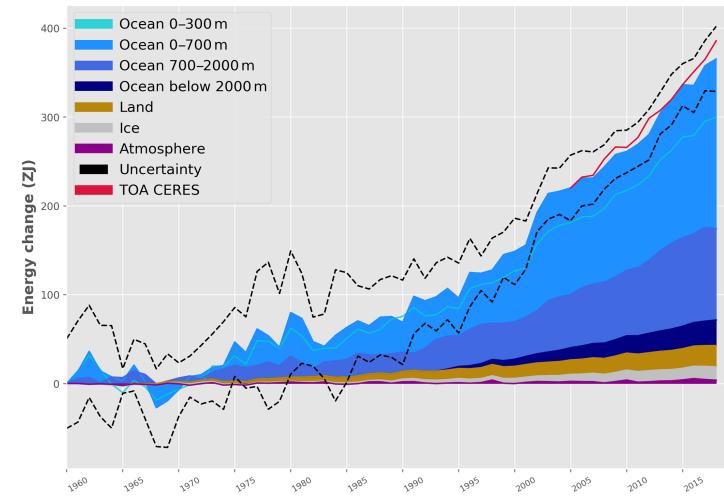


Тепловой баланс климатической системы

Суммарный антропогенный форсинг в 2019 по сравнению с 1750:
2.72 (1.96 – 3.48) Вт/м²

эмиссии аэрозолей: около $-1.2 \text{ Вт}/\text{м}^2$,
изменение свойств подстилающей поверхности: около $-0.1 \text{ Вт}/\text{м}^2$,
эмиссии парниковых газов: около $4 \text{ Вт}/\text{м}^2$
прямой нагрев: около $0.04 \text{ Вт}/\text{м}^2$

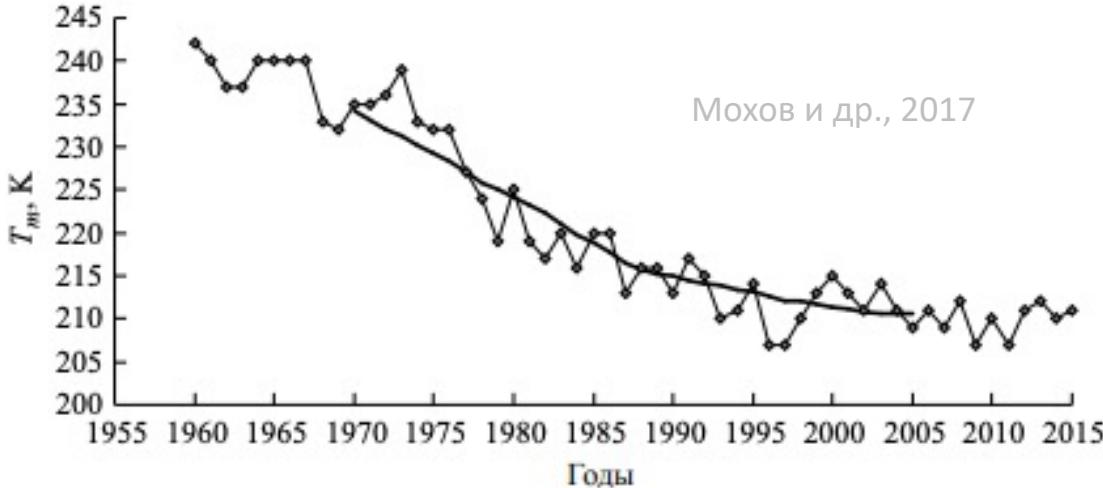
Накопление энергии в различных оболочках климатической системы (относительно уровня 1960 г.)



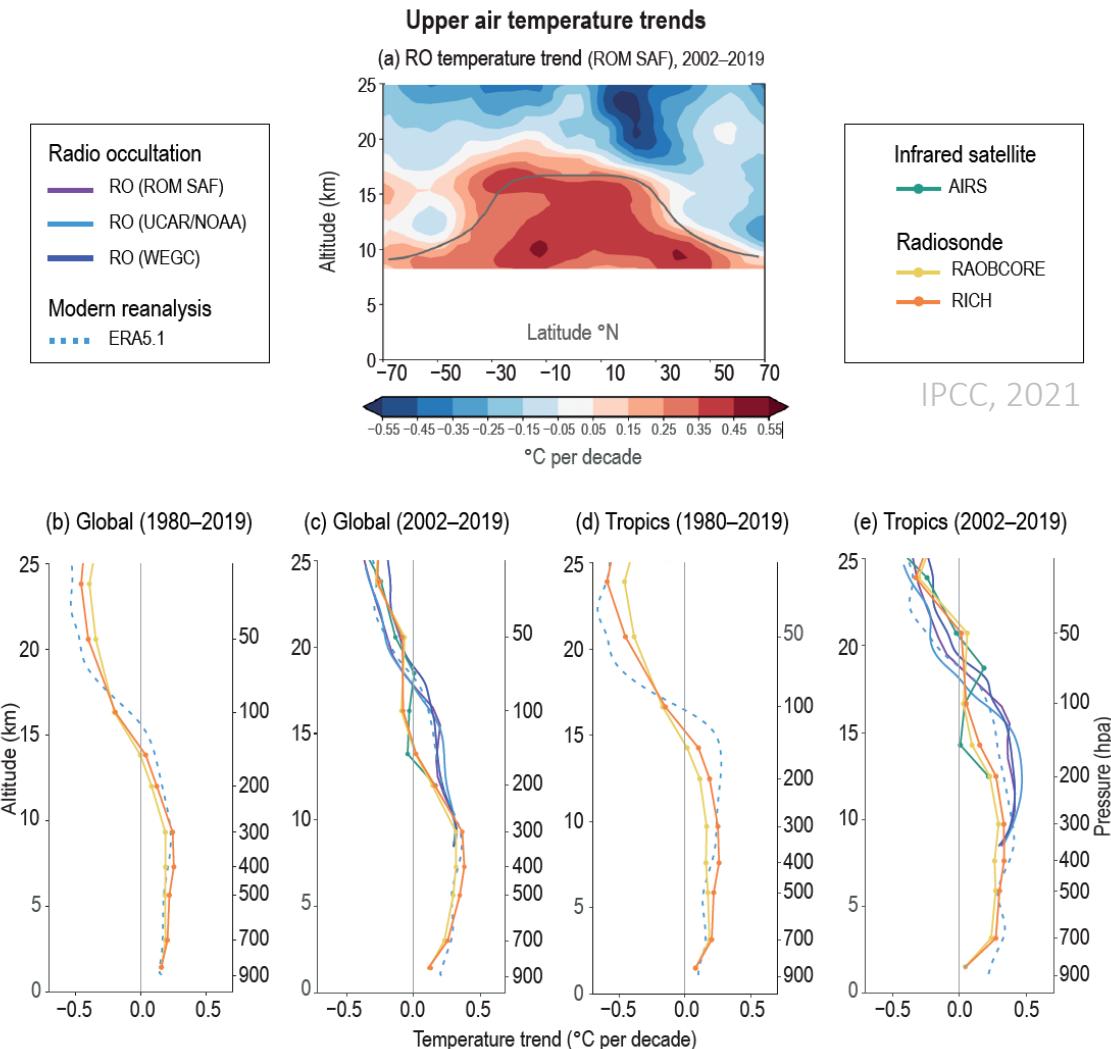
von Schuckmann et al., 2023

Климатический отклик

Наблюдаемые изменения
климатических переменных в
различных оболочках соответствуют
усиению парникового эффекта



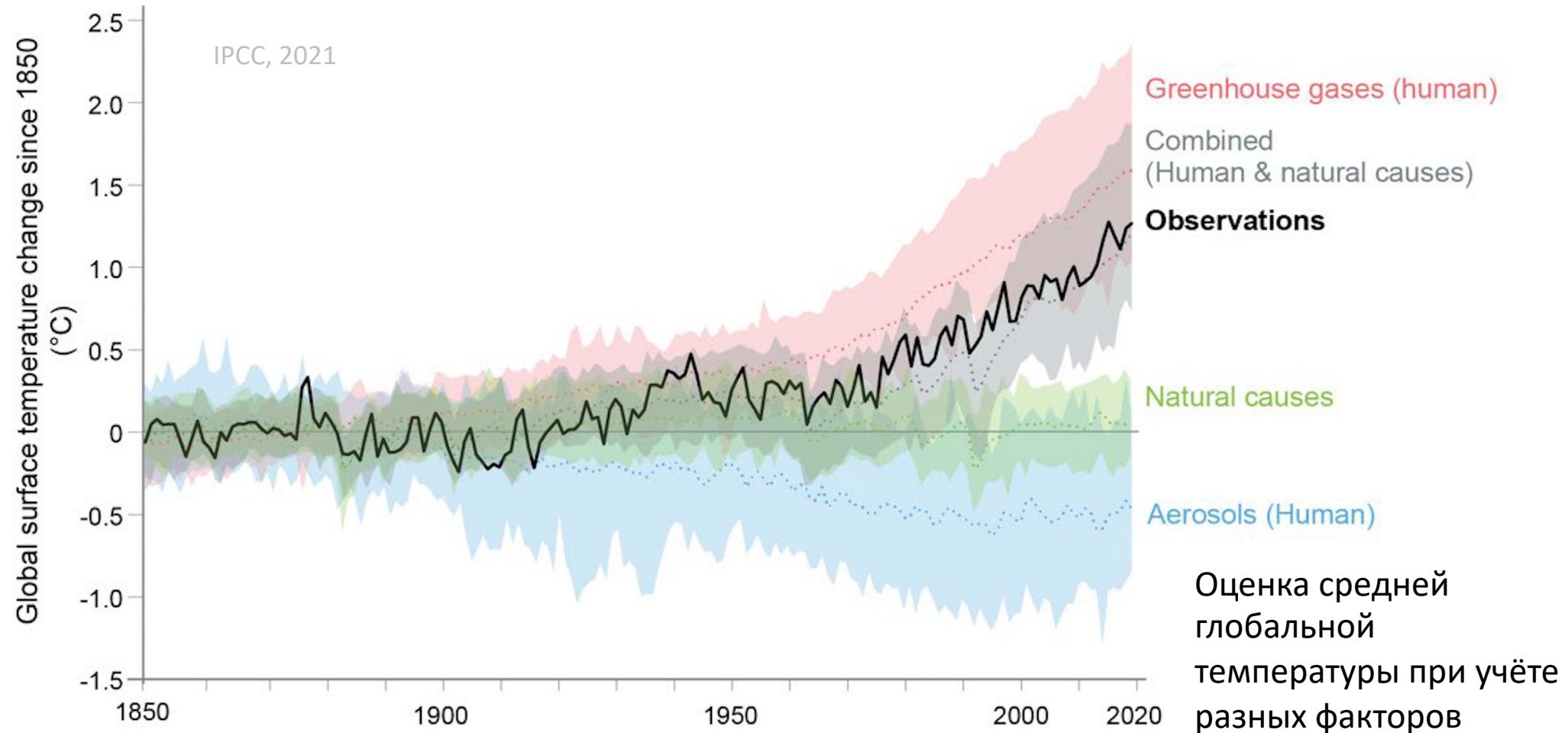
Изменения температуры на уровне
мезопаузы (80-90 км)



Изменения температуры в тропосфере и
нижней стратосфере

Воспроизведение изменений климата моделями

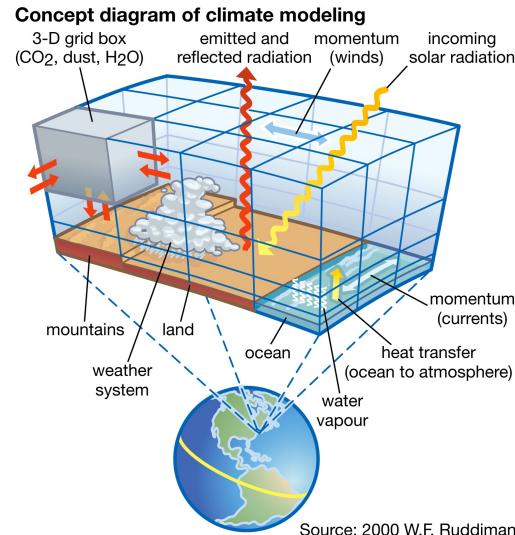
Климатические модели не могут воспроизвести современные изменения климата без учета антропогенного воздействия: эмиссий парниковых газов и аэрозолей, изменений в землепользовании.



Основа климатических моделей

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

Океан+атмосфера: МОЦАО (модель общей циркуляции атмосферы и океана) - по сути модели прогноза погоды (но как правило с более грубым разрешением). Также в отличие от модели прогноза погоды: подробное описание медленно меняющихся компонент климатической системы – ледников, глубинного океана, растительности).



Компоненты связаны обменом массы, импульса и энергии. Атмосфера – единственная компонента, обменивающаяся со всеми остальными.

```
! Calculate light absorption by the plant canopy
!
! IF (CAN_RAD_MOD == 2) THEN
    CALL ALBPFT
    &
    &
    &
ENDIF

!
! Loop over Plant Functional Types to calculate the available moisture
! and the values of canopy conductance, the carbon fluxes and the leaf
! turnover rate
!
DO N=1,NPFT
    IF (NTILES == 1) THEN
        DO L=1,LAND PTS
            TSTAR(L) = TSTAR_TILE(L,1)
            Z0(L) = Z0_TILE(L,1)
        ENDDO
    ELSE
        DO L=1,LAND PTS
            TSTAR(L) = TSTAR_TILE(L,N)
            Z0(L) = Z0_TILE(L,N)
        ENDDO
    ENDIF
END
```

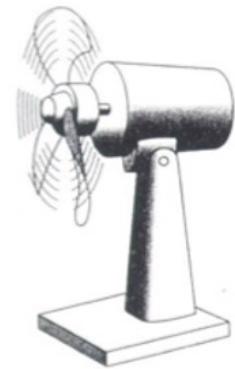
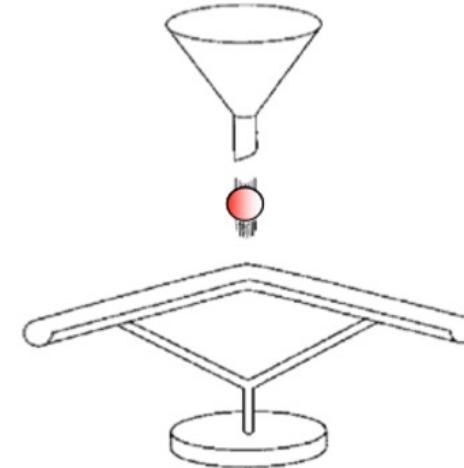


2021 – Нобелевская премия по физике С. Манабе и К.Хассельману «За физическое моделирование климата Земли, количественную оценку изменчивости и надежное прогнозирование глобального потепления»

Прогноз погоды и климата: отличие

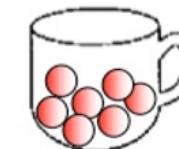
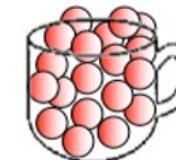
Прогноз погоды:

определение точного состояния системы по законам, которым она подчиняется, а также по начальным и граничным условиям (предсказуемость 1-го рода).

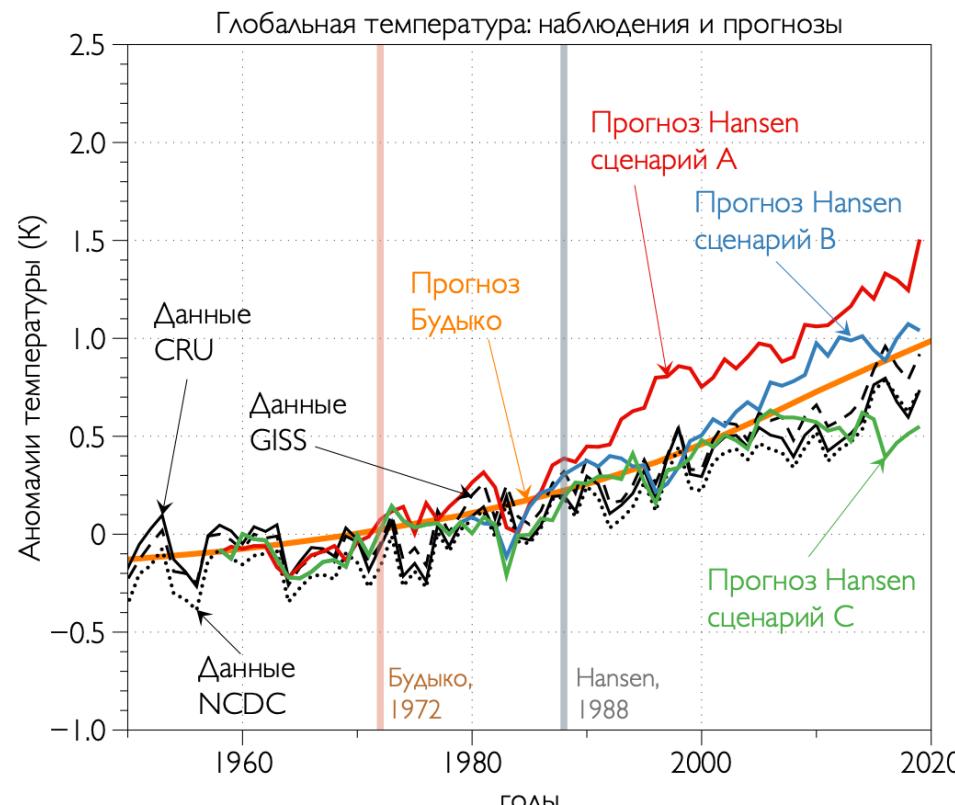


Прогноз климата:

определение статистических характеристик системы по законам, которым она подчиняется, и граничным условиям (предсказуемость 2-го рода).



Оправдывается ли климатический прогноз?



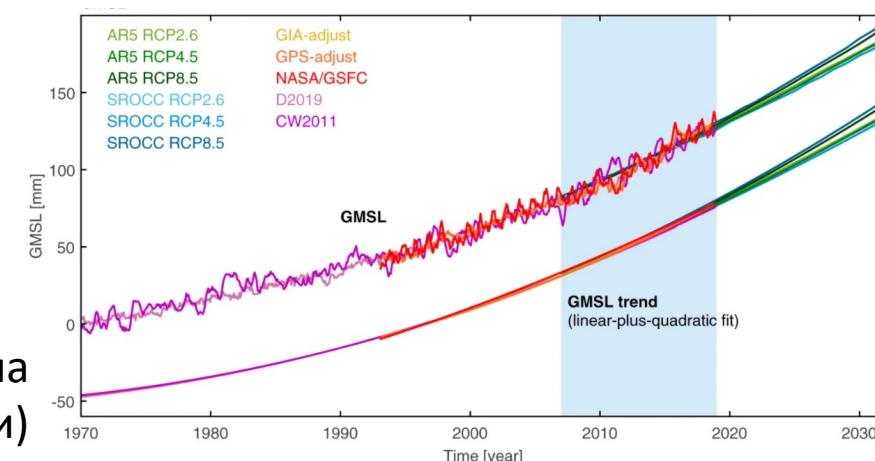
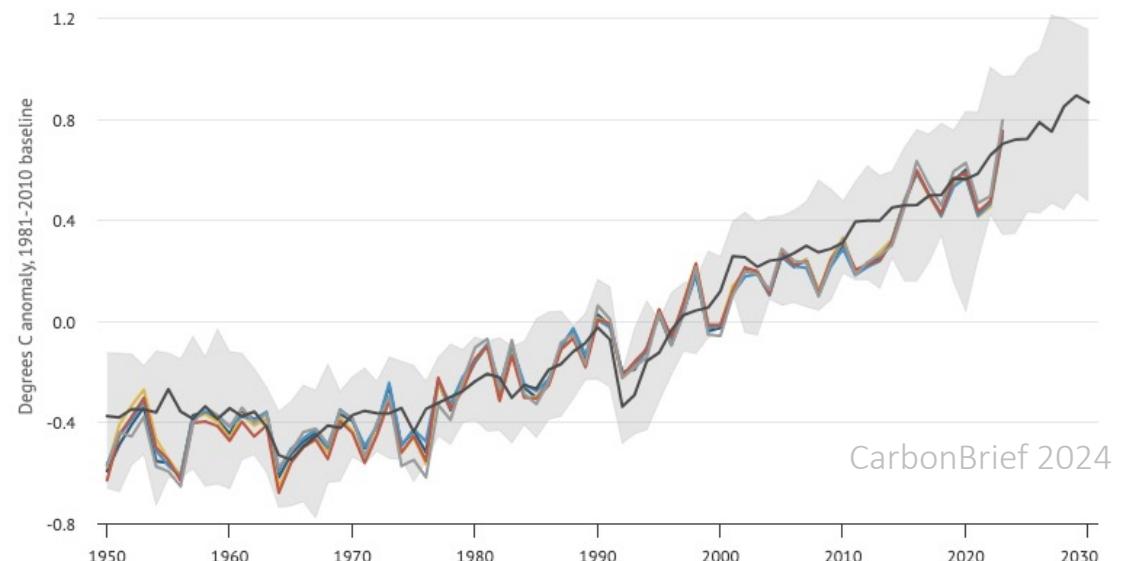
Прогноз Хансена (три сценария экономического развития), Будыко и наблюдения

Изменение уровня океана (наблюдения и модели)

Глобальная температура воздуха по наблюдениям

и моделям CMIP6

NASA Hadley/UEA NOAA Berkeley Copernicus Model Average

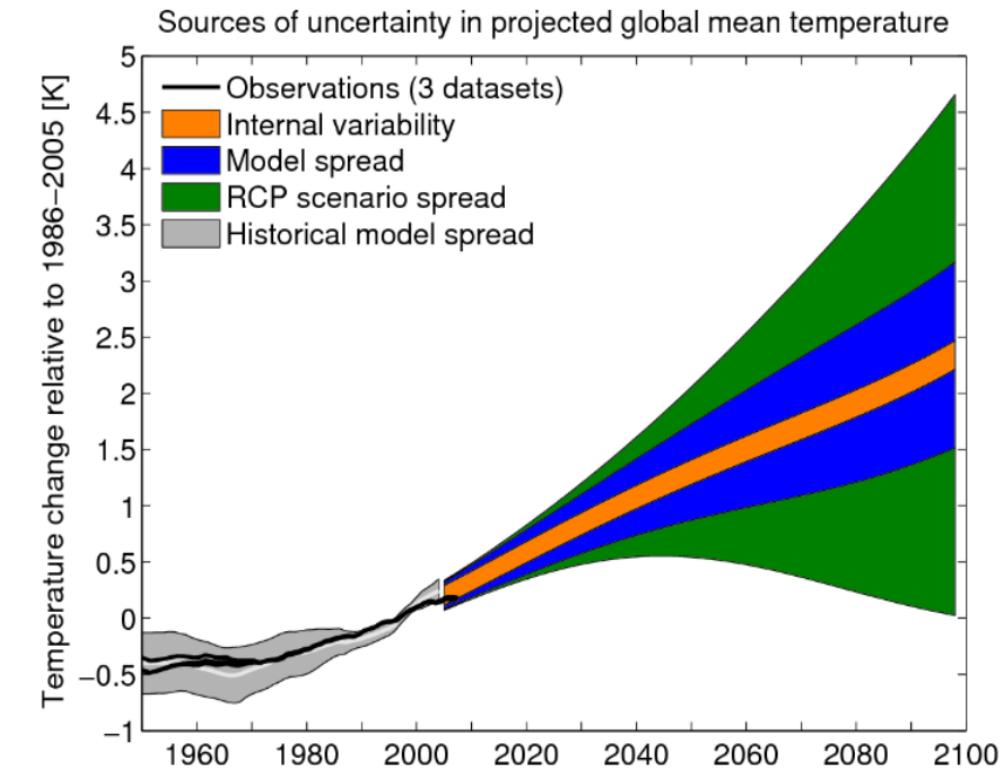
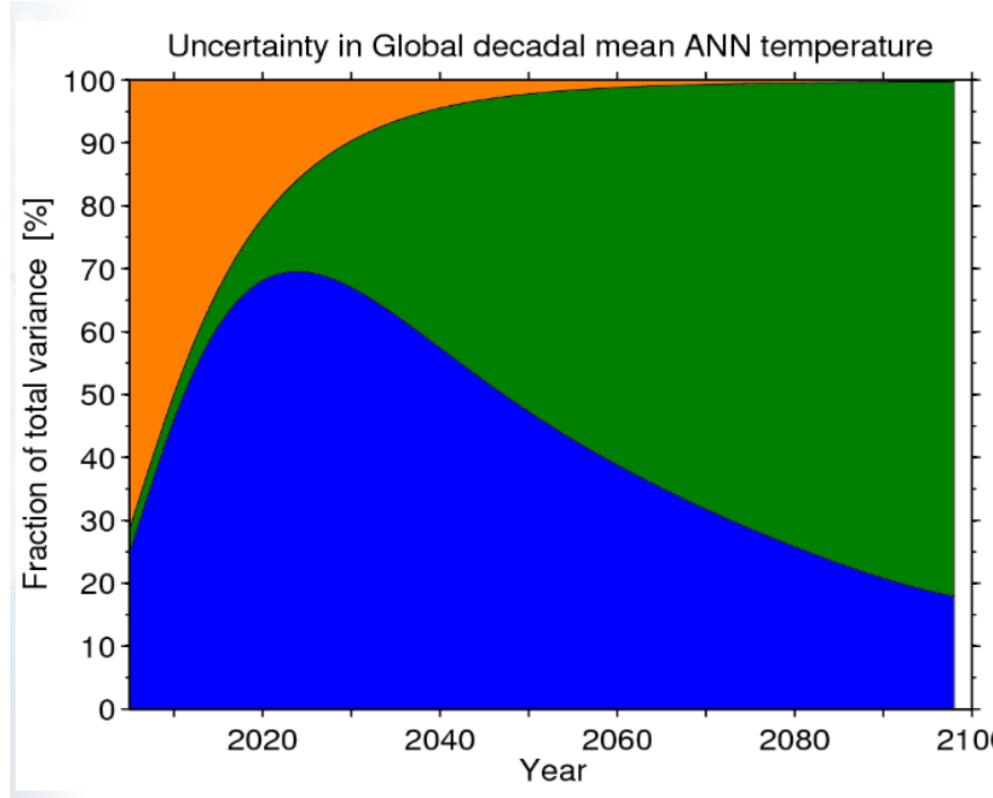


Wang et al., 2021

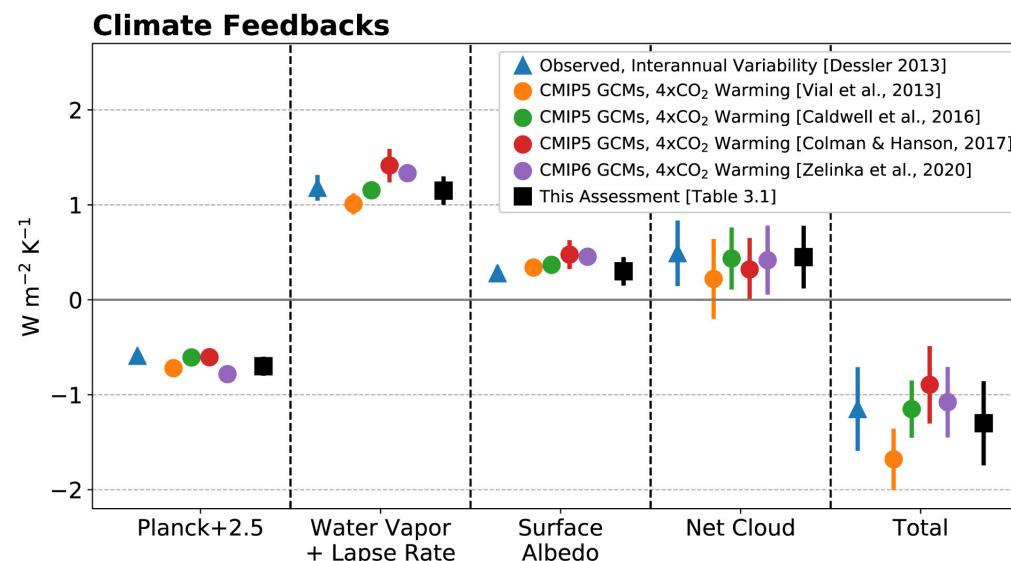
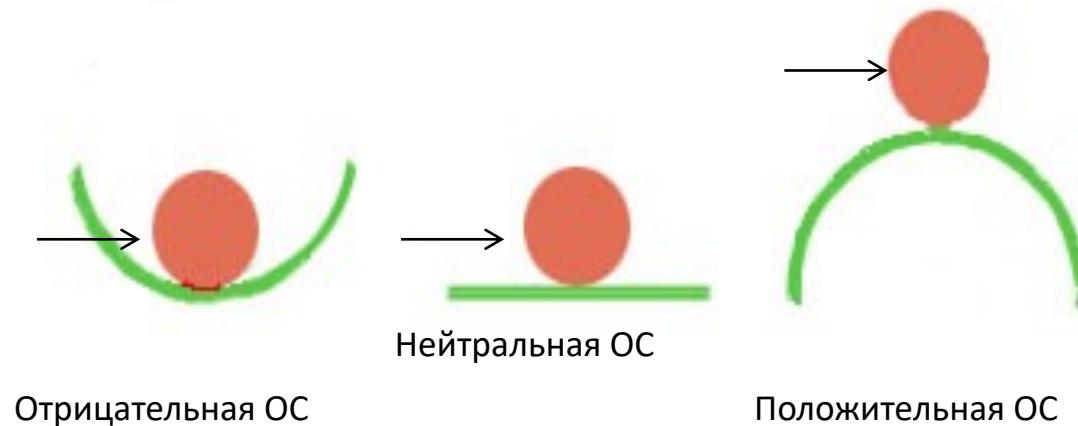
Источники неопределенности прогноза

Источники неопределенности прогноза климата:

1. внутренняя (собственная) изменчивость климата;
2. Различия в моделях (разное разрешение, разная чувствительность);
3. Различия в сценариях

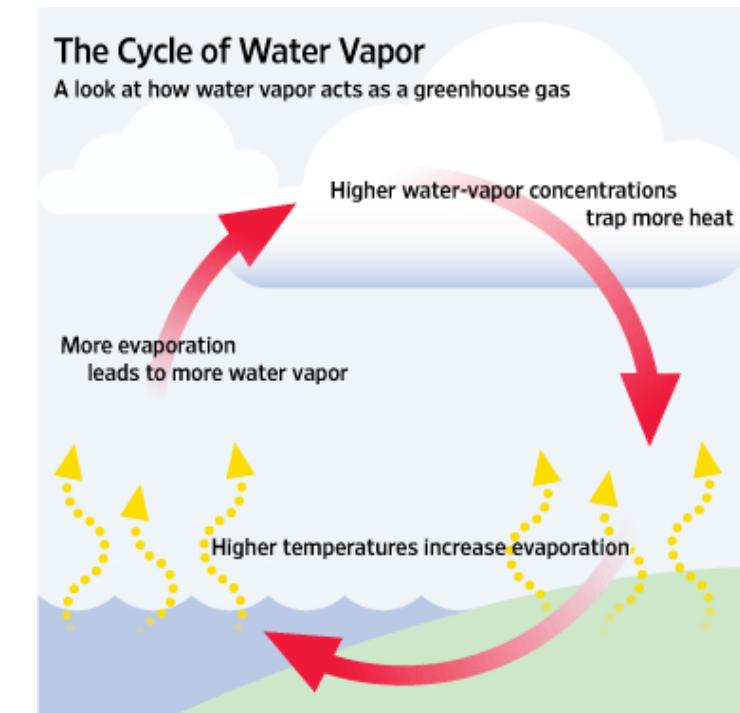


Обратные связи в климатической системе

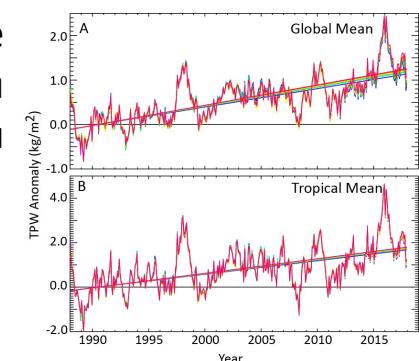


Основные обратные связи в
климатической системе

Sherwood et al., 2020



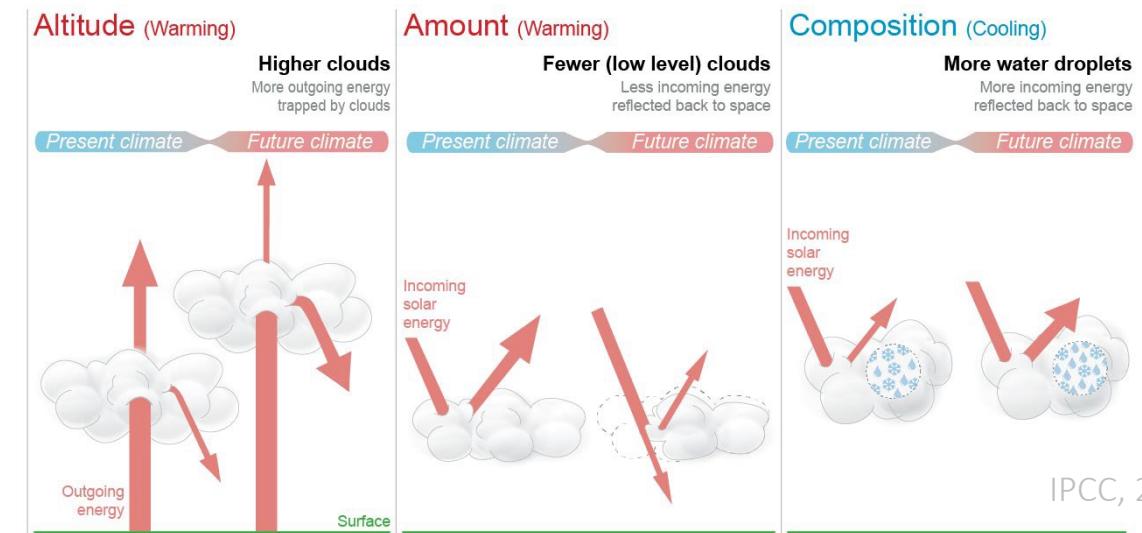
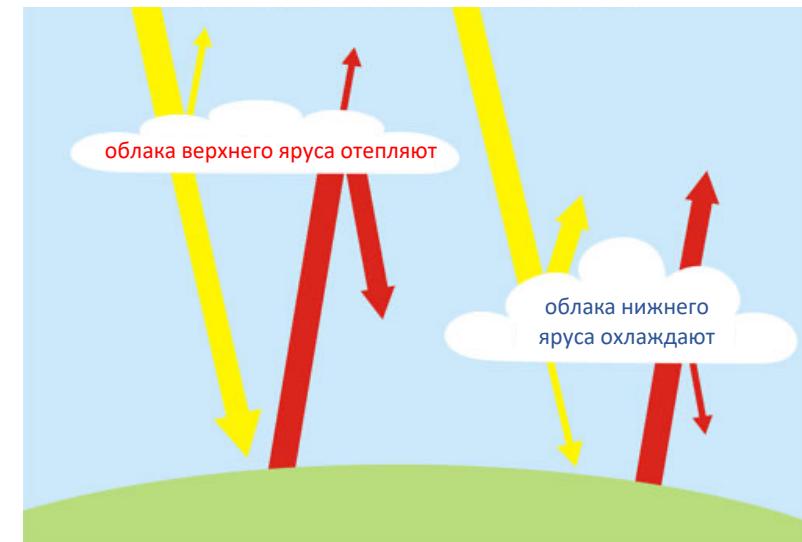
Изменение
влагосодержания
атмосферы



Роль облаков в климатической системе



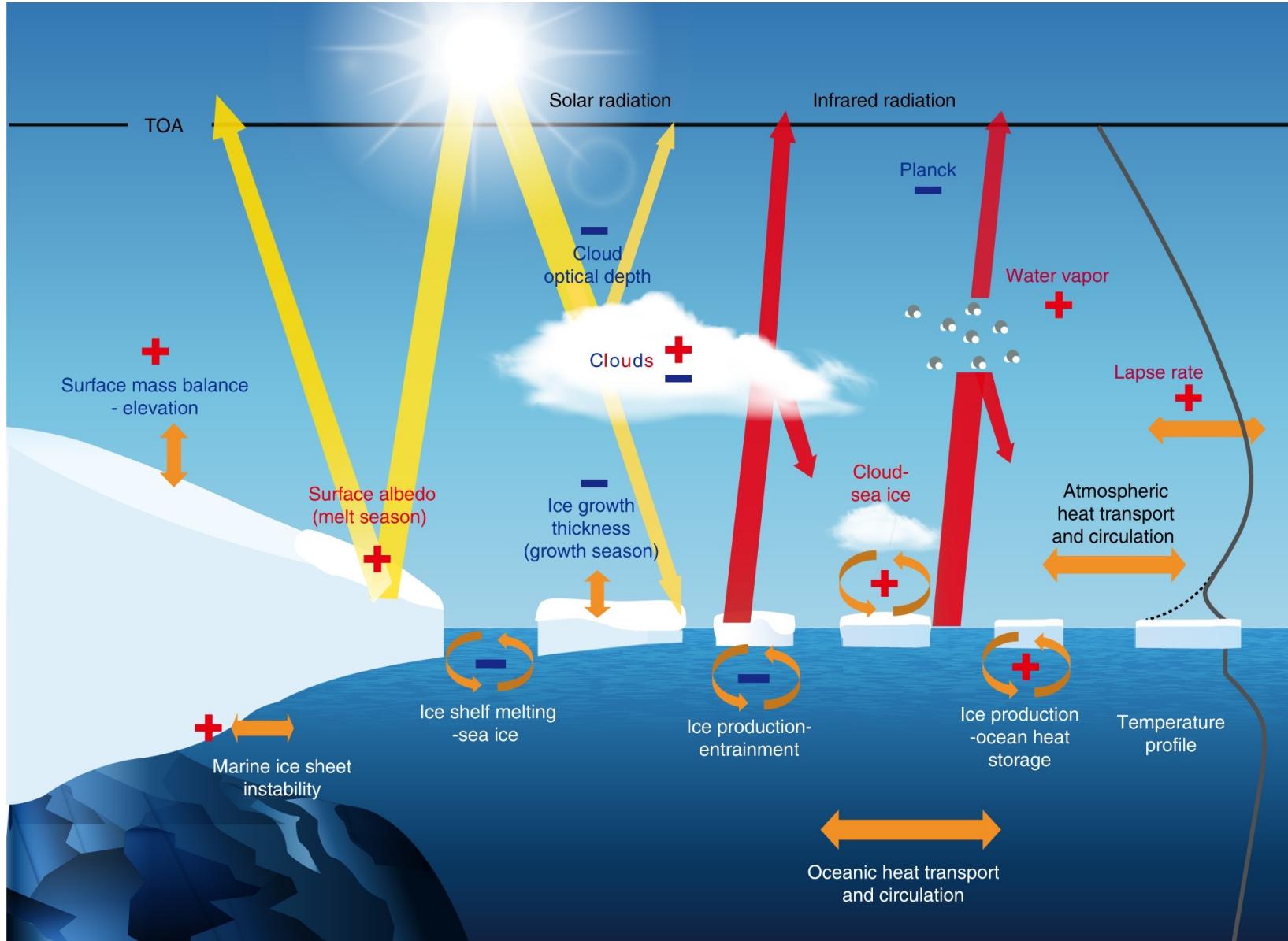
Роль облаков
разного яруса в
климатической
системе



Изменение облаков в новом климате

IPCC, 2021

Обратные связи в полярных регионах

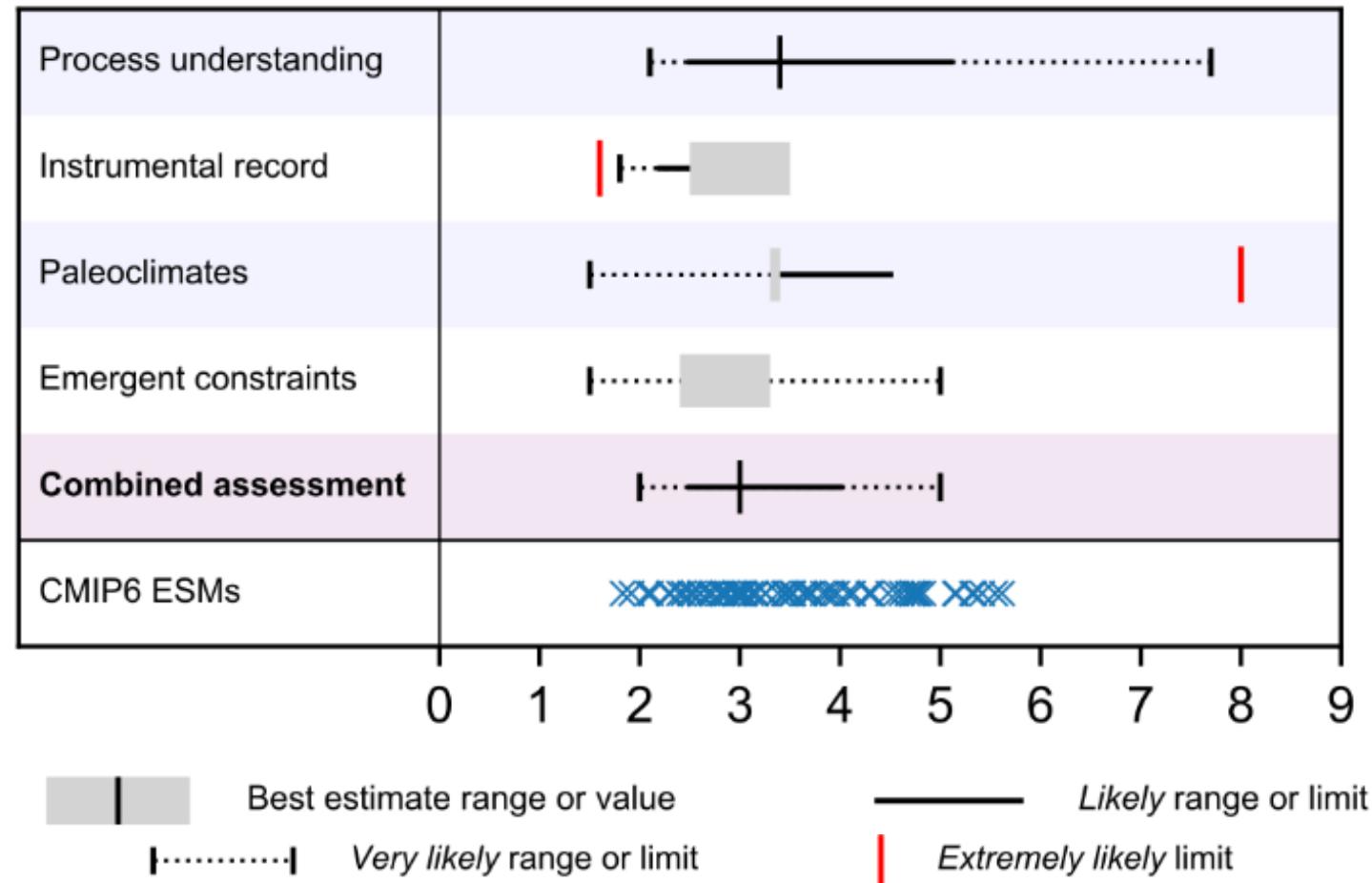


Goose et al., 2018

Чувствительность климата

Чувствительность климата — отклик глобальной температуры на изменение CO₂ (чаще всего — равновесный отклик на удвоение CO₂)

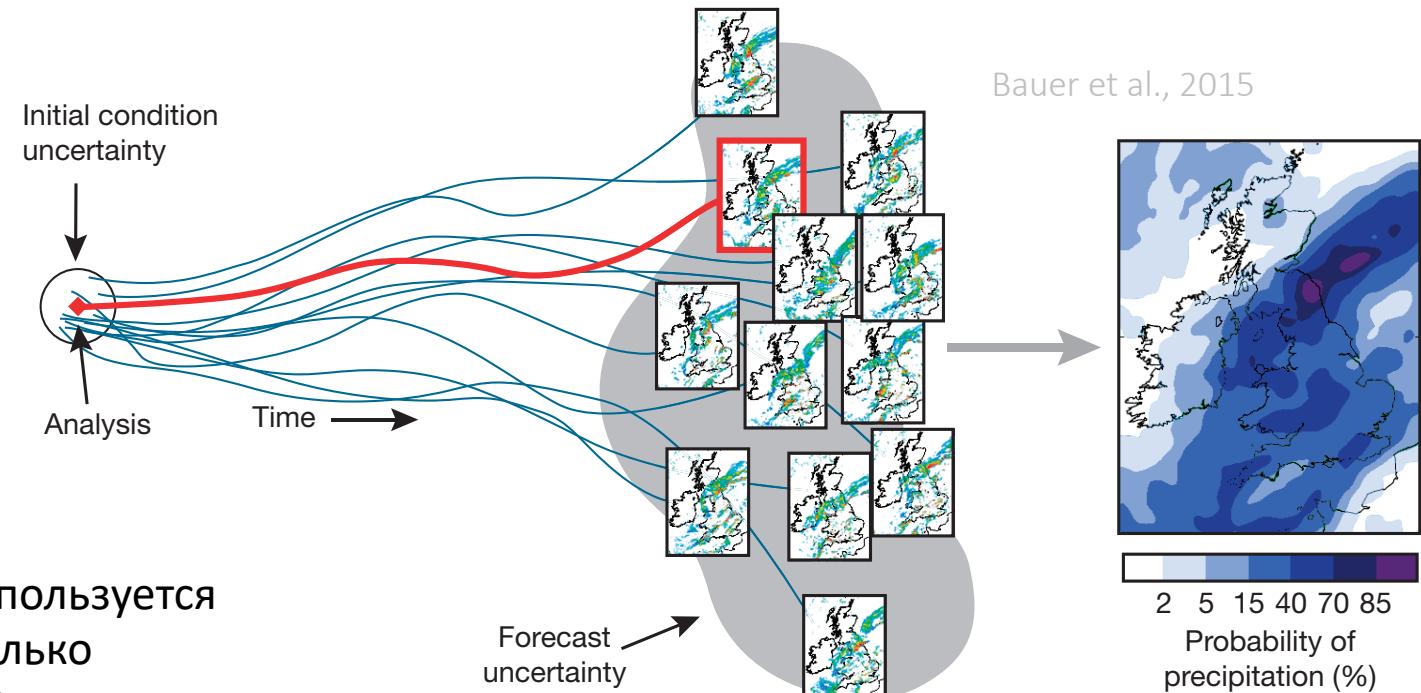
Равновесная чувствительность климата (°C)



IPCC, 2021

Ансамблевый подход

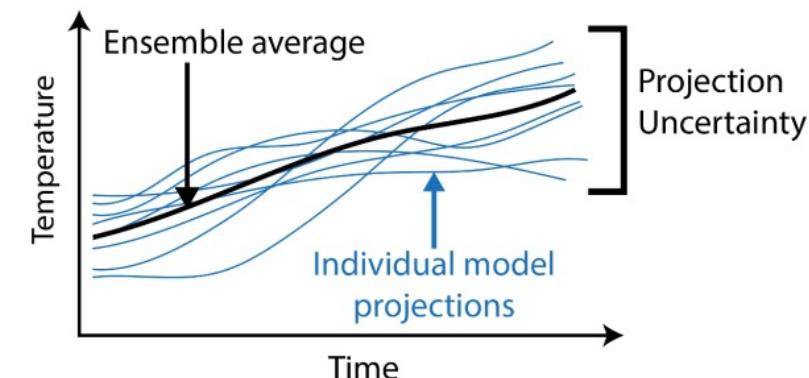
В прогнозе погоды: для уменьшения влияния погрешности в начальных данных и оценки вероятности каких-либо событий (например, дождя) используется ансамблевый подход (несколько запусков одной модели со слегка разными начальными данными).



В прогнозе климата: ансамблевый подход используется для оценки внутренней изменчивости (несколько запусков с одной моделью, например, 50-100 реализаций, так называемые Grand Ensembles), для устранения влияния модельных особенностей (несколько моделей, например, модели CMIP6).

Осреднение:

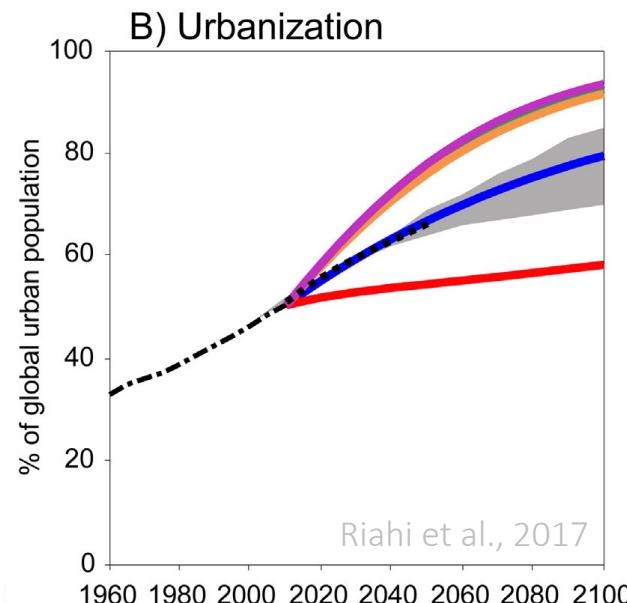
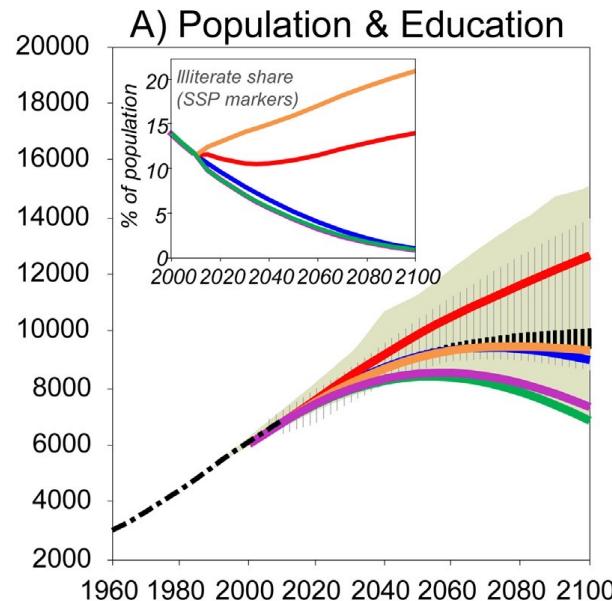
- все модели с равными весами;
- только «лучшие» модели;
- байесовы веса.



Сценарный подход: что нас ждет в будущем?

Проекция климата на 21 век: сценарии эмиссий парниковых газов в атмосфере и аэрозолей, землепользование

+ изменчивость солнечной активности, астрономических факторов, но нет информации о вулканах.

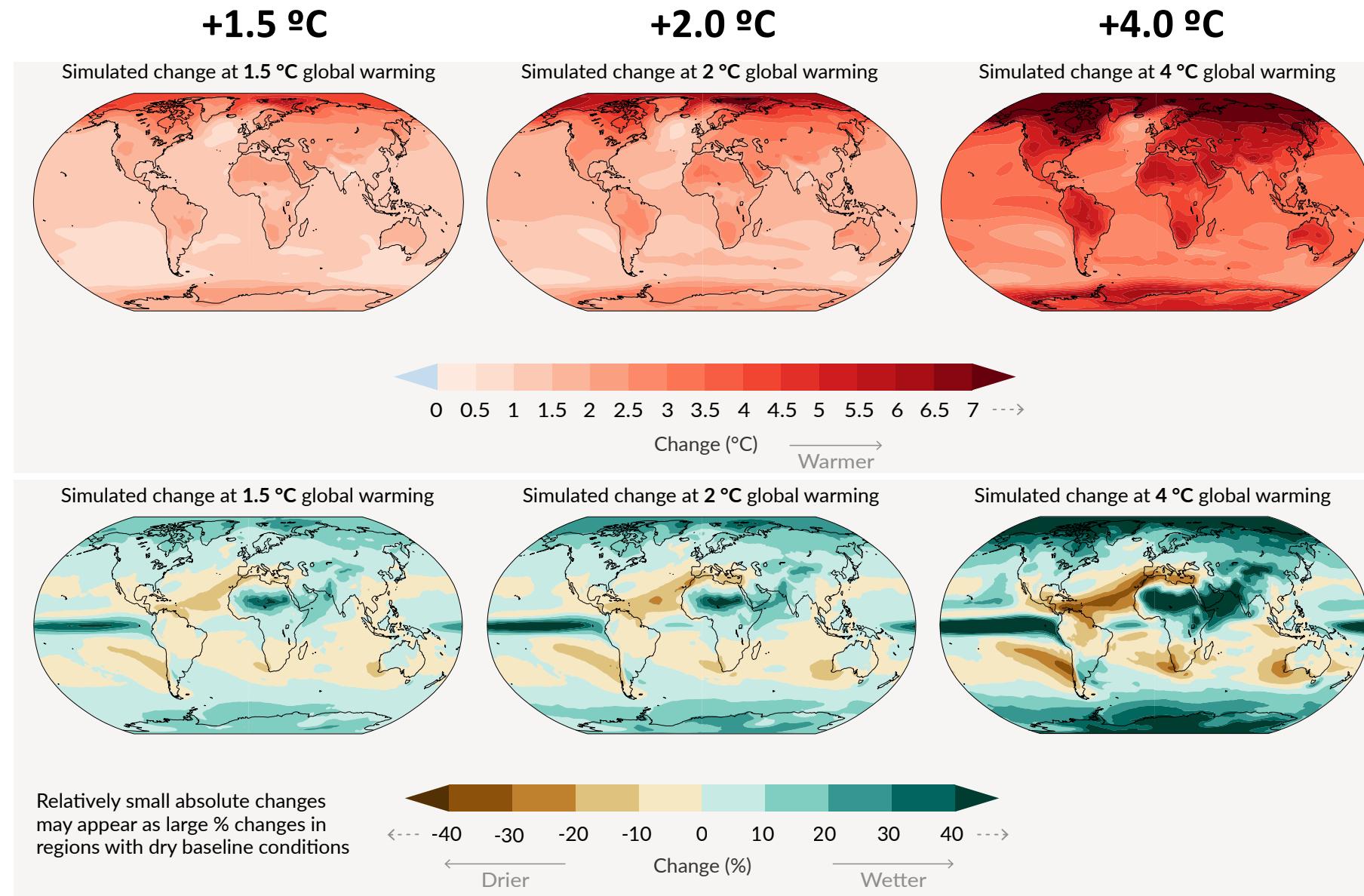


Население и урбанизация при разных сценариях SSP

Сценарии социально-экономического развития в XXI веке

Сценарии	Наименование сценариев	Краткое описание сценариев
SSP1	Устойчивое развитие (Sustainability)	Мир постепенно движется по пути устойчивого развития, с упором на инклюзивное развитие с учетом экологических границ. Потребление ориентировано на меньшую ресурсо- и энергоемкость
SSP2	Дорога полумер и компромиссов (Middle of the road)	Мир следует по пути, для которого социальные, экономические и технологические тенденции слабо отличаются от исторических закономерностей. Ведется медленная работа над достижением целей устойчивого развития. Экологические системы деградируют, хотя есть некоторые улучшения, а ресурсо- и энергоемкость снижаются
SSP3	Региональное соперничество (Regional rivalry)	Страны сосредотачиваются на достижении целей энергетической и продовольственной безопасности в своих регионах. Снижаются инвестиции в образование и в технологическое развитие. Экономическое развитие идет медленно, потребление является материалоемким. Низкий международный приоритет решения экологических проблем
SSP4	Неравенство (Inequality)	Усиление неравенства и расслоения как между странами, так и внутри них. Энергетический сектор диверсифицируется за счет инвестиций в углеродоемкие виды топлива, такие как уголь и нетрадиционная нефть, и в низкоуглеродные источники энергии
SSP5	Развитие на основе ископаемого топлива (Fossil-fueled development)	Усиление интеграции глобальных рынков, экономическое и социальное развитие в сочетании с эксплуатацией ресурсов ископаемого топлива и принятием во всем мире ресурсоемкого и энергоемкого образа жизни

Что нас ждет при разном уровне потепления?



Последствия изменений климата в России



Положительные последствия:

- снижение избыточной холодовой смертности населения в зимний период;
- сокращение расходов энергии в отопительный период;
- улучшение ледовой обстановки и, соответственно, условий транспортировки грузов в арктических морях, облегчение доступа к континентальному шельфу Российской Федерации в Северном Ледовитом океане;
- улучшение структуры и расширение зоны растениеводства, а также повышение эффективности животноводства;
- повышение продуктивности бореальных лесов;
- рост речного стока (в том числе зимой) и улучшение ресурсов для ГЭС.

Отрицательные последствия:

- повышение избыточной тепловой смертности населения в летний период;
- рост повторяемости, интенсивности и продолжительности засух на юге ЕТР и в Поволжье;
- интенсификация опасных конвективных явлений (шквалов и смерчей), экстремальных осадков и паводковых наводнений (средняя полоса, юг Сибири) и учащение выходов тайфунов на сушу (юг Дальнего Востока), приводящих к гибели людей и опасному для с/х переувлажнению почвы;
- рост молниевой активности и повышение пожароопасности в лесных массивах;
- рост в ряде регионов частоты переходов температуры через 0 градусов и интенсификация гололедных явлений;
- деградация вечной мерзлоты в северных регионах с ущербом для строений и коммуникаций, береговая эрозия, сокращение функционирования дорог-зимников;
- нарушение экологического равновесия, в том числе вытеснение одних биологических видов другими, распространение инфекционных и паразитарных заболеваний;
- увеличение расхода электроэнергии на кондиционирование воздуха в теплый сезон (на фоне сниженной выработки э/э).



Благодарю за внимание!

Александр Чернокульский

a.chernokulsky@ifaran.ru