

Глобальные климатические изменения: факты и мифы

Александр Чернокульский

старший научный сотрудник

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

Доцент Высшей школы экономики

Директор по вопросам анализа и управления климатическими рисками ООО «КарбонЛаб»

a.chernokulsky@ifaran.ru

Perm Summer School 2023: Climate Solutions

13 августа 2023

Основные особенности климатического дискурса и **проблемы** в рамках каждой особенности. Все это приводит к множеству мифов.

Глобальность и отложенность рисков

Восприятие глобальных рисков населением

Риск отложен во времени, но действовать надо сейчас

Обратная связь: человек-климат

Недооценка воздействия человека на климат

Ощущение тщетности наших действий

Междисциплинарность климатической науки

Отсутствие универсальной экспертизы

Определенность и неопределенность знаний

Множество заинтересованных сторон

Разная реакция у различных стран и социальных групп

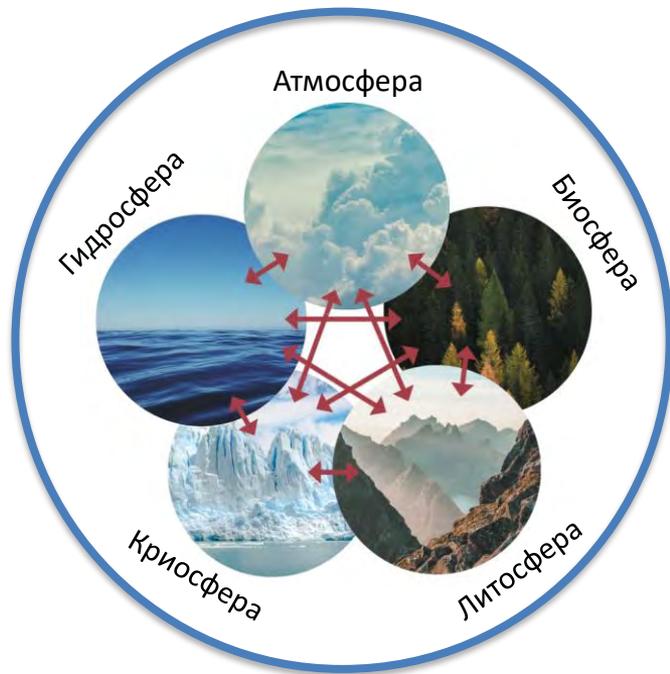
Лобби отрицателей проблемы изменений климата



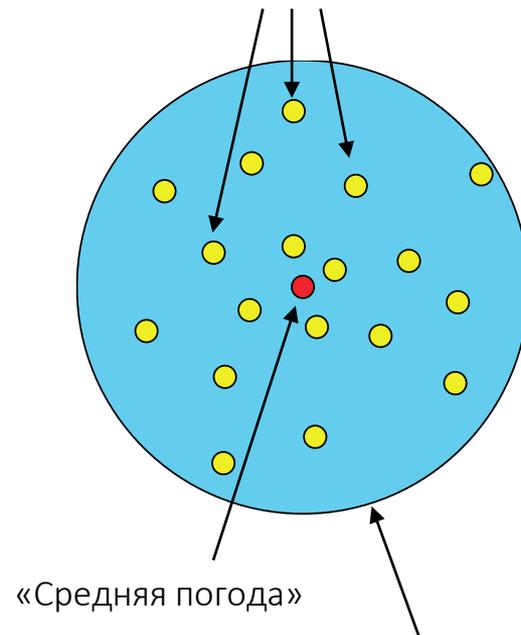
Я никакого потепления не ощущаю

Что такое климат?

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



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



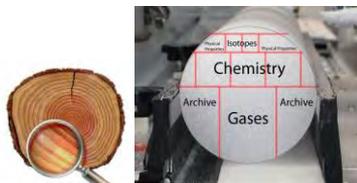
«Средняя погода»

Совокупность (ансамбль) всех возможных состояний

Систематические наблюдения за всеми оболочками климатической системы (станции, буи, ДЗЗ, сети мониторинга и т.д.)



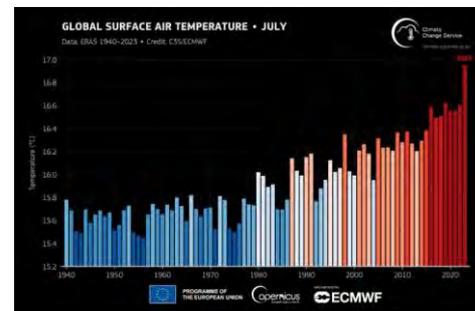
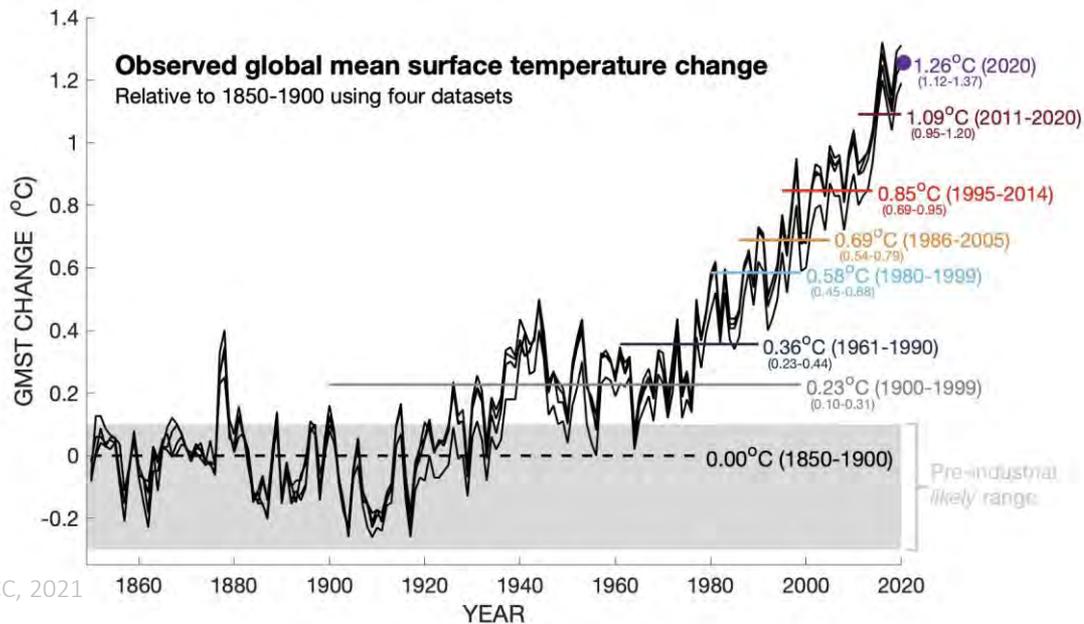
+ прокси-данные (палеоданные, эксперименты и т.д.)



+ теоретические методы, численные модели

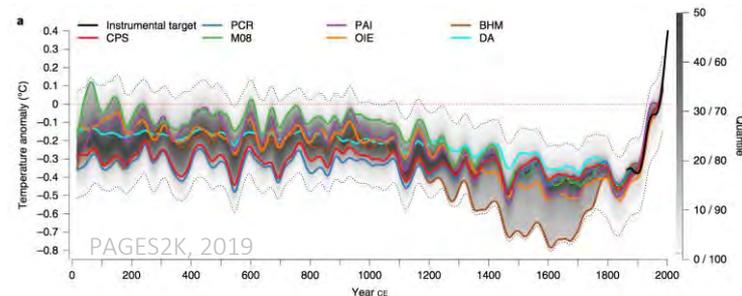


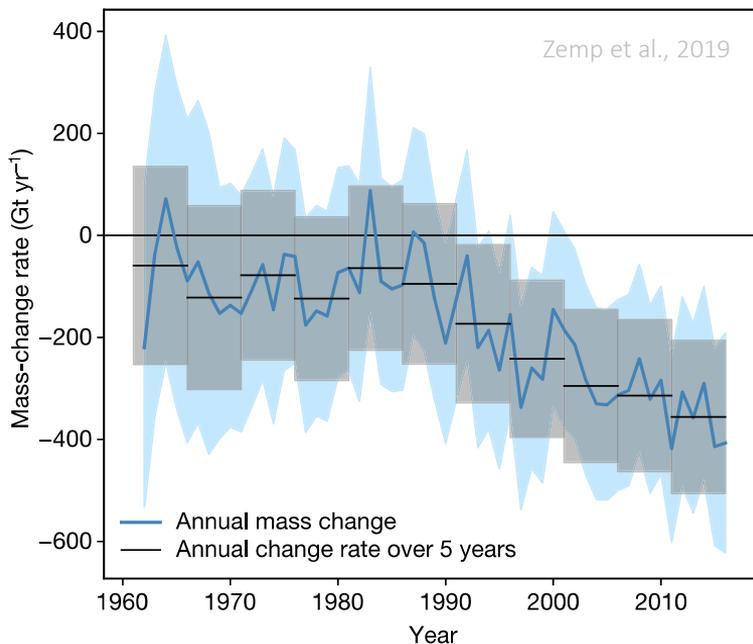
Индикаторы изменений климата



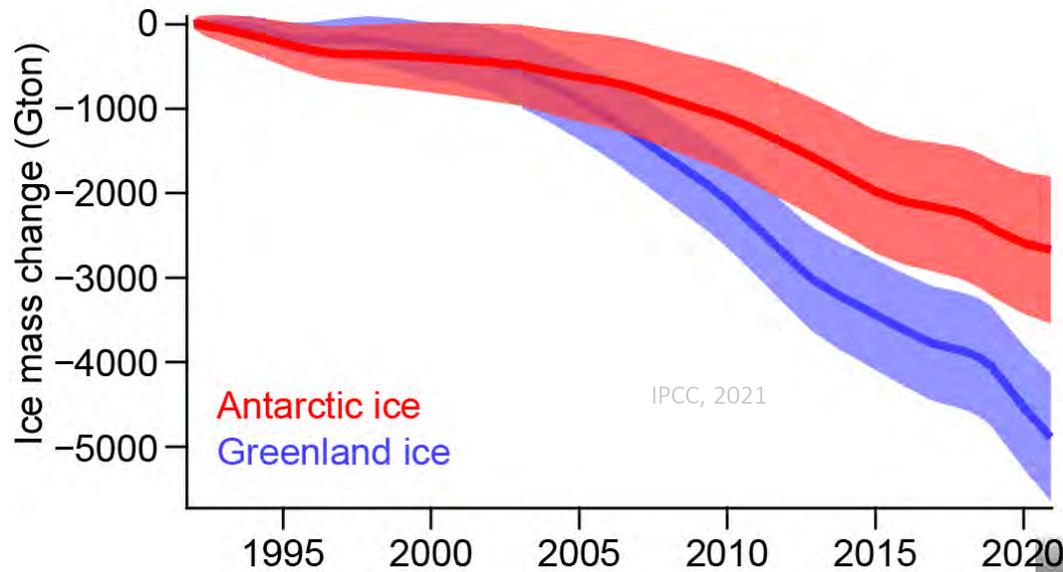
Аномалии глобальной приповерхностной температуры воздуха (относительно средней за 1901–2000 гг.)

Изменение глобальной температуры за последние 2000 лет

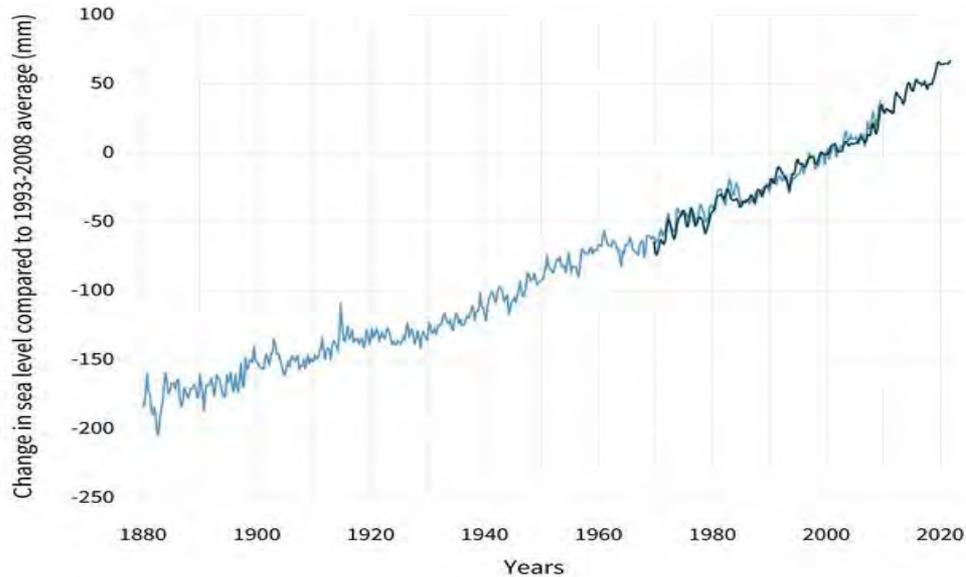




Масса горных ледников



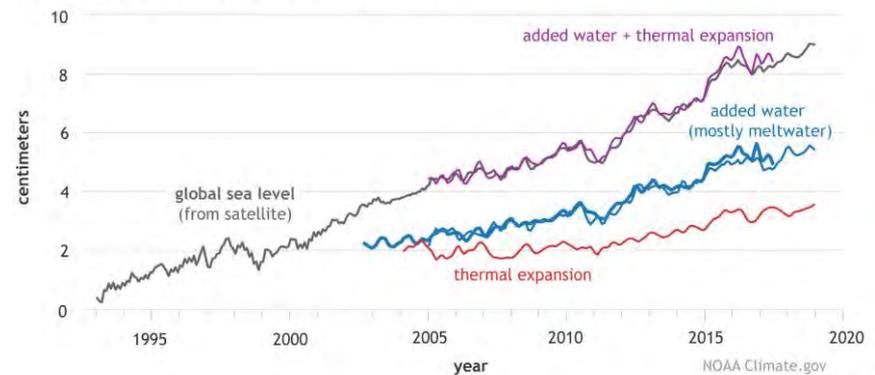
Масса Антарктического и Гренландского ледяных щитов



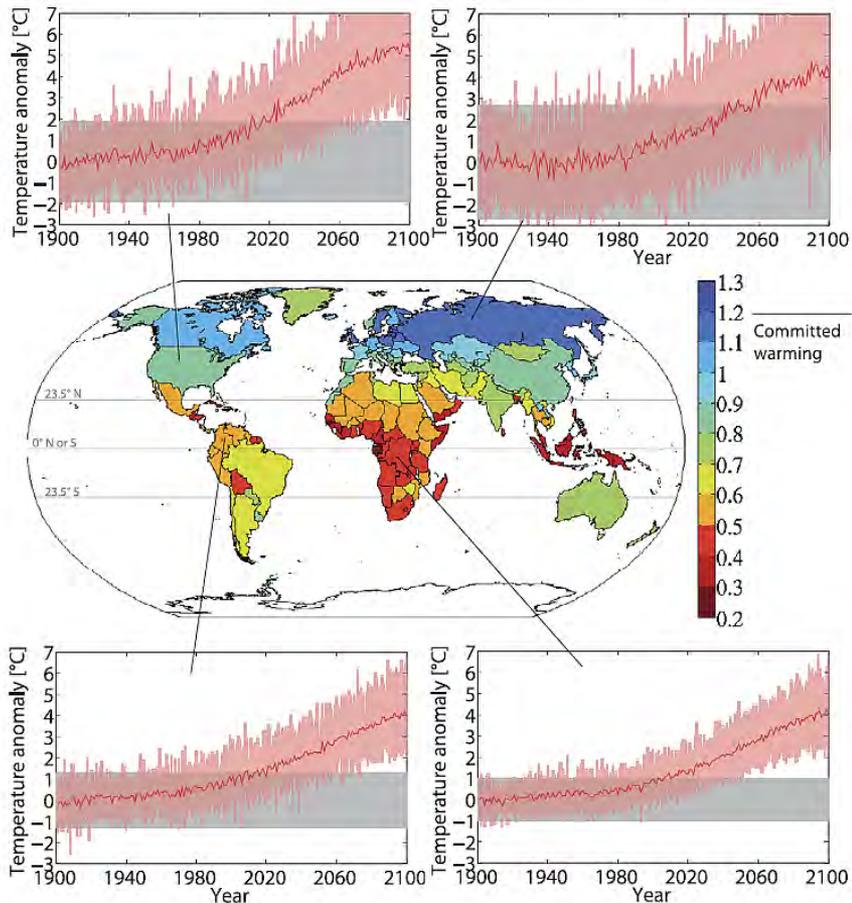
Уровень океана

Составляющие роста уровня океана

Contributors to global sea level rise (1993-2018)



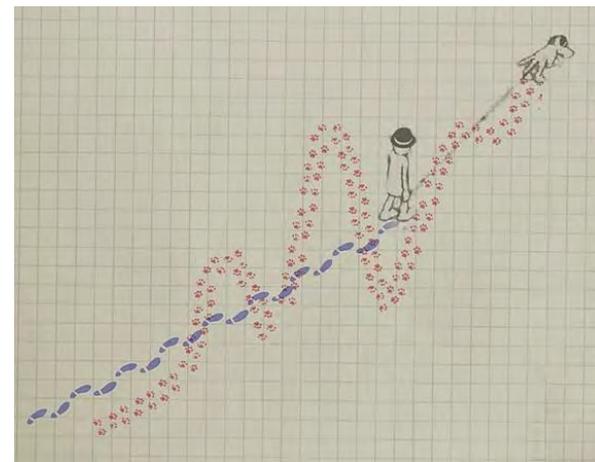
NOAA Climate.gov
Adapted from SOTC 2018



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

НО! При условии, что «обыватель» будет помнить о климате прошлого.

Mahlstein et al., 2011

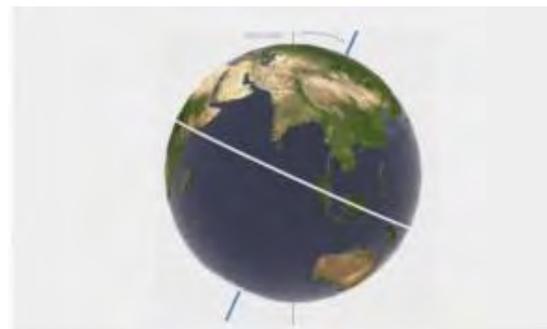
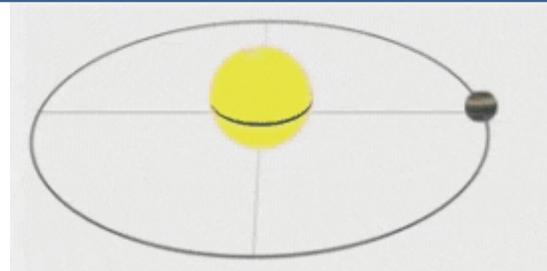


Причина современного потепления — астрономические циклы!

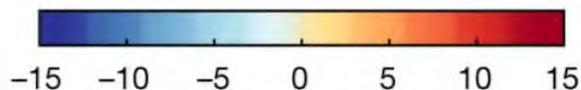
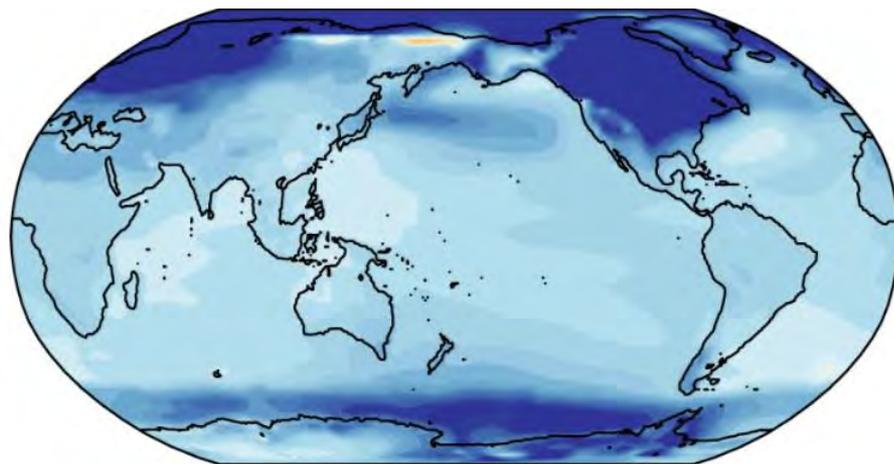
Циклы Миланковича (в честь сербского ученого Милутина Миланковича) – долгопериодные колебания солнечной энергии, приходящей к поверхности Земли, обусловленные изменением астрономических характеристик.

Период циклов:

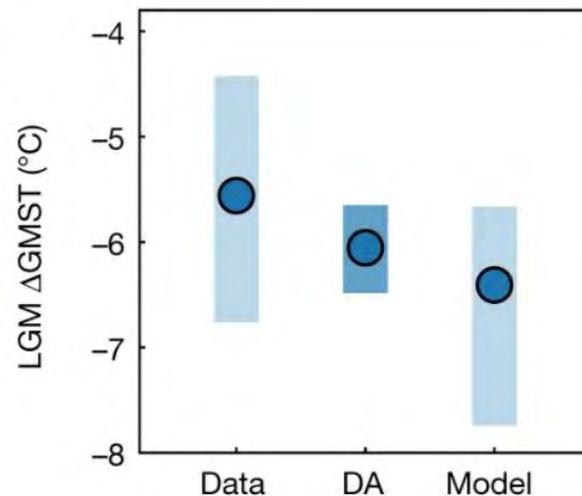
- Эксцентриситет орбиты Земли: **95, 125, 400 тыс.лет**
- Колебания угла наклона земной оси к плоскости её орбиты: **41 тыс.лет**
- Прецессия оси орбиты: **19, 22, 24 тыс.лет**



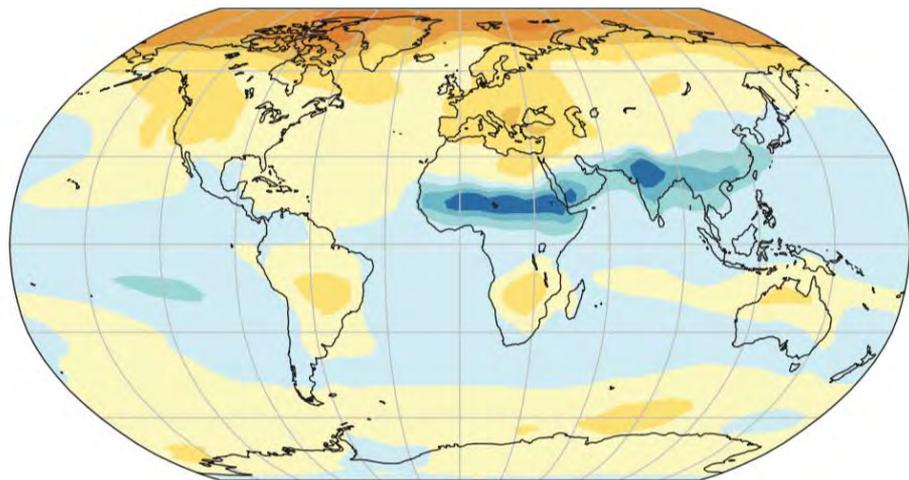
Суперпозиция астрономических циклов —
запуск ледниковых и межледниковых эпох



Разница глобальной температуры воздуха между
ледниковыми и межледниковыми эпохами



Межледниковье и современный климат

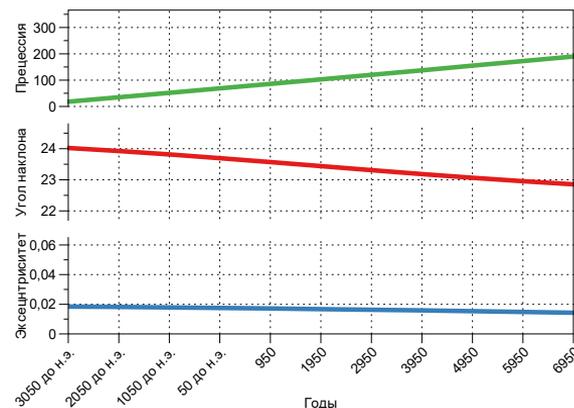


Разница глобальной температуры воздуха между максимумом межледниковья и современным потеплением

IPCC, 2013



Глобальная температура за последние 10 тысяч лет



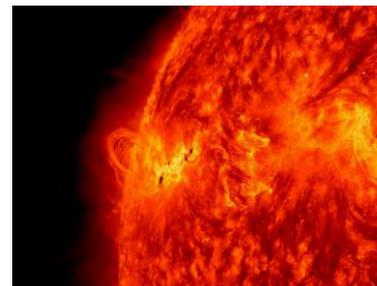
Laskar et al, 2004

Изменения основных циклов Миланковича

Причина современного потепления — 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).

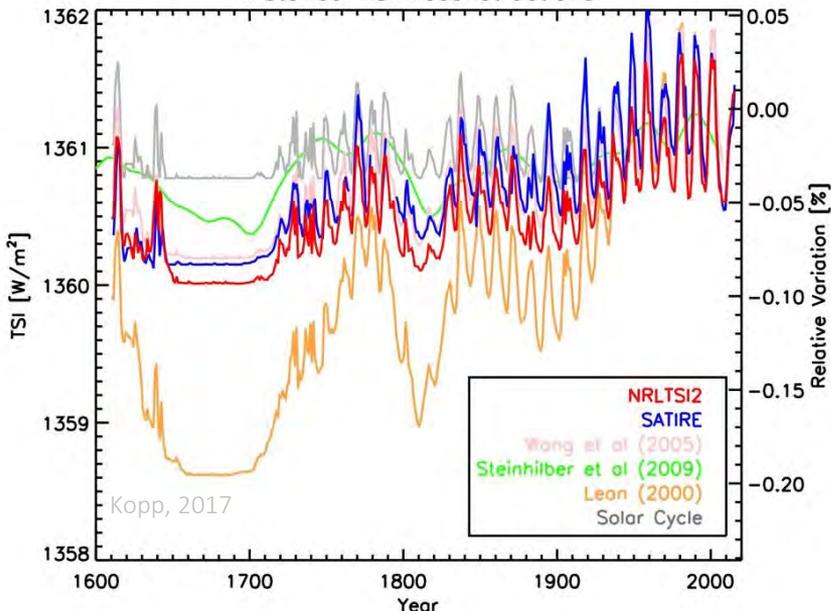


С конца 1970х энергия от солнечное излучение, достигающее ВГА, измеряется по спутниковым данным

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



Historical TSI Reconstructions



Реконструкции солнечной постоянной

Изменчивость солнечной постоянной:

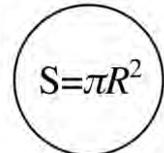
~1 Вт/м²

Для поверхности Земли:

<0.2 Вт/м²

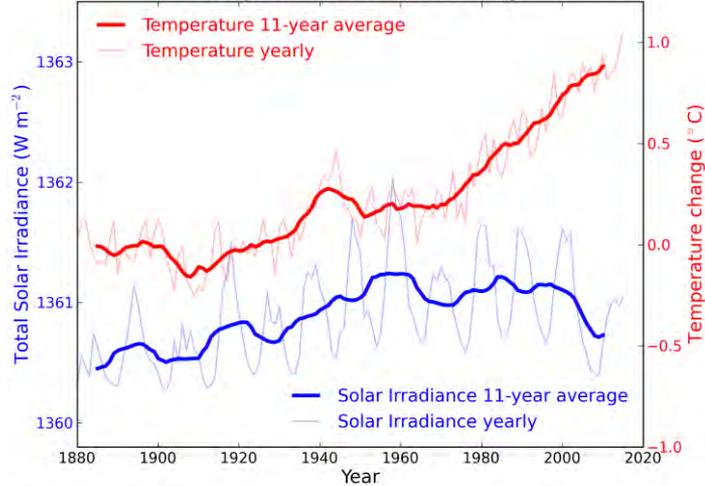
Антропогенное радиационное воздействие:

2.7 (1.9 ÷ 3.5) Вт/м²



$$S = 4\pi R^2$$

Temperature vs Solar Activity

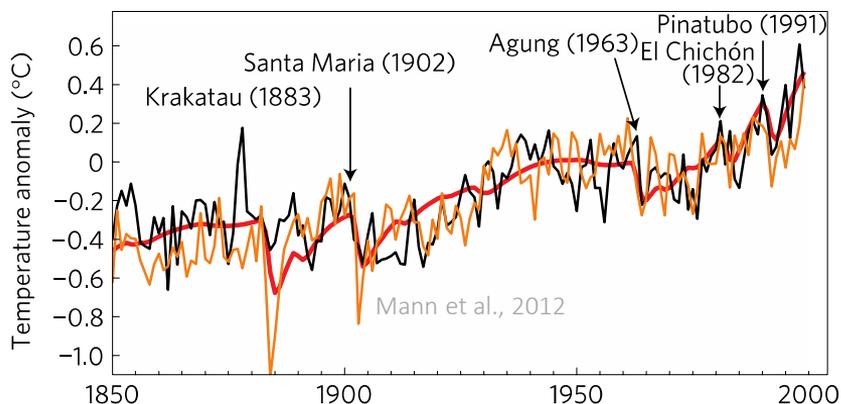
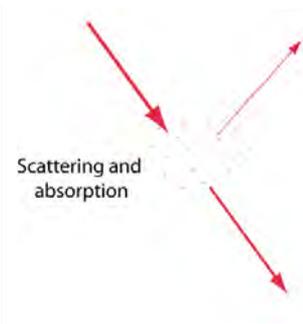


**Да извержение одного вулкана
заткнет за пояс всю вашу
антропогенную деятельность!**

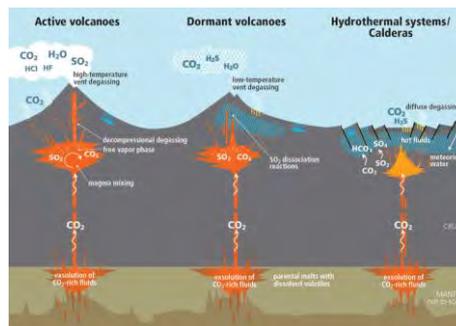
Влияние вулканов на климат

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.



Изменение температуры и извержения вулканов



Поток CO₂ от вулканов:

~**300–400** млн тонн CO₂/год

Антропогенная деятельность:

~**35-40** млрд тонн CO₂/год

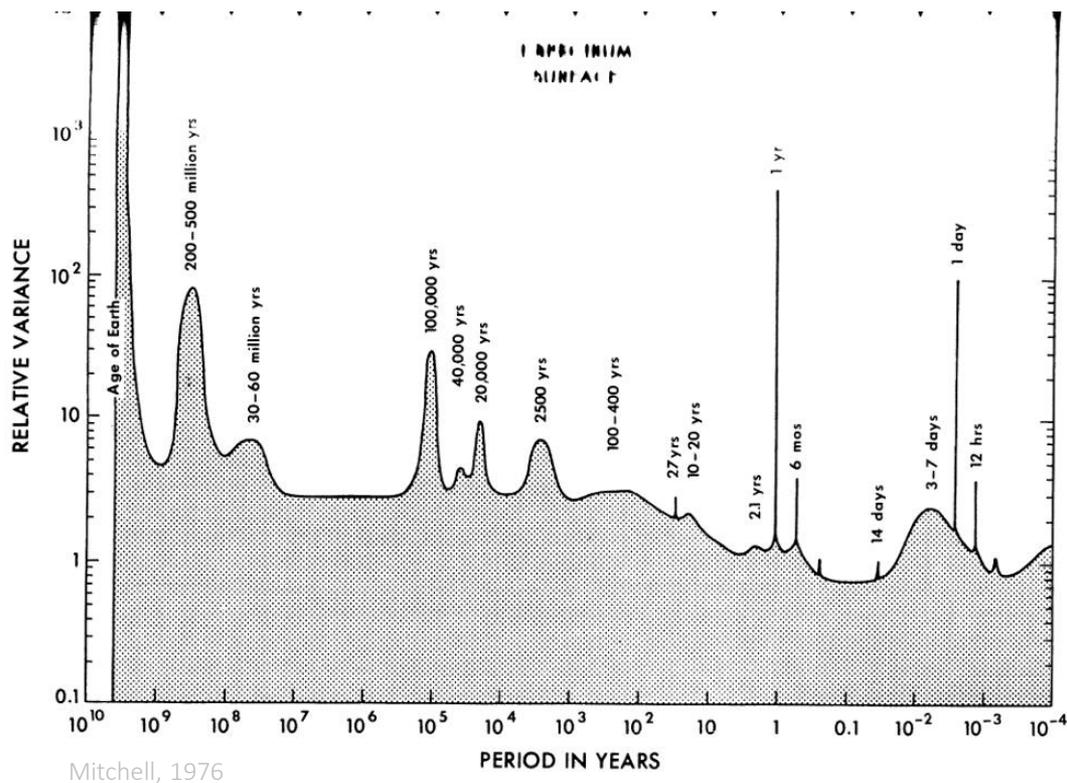
Извержение Пинатубо (1991):

~**42** млн тонн CO₂

Антроп. деятельность в 1991:

~**23** млрд тонн CO₂

Климат менялся всегда, были и более теплые периоды, а никакого человека тогда не было!



Mitchell, 1976

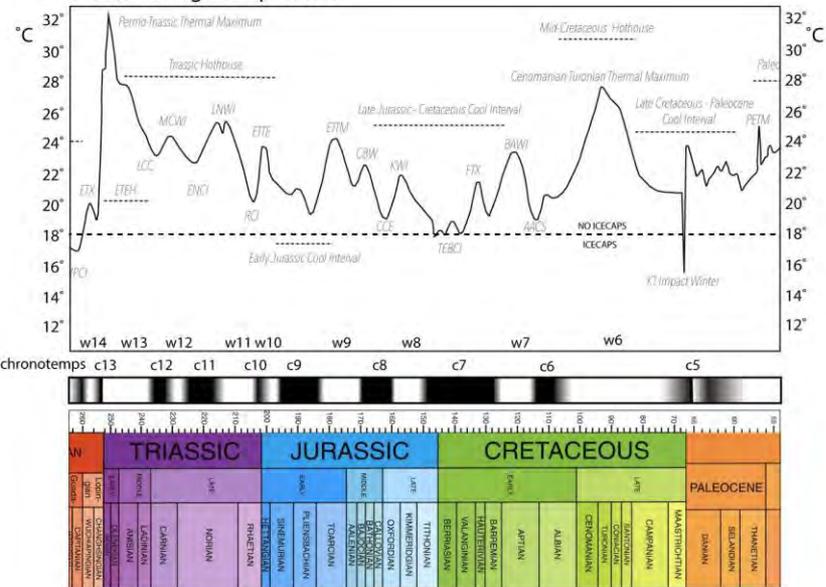
Спектр глобальной температуры



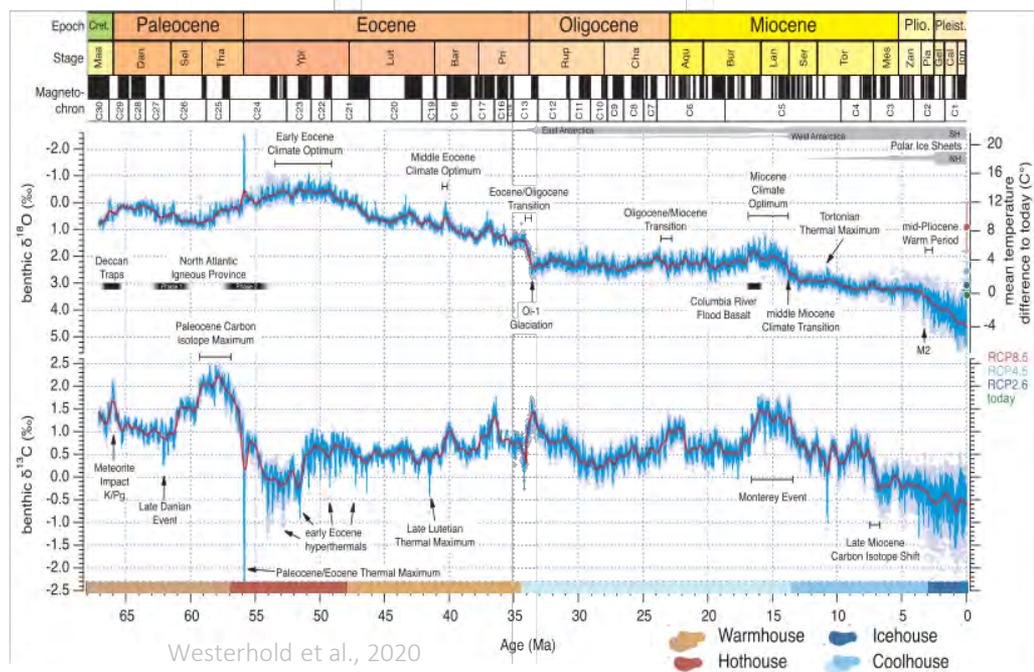
Луи Агассис — один из первых говорил об изменчивости климата на длинных временных масштабах, открыл ледниковые и межледниковые эпохи

Global Average Temperature

Scotese et al., 2021



Глобальная температура воздуха в мезозое



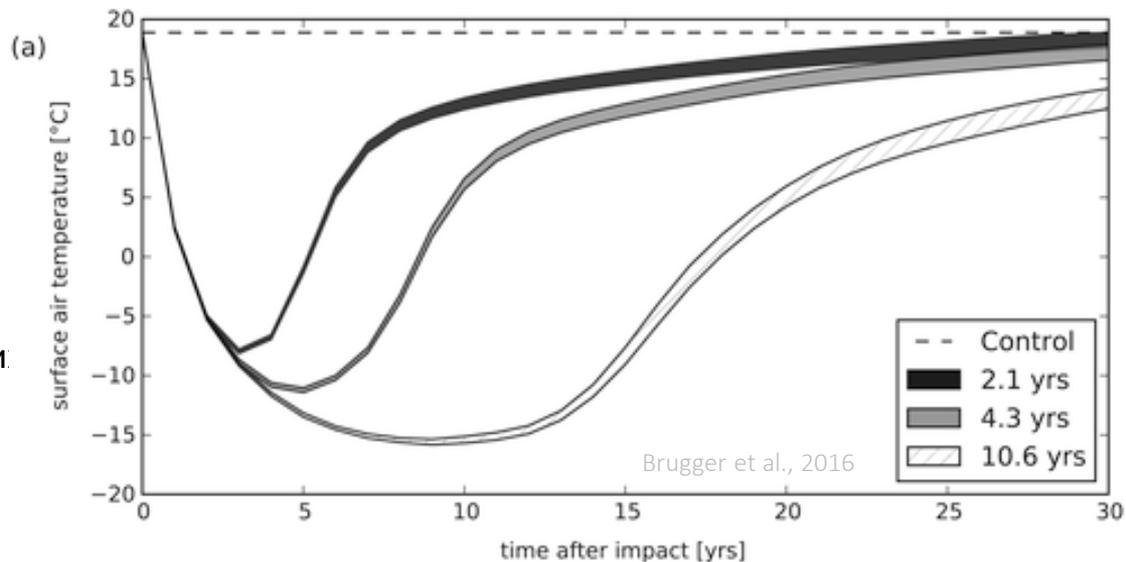
Westerhold et al., 2020

Глобальная температура воздуха за последние 70 млн лет



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

Энергия удара оценивается в 100 тератонн в тротиловом эквиваленте (суммарная мощность 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)

**Мы настолько малы, как мы можем
влиять на климат?**

**Антропогенные потоки CO₂
ничтожно малы по сравнению с
естественными.**

**Да и вообще, основной парниковый
газ — водяной пар!**

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) (~2/3)

Диоксид углерода (CO_2) (~1/4)

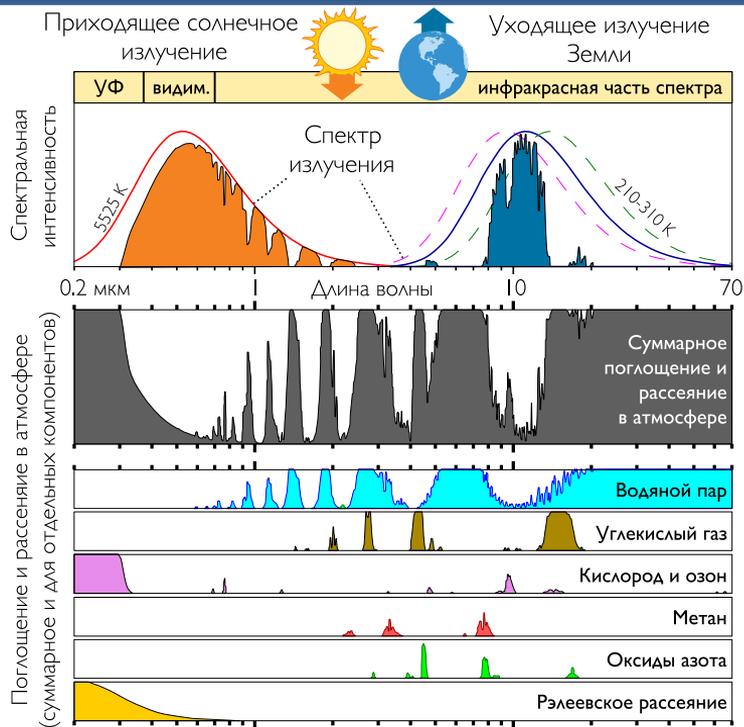
Метан (CH_4)

Озон (O_3)

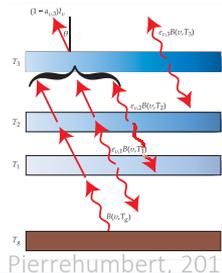
Диоксид азота (NO_2)



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



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



Антропогенные эмиссии CO₂



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

Эмиссии:

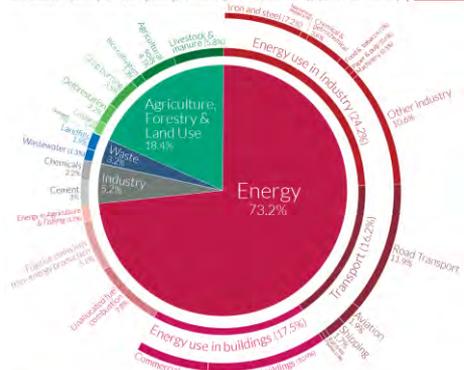
~37 млрд тонн CO₂/год

~10 млрд тонн C/год

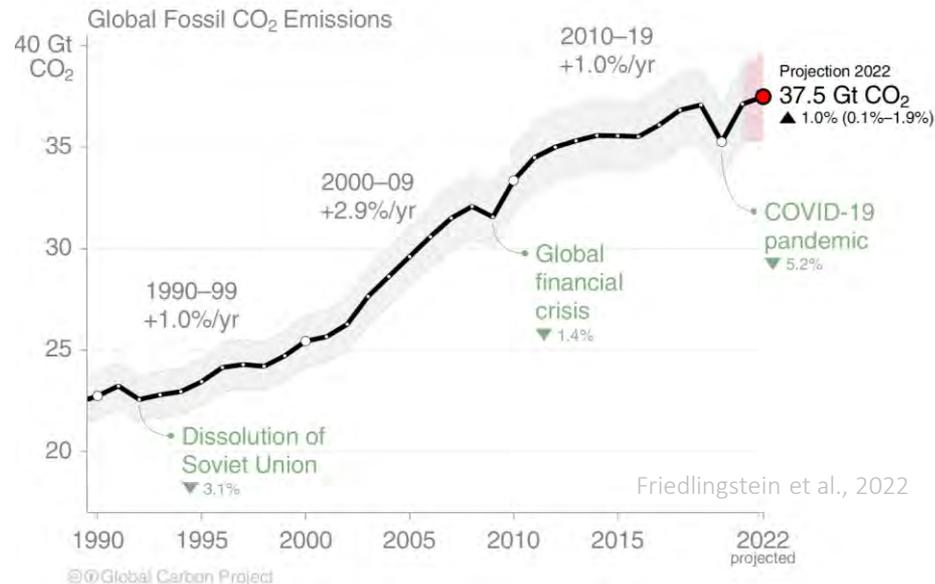
~50 млрд тонн CO₂-эквивалент/год

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

Global greenhouse gas emissions by sector
This is shown for the year 2016 - global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO₂e



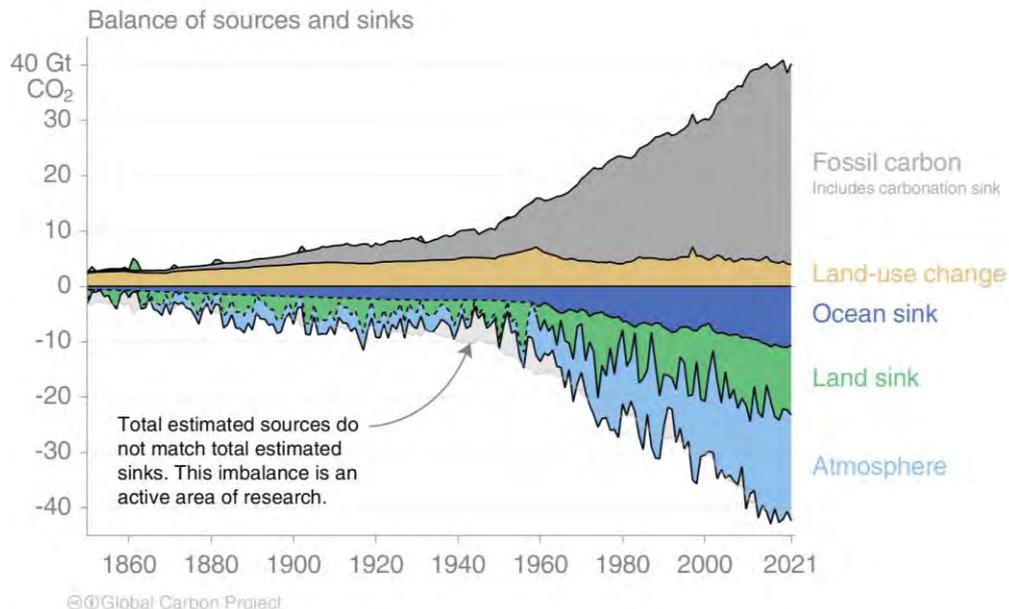
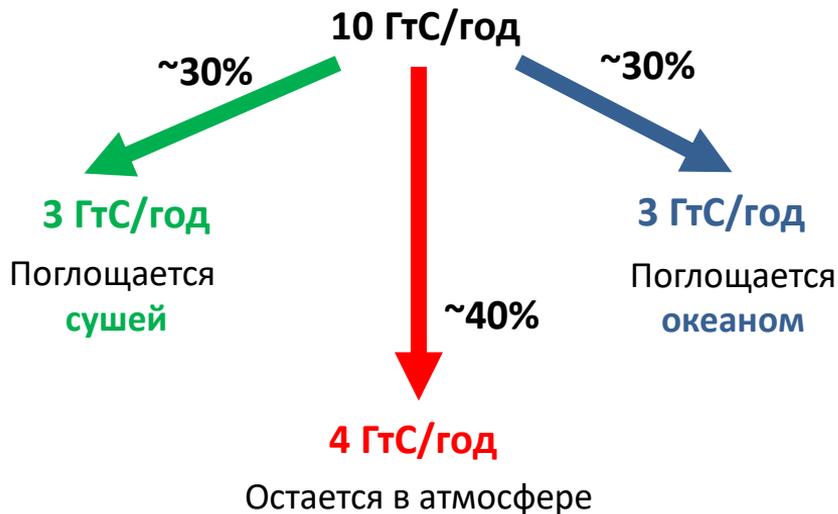
OurWorldInData.org - Research and data to make progress against the world's biggest problems.
Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2022). Licensed under CC-BY by the author Stephan Krause (2022).



Антропогенные потоки малы по сравнению с естественными (составляют около 5%), но они не уравновешены!

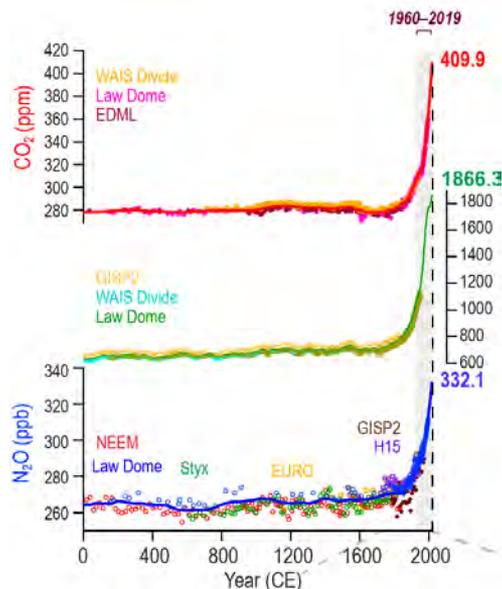
Куда идет избыток углерода?

Антропогенный поток углерода



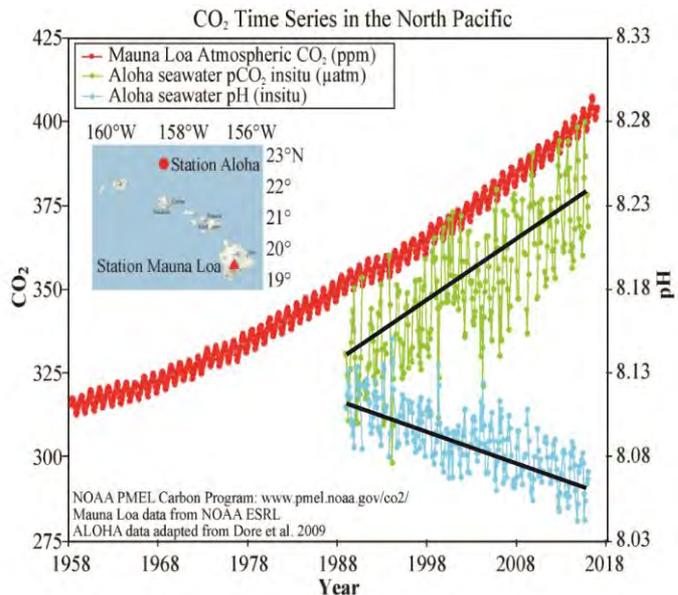
Friedlingstein et al 2022

Атмосфера



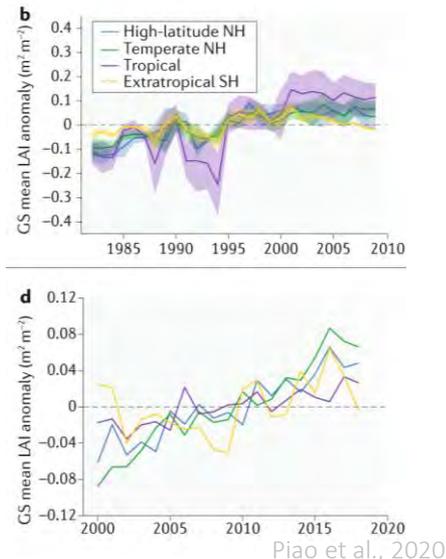
Изменение концентрации углекислого газа, метана и закиси азота в атмосфере за последние 20 тысяч лет

Океан



Изменение содержания CO₂ в атмосфере (красная линия) и в океане (зеленая линия). Изменение кислотности океана (показатель pH).

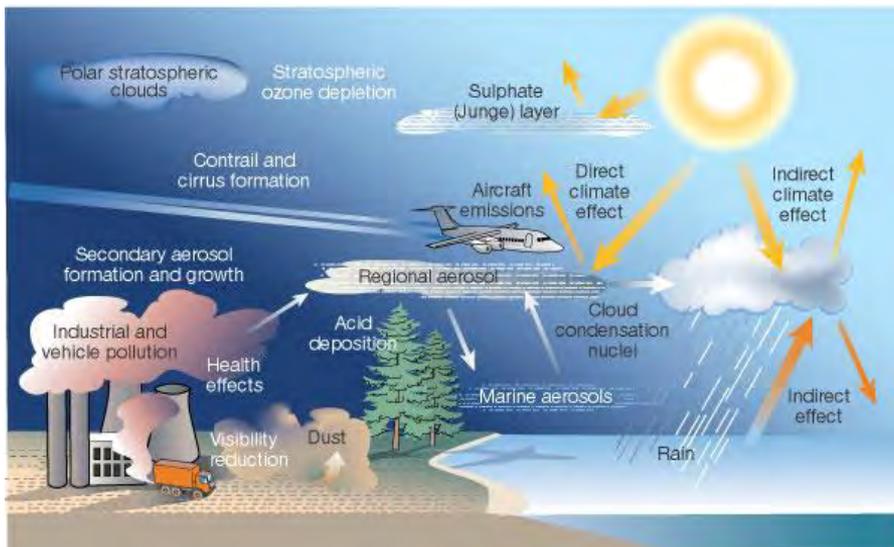
Суша



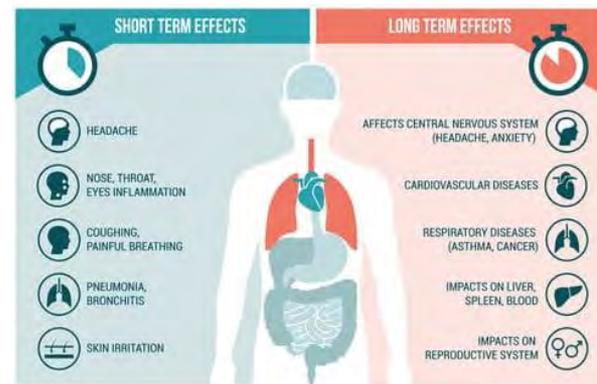
Изменение индекса листовой поверхности по разным спутниковым данным

**А в 1970-е гг. климатологи
говорили, что нас ждет
похолодание!**

Аэрозоли — твердые и жидкие взвешенные в атмосфере частички. Множественные эффекты (прямые, косвенные) — главным образом, охлаждающий эффект для климата (сульфатные аэрозоли), сажа — и охлаждающий и нагревающий эффекты. Аэрозоли ухудшают качество воздуха

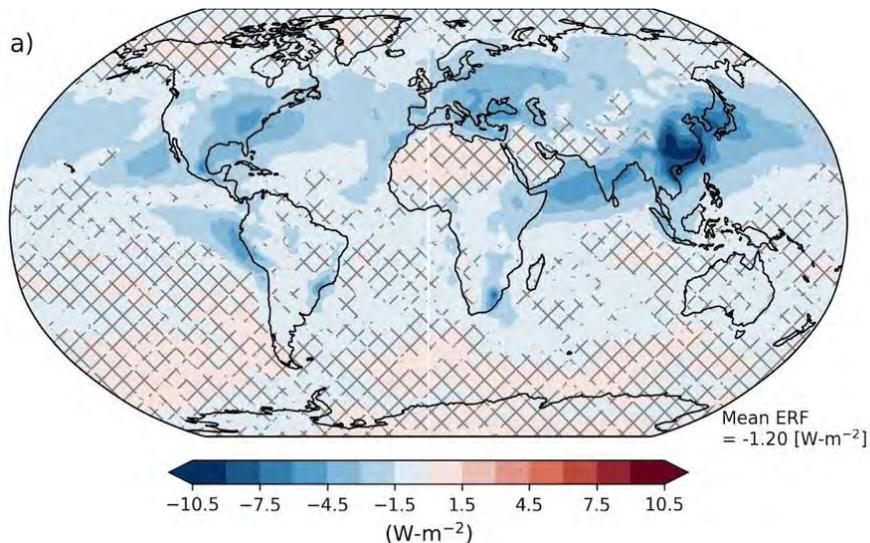


Лондон, декабрь 1952, «Великий смог»

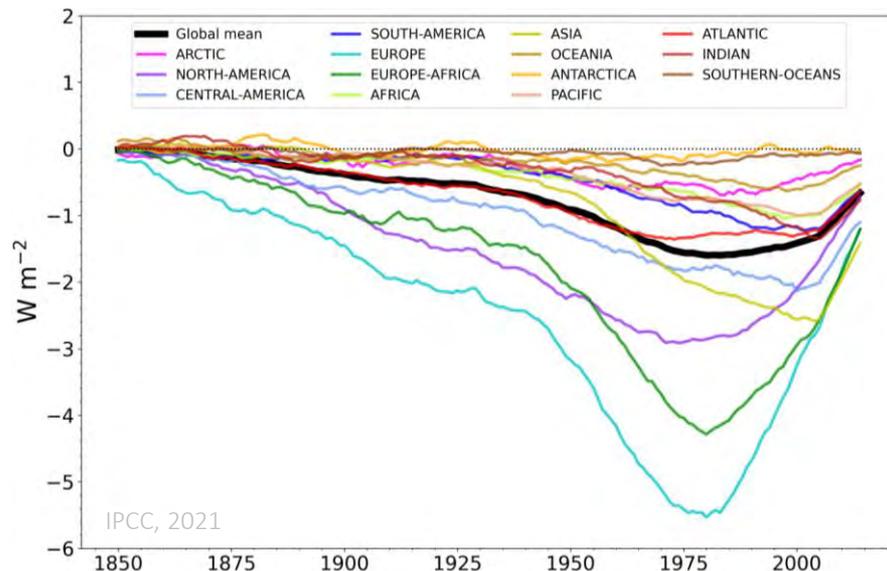


Влияние аэрозолей на здоровье человека

Радиационное возмущающее воздействие аэрозолей (среднее по моделям)



Разница между средним за 1995–2014 и 1850



Изменение воздействия во времени

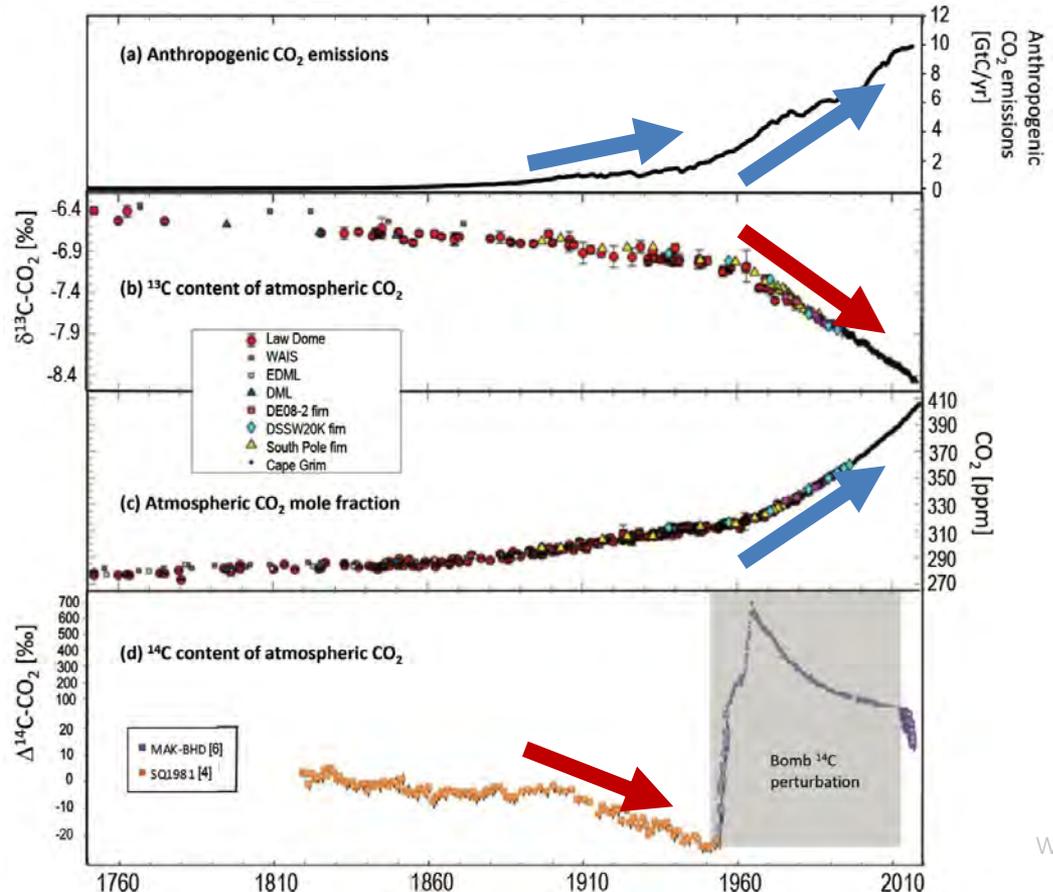
Глобальная оценка радиационного воздействия, связанного с аэрозолями
в 1995-2014 гг. по сравнению с 1850: **-1.2 Вт/м²**

**Нет! Я вам не верю, все же нет
никаких доказательств, что
современное потепление связано с
человеческой деятельностью**

Изменение изотопного состава CO₂ в атмосфере



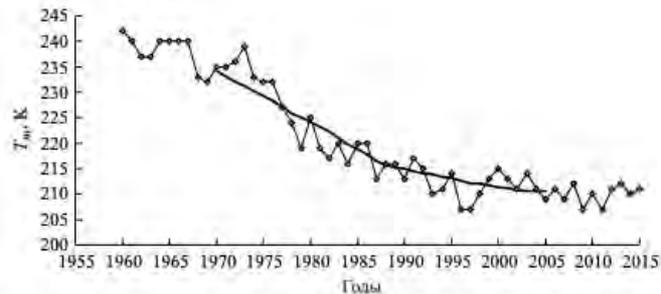
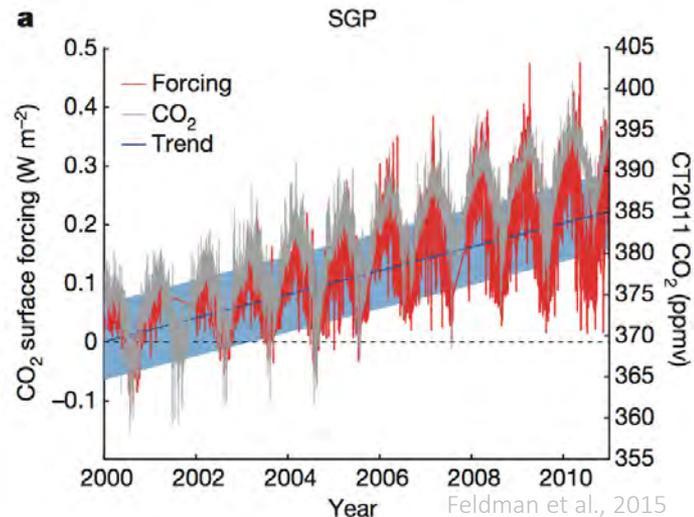
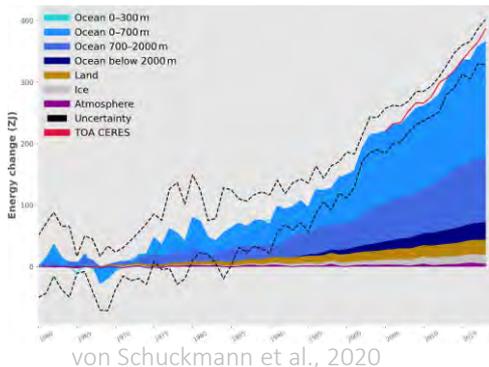
«Эффект Зюсса» (открыт в 1950х гг.): сокращение концентрации ¹⁴C (время полураспада ок.5700 лет) в результате сжигания ископаемого топлива (не содержит ¹⁴C). После ядерных испытаний в атмосферу попало большое количество ¹⁴C. Сейчас ученые смотрят на соотношение ¹³C/¹²C (снижено в растениях).



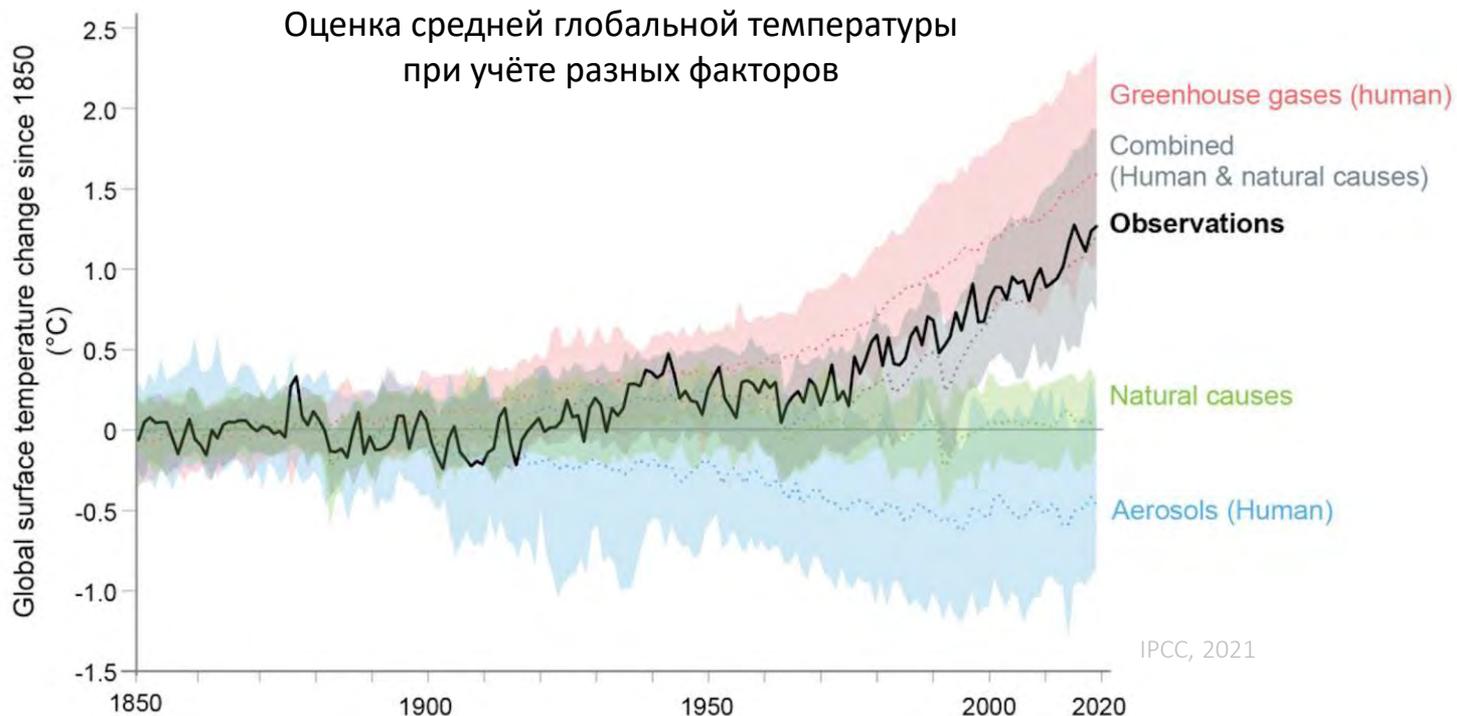
WMO, 2019

Количественные оценки и прямые измерения усиления радиационного воздействия CO_2 (усиления парникового эффекта).

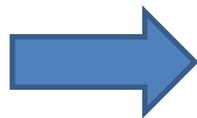
Отклик элементов земной климатической системы соответствует отклику усиления парникового эффекта (накопление тепла в океане, потепление в тропосфере, похолодание в стратосфере и мезосфере, обратные связи и т.д.).



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

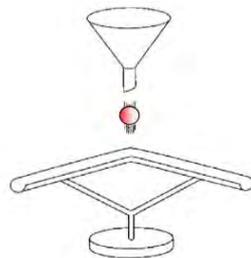


**Да вы погоду на завтра
предсказать не можете,
что уж говорить о прогнозе
климата на 100 лет!**



У нас всего одна планета, под боком нет второй планеты для экспериментов. Поэтому эксперименты проводятся с «цифровыми двойниками» Земли — моделями климата (численные эксперименты климата).
Позже с такими моделями стали создаваться и прогнозы климата.

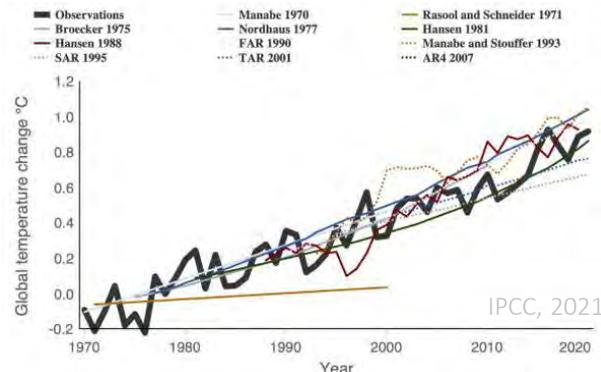
Прогноз погоды: заданы и граничные и начальные условия (прогноз 1-го рода).



Прогноз климата: моделирование с граничными условиями (прогноз 2-го рода).



Отдельные события погоды непредсказуемы за пределами 1-2 недель заблаговременности, но *статистика погод* (климат) может быть определена граничными условиями в течение нескольких месяцев и более.

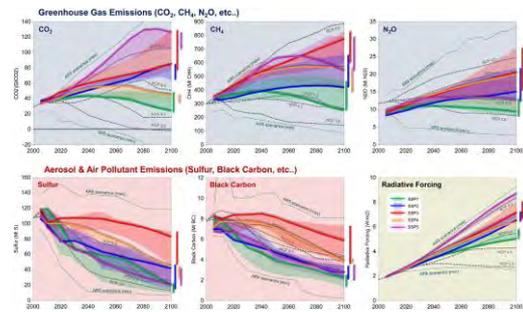
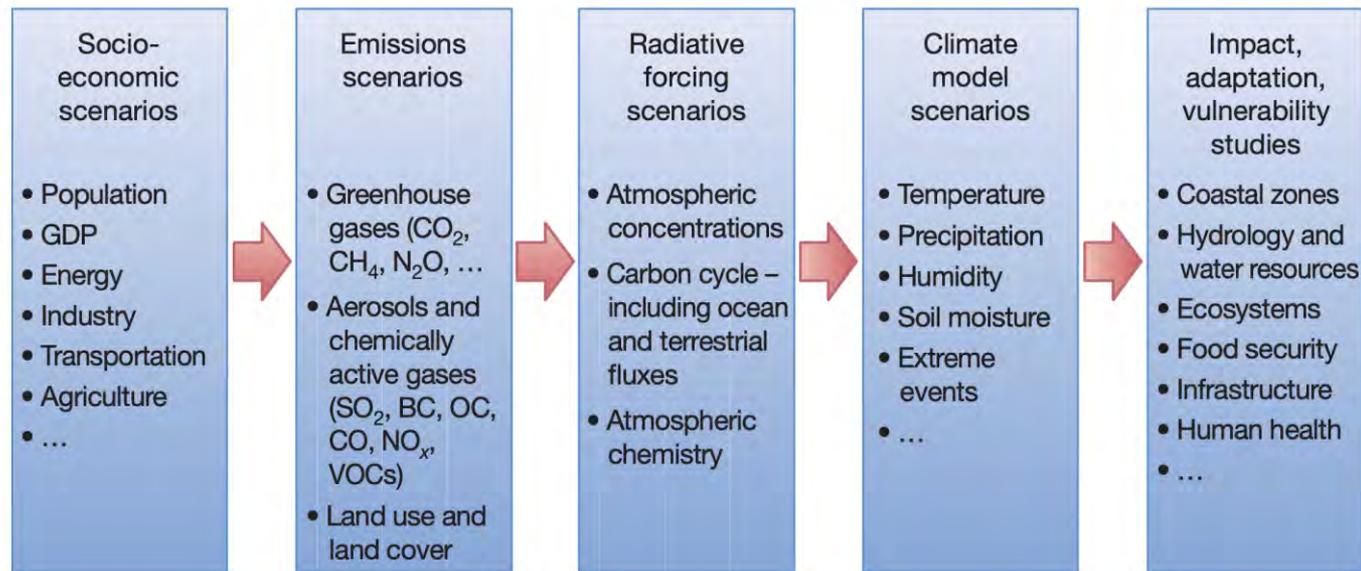


Глобальная температура воздуха по разным прогнозам/сценариям

Антропогенная деятельность должна быть формализована в эмиссиях парниковых газов, аэрозолей, изменениях свойств подстилающей поверхности).

+ цикличность солнечной активности, астрономических факторов, но не заложена информация о вулканах.

Moss et al, 2010



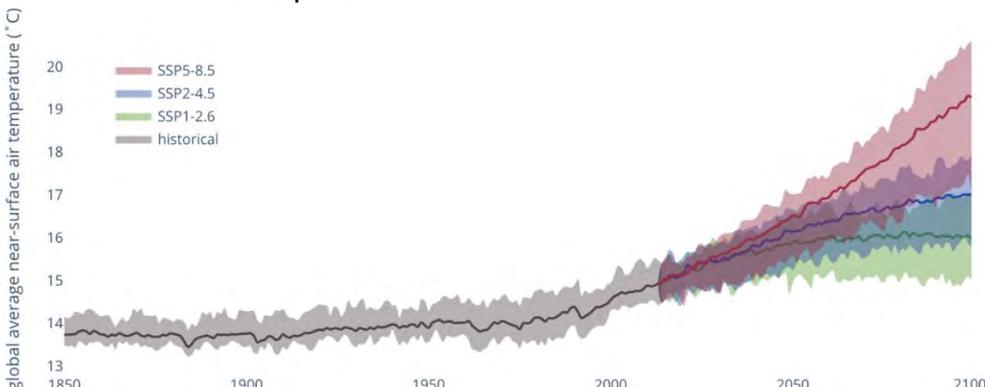
Riahi et al., 2017



Сценарии социально-экономического развития в XXI веке

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 энергоёмкость
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 энергоёмкость 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 энергоёмкого образа жизни



Проекция изменения глобальной среднегодовой температуры воздуха при разных сценариях (по данным моделей CMIP6)

**Это всё придумали Альберт Гор,
МГЭИК, китайские социалисты...**

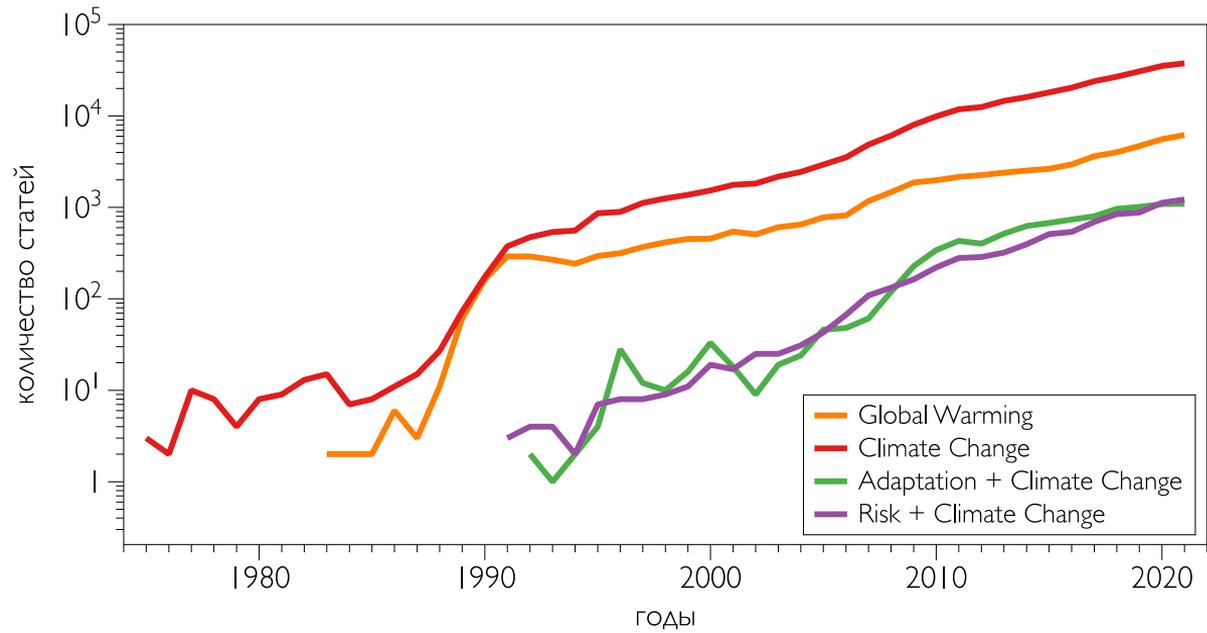
История развития научных знаний



The timeline consists of a central blue arrow pointing right, with orange circular markers at each year. Text boxes with descriptions and images are placed above and below the arrow. A central graphic features a gold Nobel Prize medal, the IPCC logo, and a quote from the 2007 report: "Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?".

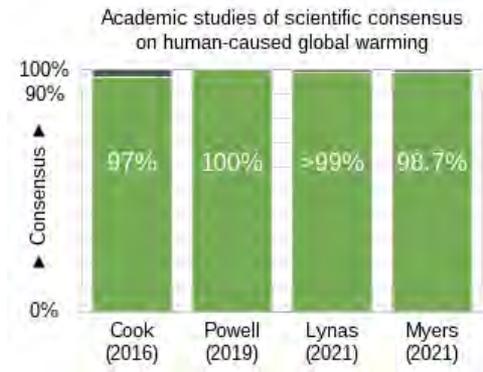
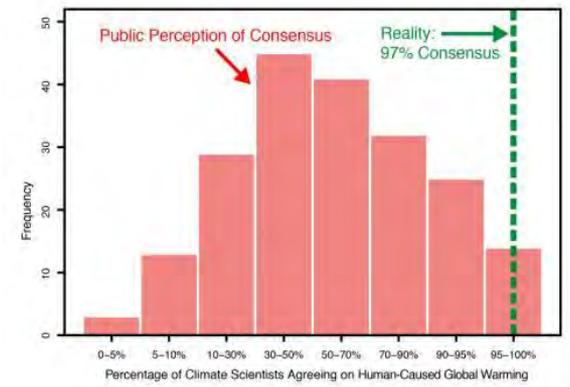
Year	Event / Discovery	Key Figure(s)
1827	First description of the greenhouse effect	Joseph Fourier
1859	Experimental observations of the greenhouse effect	John Tyndall
1896	Calculation of temperature increase in the atmosphere at 2xCO ₂	Svante Arrhenius
1901-1909	Greenhouse effect as a metaphor; Poynting's term "greenhouse effect"	John Poynting
1938	Connection of real observations with T and CO ₂ in the atmosphere	Carl G. Allen
1956	Observatory at Mauna Loa with regular measurements of CO ₂ concentration in the atmosphere	Charles Keeling
1950s	Discovery of a decrease in the concentration of the ¹⁴ C isotope in the atmosphere	Willard Libby
1969	Calculation of temperature increase in the atmosphere at 2xCO ₂ with EBM	Boris Budiko (USSR), Sellers (USA)
1975	Term "Global warming" appears	James Hansen
1979	Calculation of 3D climate models and their output: climate warms due to CO ₂ increase	Charney, Manabe, Hansen
1988	Appearance of the IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
1999	Antarctic ice cores show an acceleration of CO ₂ growth rate for the last 1 million years	Antarctic ice core researchers
2007	Nobel Prize for the IPCC (for spreading knowledge about anthropogenic climate impact)	IPCC
2015	Direct measurements of greenhouse effect strengthening	Direct measurement researchers
2021	Nobel Prize in Physics (for modeling Earth's climate, quantifying climate change, and predicting global warming)	Climate modeling researchers

составил А.В. Чернокульский



Количество статей в базе Web of Science с ключевыми словами об изменении климата в названии / аннотации

Научный и общественный консенсус о причинах современного потепления



МГЭИК: Межправительственная группа экспертов по изменению климата IPCC:
Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/>

Учреждена Всемирной метеорологической организацией и Программой ООН по окружающей среде, утверждена Генеральной ассамблеей ООН 6 сентября 1988 г. (70-ая пленарная сессия).

МГЭИК поручена оценка:

- величины и сроков изменения климата, их возможных воздействий на окружающую среду и социально-экономическую систему;
- реалистичных ответных стратегий.

МГЭИК готовит оценочные, специальные и технические доклады.

При этом доклады МГЭИК обязаны быть политически нейтральными. Они должны давать информацию для лиц, принимающих решения, но не предписывать эти решения.



На данный момент выпущено:

6 оценочных докладов (3 тома от рабочих групп + обобщающий доклад)

6 методологических докладов (методология оценки эмиссий ПГ)

14 специальных докладов (на разные темы)

Доклады МГЭИК — сумма (срез) знаний на данный момент в области исследований изменений климата

Потепление – это благо

- 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.



- Климат меняется и ученые уверены, что причиной современных изменений климата является антропогенная деятельность, хотя в данной области по-прежнему много разных мифов (перечислил далеко не все);
- Изменения климата создают риски для населения, природных экосистем, коммерческих компаний;
- Общество, государственные ведомства, частные компании и отдельные люди могут реагировать (и уже реагируют) на изменения климата. 2 механизма обратной связи:
 - а) адаптация (то есть приспособление к изменениям окружающей среды, попытка минимизировать отрицательные последствия и использовать положительные);
 - б) митигация/смягчение (то есть снижение нашего воздействия на климат, переход на низкоуглеродное развитие, попытка снизить уровень будущего потепления).

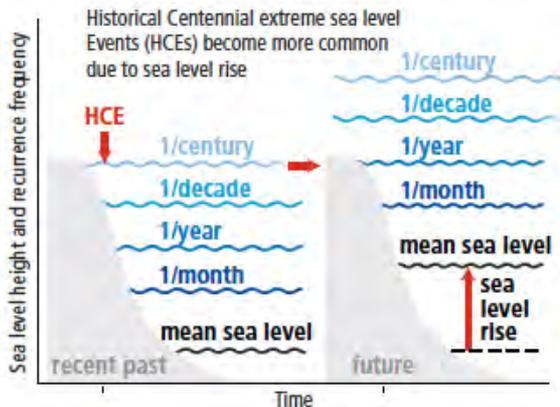


Благодарю за внимание!

Александр Чернокульский

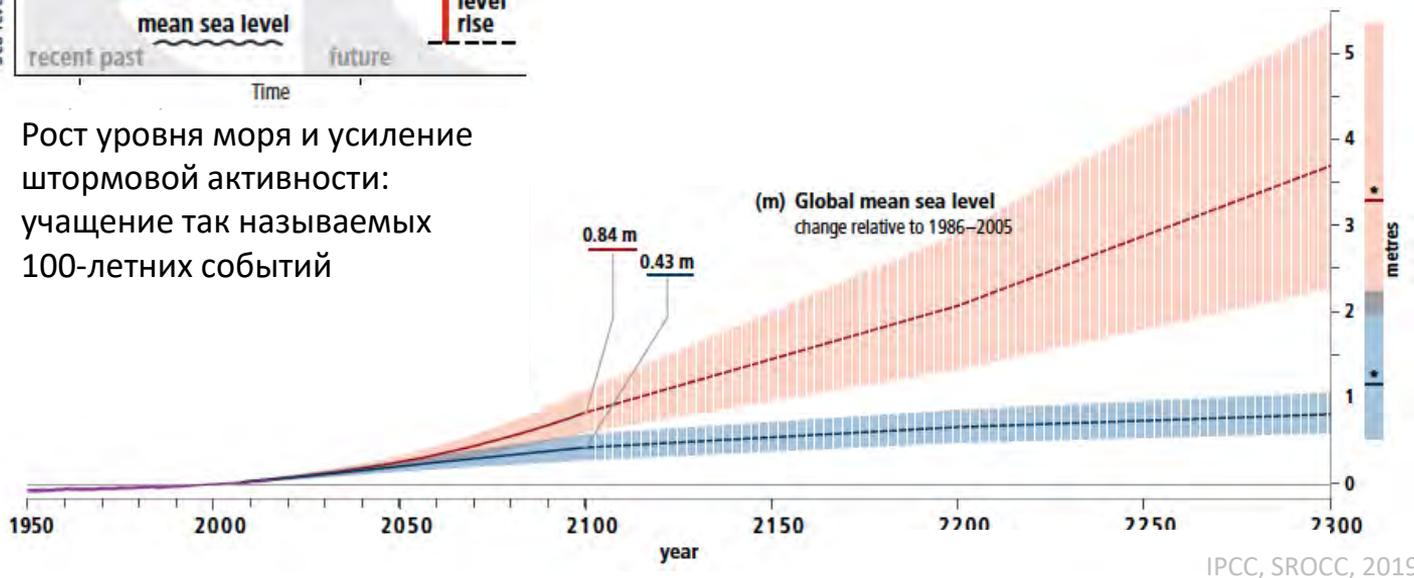
a.chernokulsky@ifaran.ru

Ожидаемый рост уровня моря

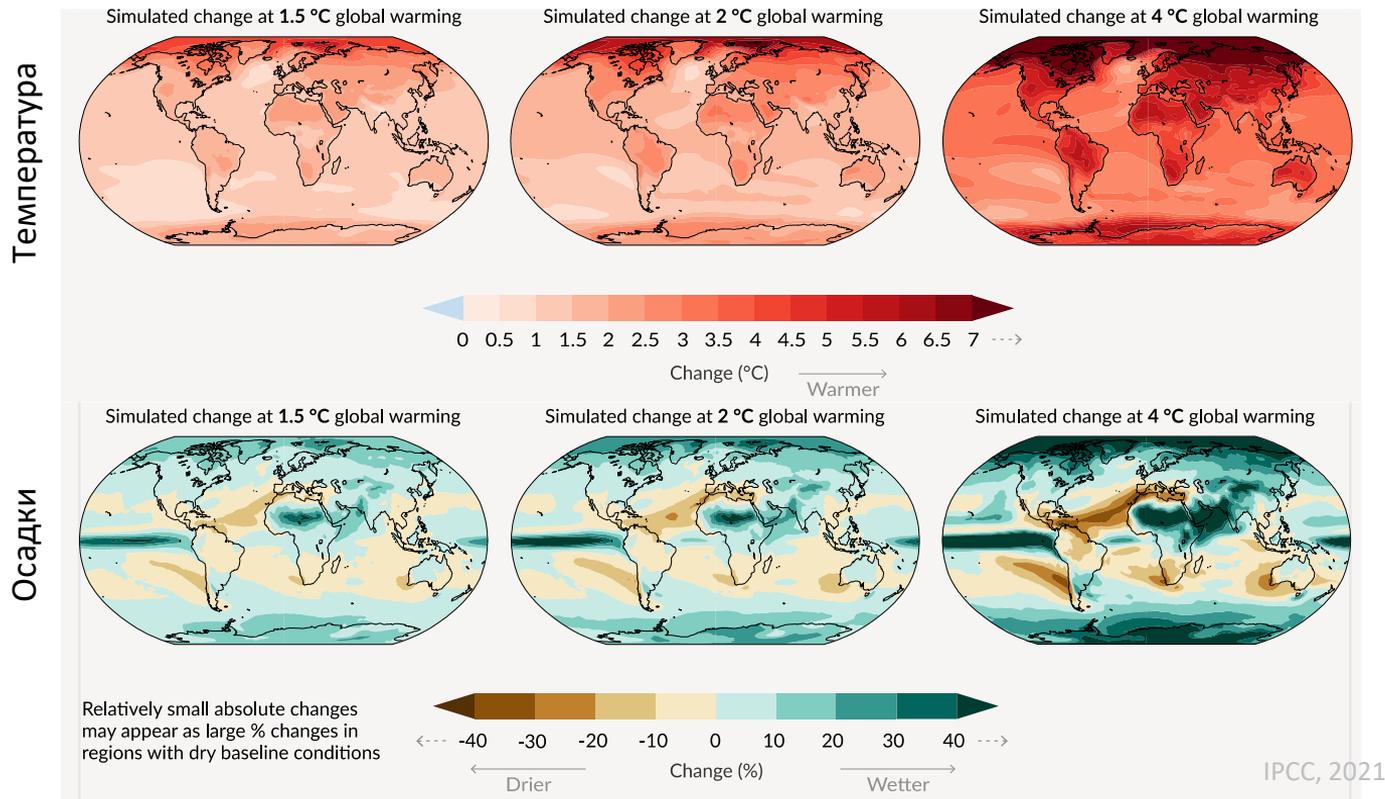


Ожидаемое изменение уровня моря при разных антропогенных сценариях развития (мягком и агрессивном сценариях — отмечены синим и красным цветом, соответственно)

Рост уровня моря и усиление штормовой активности: учащение так называемых 100-летних событий

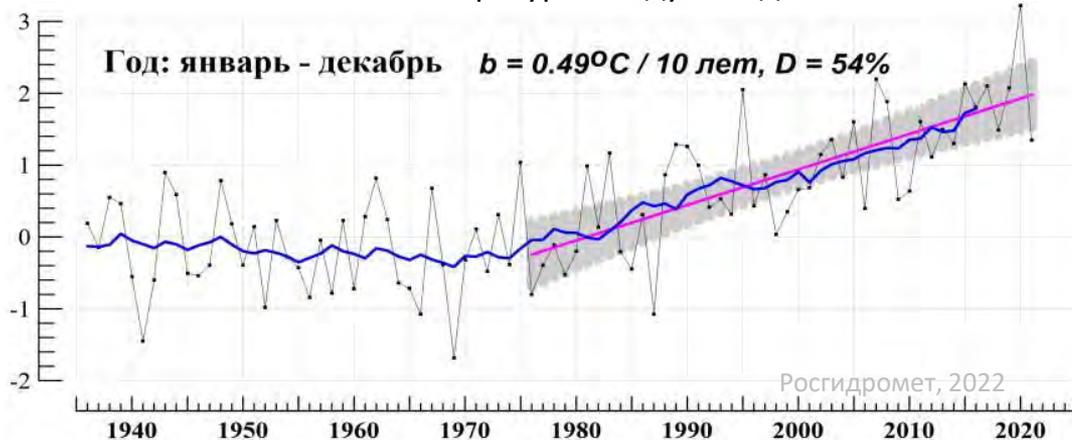


IPCC, SROCC, 2019



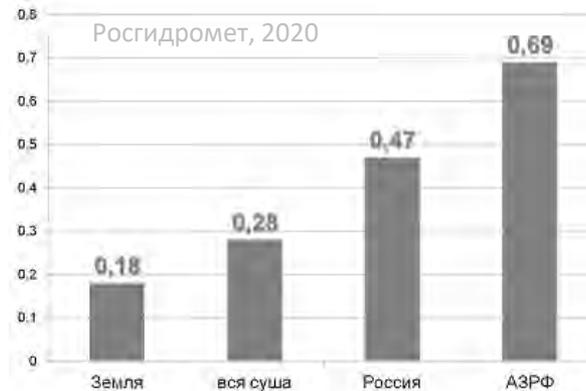
Изменение температуры воздуха и осадков при разном уровне глобального потепления

Изменение температуры воздуха над Россией

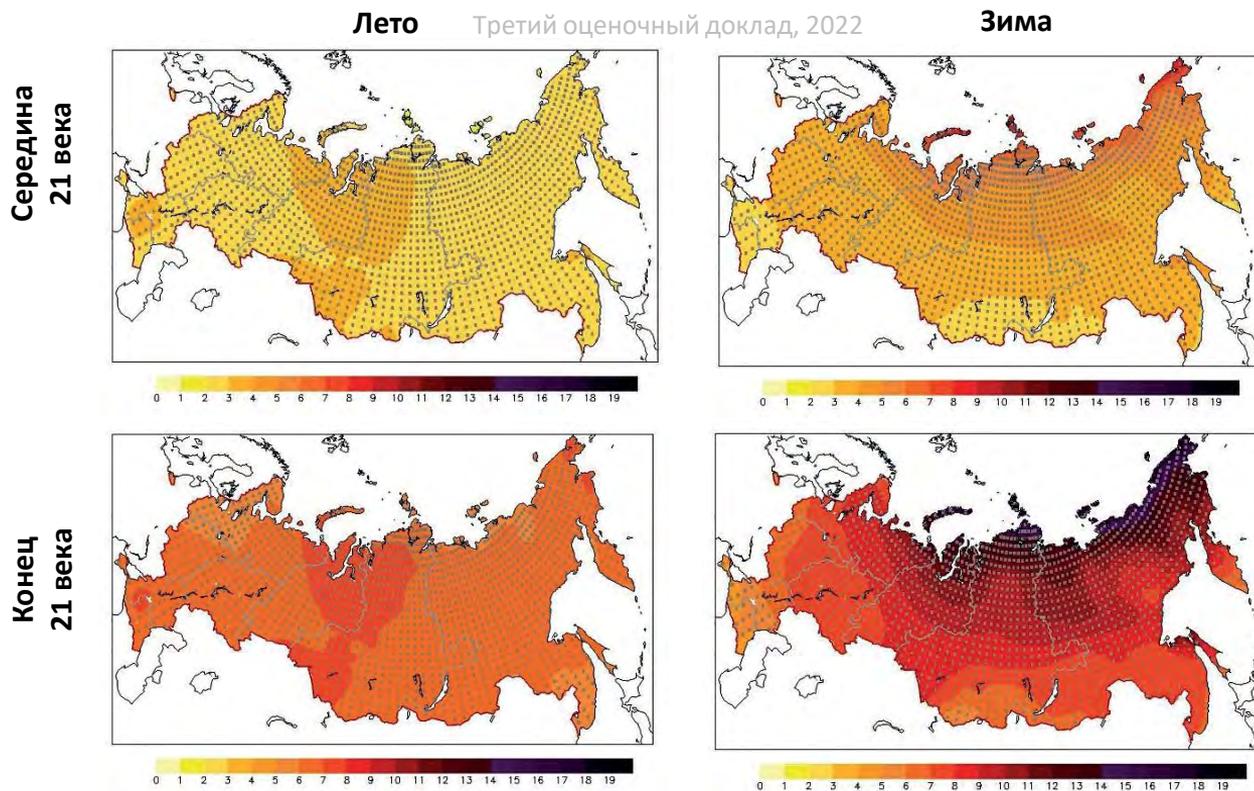


Тренды температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{декада}$, 1976–2019)

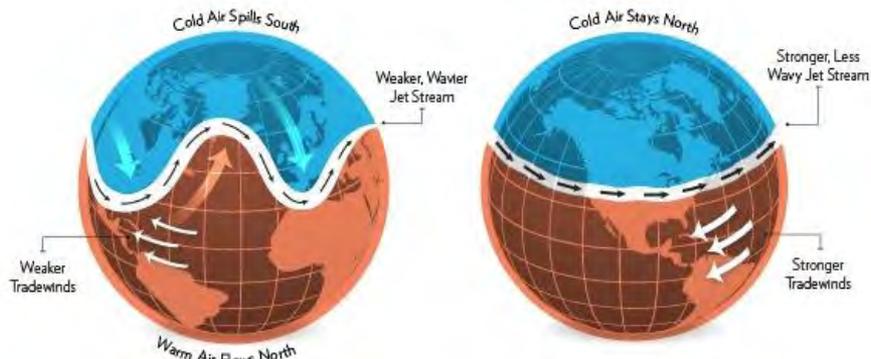
Наблюдается *полярное усиление* глобального потепления (за счет нескольких цепочек обратных связей)



Ожидаемое потепление в России



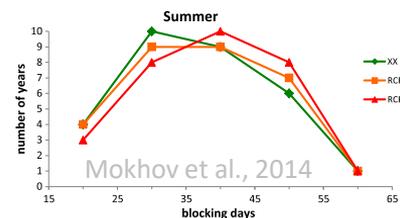
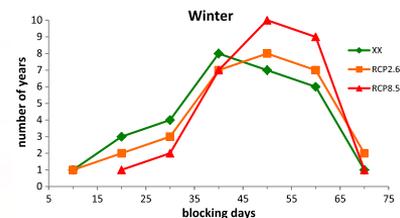
Ожидаемое изменение приземной температуры воздуха в середине и конце 21 века зимой и летом (ансамбль 37 климатических моделей, сценарий RCP5-



Блокирующие антициклоны:
Морозы зимой, жаркая погода летом
(теплые ночи – стресс для организма).

Условия накопления вредных примесей в атмосфере (низкое качество воздуха в городах, летом добавляется риск пожаров и задымления):

2010 г., в Москве: дополнительная смертность составила 11 тысяч человек



Mokhov et al., 2014

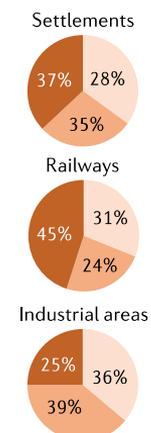
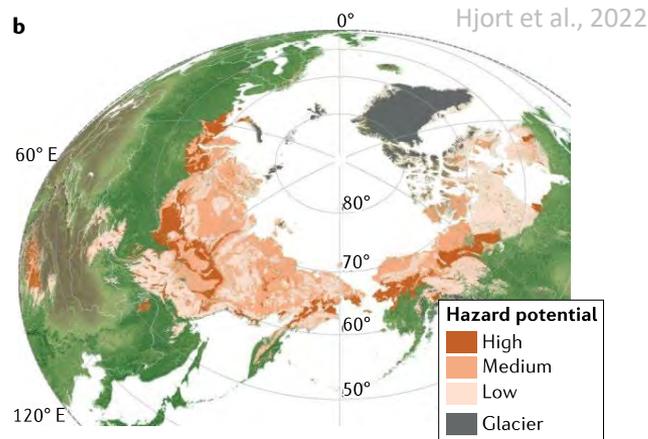
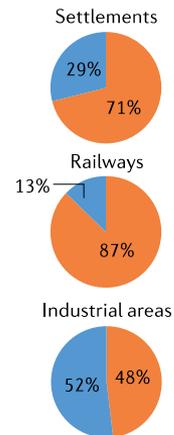
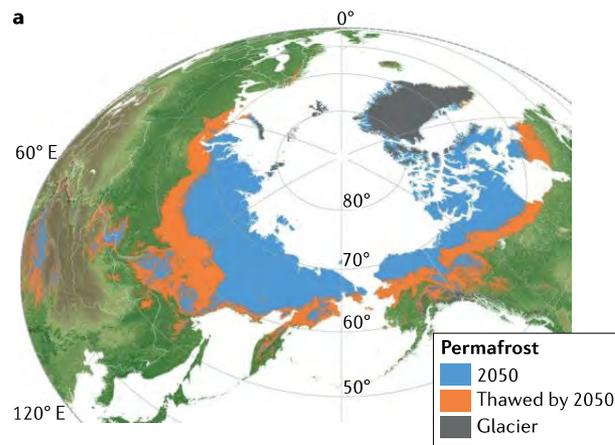
Изменение продолжительности блокирования (в днях) в евро-атлантическом секторе

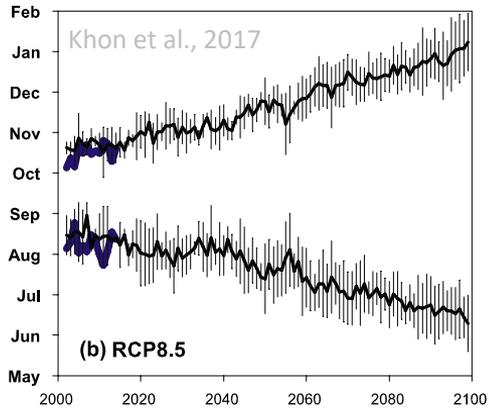
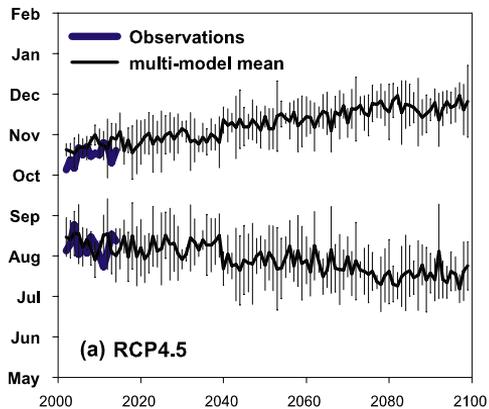


Таяние многолетнемерзлых пород



Ожидаемое изменение к 2050 году площади мерзлоты и угрозы для инфраструктуры (при умеренном сценарии)

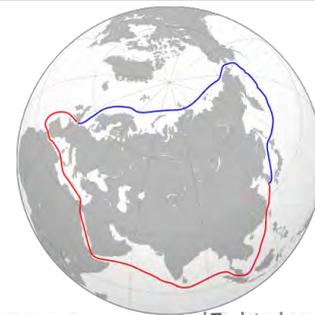
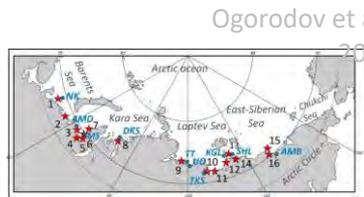




Изменение продолжительности навигационного периода на Северном морском пути

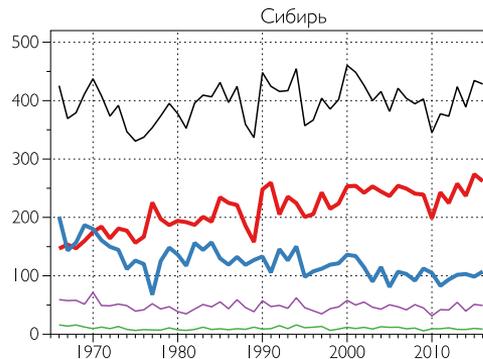


Скорость береговой эрозии на арктическом побережье России



Key area	retreat rates, m/y												Ground ice	Permafrost	Cryo-pegs	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				max
1	1948-2012												4.9	MC		
2	1968-2012												5.2	SP	yes	
	1999-2012												19.6			
3	1947-2001												1.1	MB	C	
	2001-2005												6.3			
4	1988-2005												4.9	MB	C	yes
	2005-2016												7.0			
5	1988-2005												0.9	C	yes	
	2005-2015												7.9			
6	1949-2000												7.8	MB	C	yes
	1999-2013												14.0			
7	1964-2006												6.5	MB	C	yes
	2006-2016												2.5			
8	no data												not known	7.0	MB	C
9	1965-2011												5.0	IC	C	
	2007-2011												6.8			
10	1951-2013												9.6	IC	C	
	2010-2013												17.0			
11	1965-2011												2.0	IC	C	
	2007-2011												1.9			
12	not known												7.0	IC	C	
13	1951-2000												8.6	IC	C	
	2001-2012												12.0			
14	1951-2000												2.6	IC	C	
	2007-2011												11.1			
15, 16	1940s-1970s												15.0	IC	C	
	1970s-1990s												9.8			
	1990-2000												13.6			

Рост числа ливневых осадков

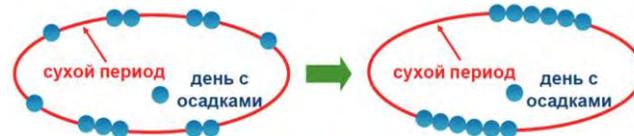


Chernokulsky et al., 2019

ВИД осадков

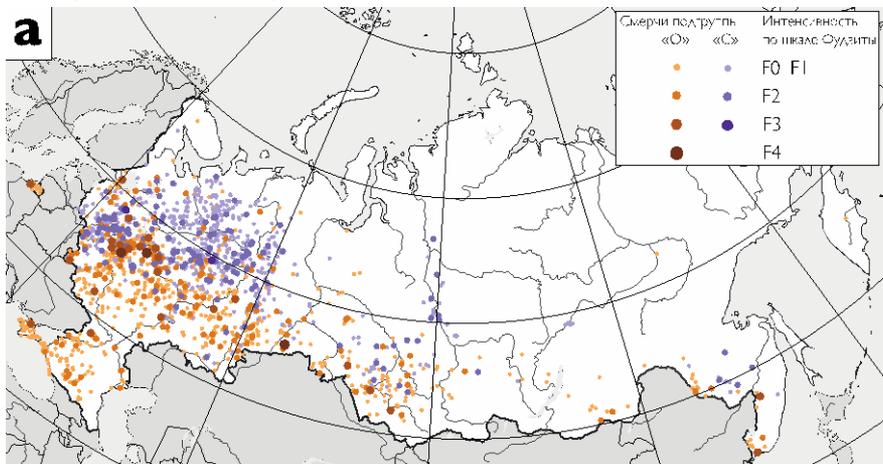
- общая сумма осадков
- ливневые осадки
- обложные осадки
- морозящие осадки
- комбинированные осадки

Кластеризация осадков

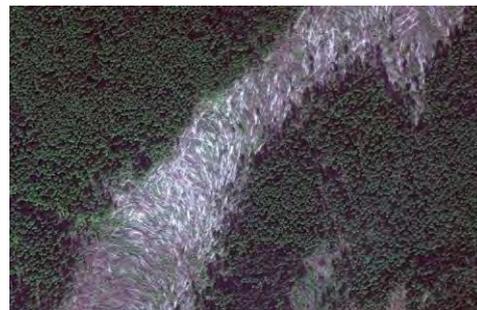


Zolina et al., 2013

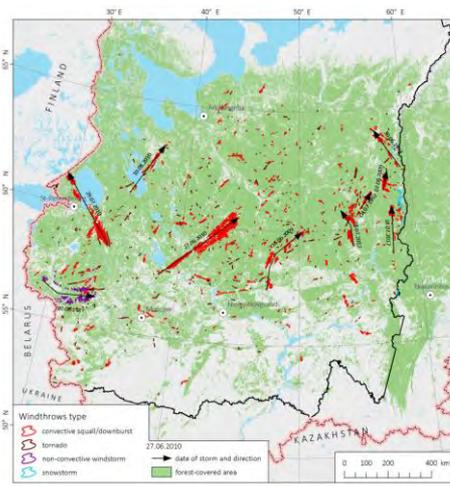
Чернокульский и др., 2021



Смерчи в России



Карта шкваловых и смерчевых ветровалов в лесах

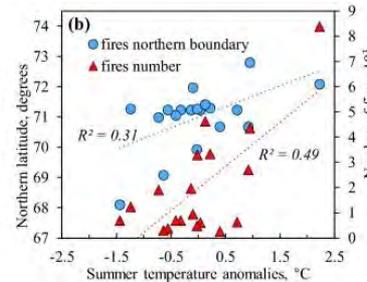
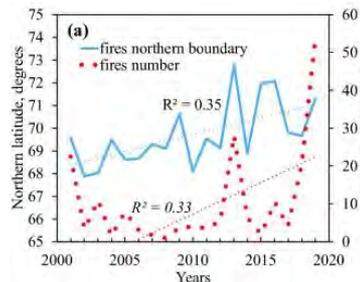
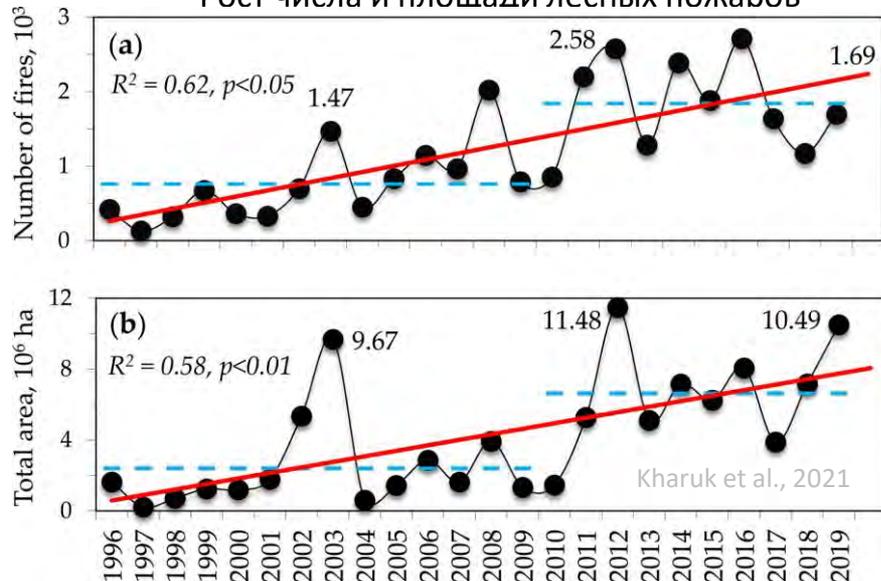


Shikhov et al., 2020



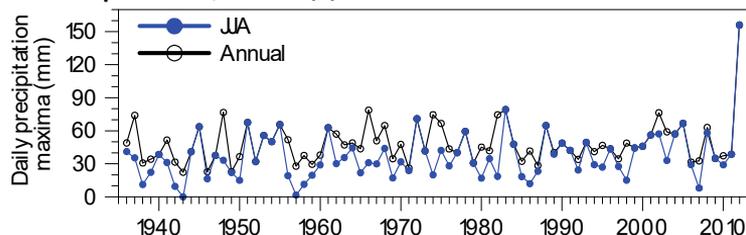
Северная граница природных пожаров

Рост числа и площади лесных пожаров

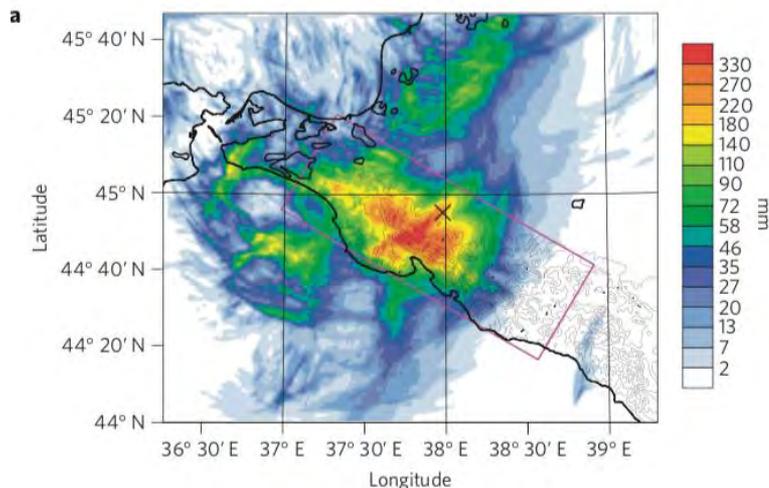




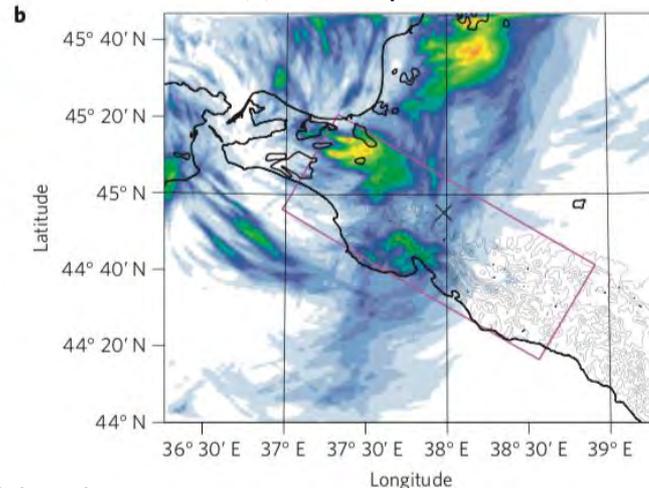
Крымск, наводнение 6-7 июля 2012



Теплое море



Холодное море



Meredith et al, 2015