

Х Всероссийская конференция
«Лаврентьевские чтения по математике,
механике и физике», посвященная 125-летию
со дня рождения академика М.А. Лаврентьева
25 - 29 августа 2025 г., Новосибирск, Россия

Изменение климата и развитие мировой энергетики: роль механики и теплофизики

С.В. Алексеенко,
академик РАН,
Институт теплофизики СО РАН

Академик М.А. Лаврентьев: 125 лет со дня рождения



Академик М.А. Лаврентьев (9.11.1900 – 15.10.1980)
- специалист в области математики и механики,
организатор Сибирского отделения РАН

М.А. Лаврентьев вместе с академиками С.Л. Соболевым и С.А. Христиановичем выступил инициатором создания первого **регионального отделения АН СССР** в Сибири. Первый председатель Сибирского отделения АН СССР (1957 - 1975). Основатель и первый директор **Института гидродинамики СО АН СССР** (1957 - 1976). Организатор **крупных комплексных научных центров в Сибири**, в которых были созданы условия для развития междисциплинарных исследований, внедрения научных результатов в практику, подготовки кадров, комфортного проживания ученых.

Внес огромный вклад в подготовку **научных кадров** как один из организаторов вузов нового типа - Московского физико-технического института (**МФТИ**) и Новосибирского государственного университета (**НГУ**), **Физико-математической школы** и всесибирских школьных олимпиад.

Создал новые направления в **теории функций**, **теории дифференциальных уравнений**, в **механике сплошной среды** (гидродинамическая теория кумуляции) и **прикладной физике** (физике взрыва и импульсных процессов).

«Треугольник Лаврентьева»:

концепция, которая отражает единство трёх элементов: **науки, образования и производства.**



Преамбула: Такого не было 100 лет

Сентябрь 2025 года войдет в историю как месяц **климатических аномалий**.

По словам климатолога Алексея Непомнящих, погодные условия, которые ожидаются в сентябре, не имеют аналогов за последние сто лет и **не соответствуют ни одной из существующих климатических моделей**.

Средняя температура по всей территории Восточной Европы и Западной Сибири превысит климатическую норму на **8-10 градусов Цельсия**. Это приведёт к аномально позднему наступлению осени, затянувшемуся периоду засухи и распространению лесных пожаров на территориях, ранее им неподверженных. В то же время, ряд прибрежных регионов столкнулся с небывалыми ливнями, вызвавшими масштабные наводнения и оползни.

«Причины столь резких изменений климата носят комплексный характер. Наряду с общеизвестным влиянием **парникового эффекта**, вызванного антропогенной деятельностью, существует несколько факторов, требующих более детального изучения. Среди них – аномальное поведение **арктических течений**, изменение **альbedo поверхности Земли** в результате **таяния ледников** и неожиданные выбросы **метана из сибирской мерзлоты**», – говорит Алексей Непомнящих в интервью Сиб.фм.

Непомнящих подчеркнул, что необходимо **немедленно пересмотреть существующие прогнозы изменения климата** и адаптировать к новым реалиям стратегии в области сельского хозяйства, энергетики и градостроительства. Он также призвал к международному сотрудничеству в сфере изучения климатических процессов и разработке эффективных мер по смягчению последствий глобального потепления.

Климатолог Алексей Непомнящих



Изменение климата Земли и энергетика

Эволюция Солнца и Земли

Глобальное потепление

Экстремальные климатические явления

Переломные моменты – Tipping points

Климатические катастрофы

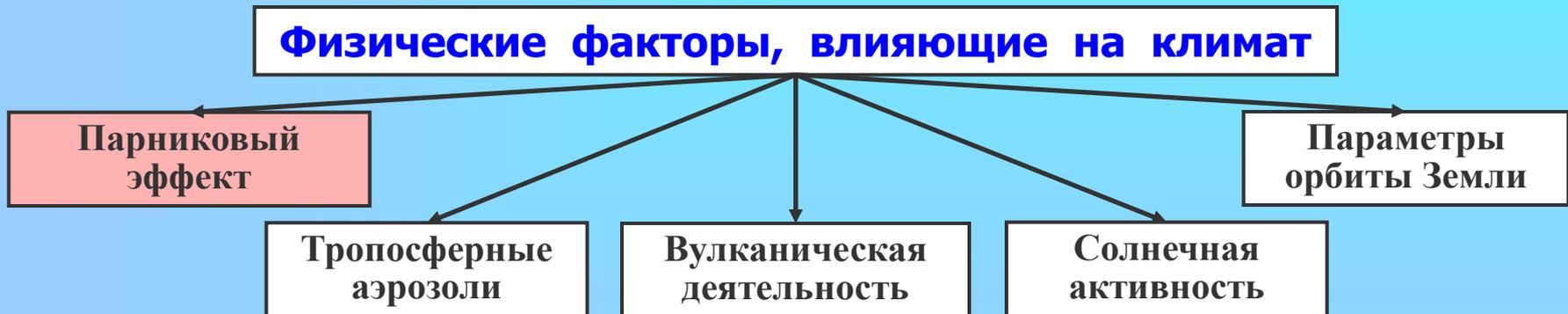


Что делать?

Роль энергетики

Глобальное потепление

- Обнаружен **рост температуры** поверхности Земли, который связывается с **глобальным потеплением**. Его основной причиной считаются выбросы **парниковых** газов – прежде всего, **CO₂**.
- Полагается, что **антропогенная эмиссия CO₂** играет ключевую роль, а главным виновником антропогенных выбросов объявлена **энергетика** на **органическом топливе**. **Энергетический** сектор дает **3/4** выбросов **парниковых** газов.
- В 2015 г. подписано **Парижское Соглашение**, конечная цель которого - не допустить повышения температуры на **2°C** до **конца XXI столетия**, а по новым обязательствам – даже **1,5°C!** (уже **достигнут!**).
- Предлагается полностью отказаться от **угля**, а затем и **газа**, и переходить к **ВИЭ** – возобновляемым источникам энергии!



Дополнительные факторы

1. Тип воздействия

2. Временной масштаб

3. Обратные связи

Вероятностный характер сценариев и прогнозов в климатических моделях



Глобальное потепление

Демонстрация изменения климата и его причин

МГЭИК (IPCC) - Межправительственная группа экспертов по изменению климата.

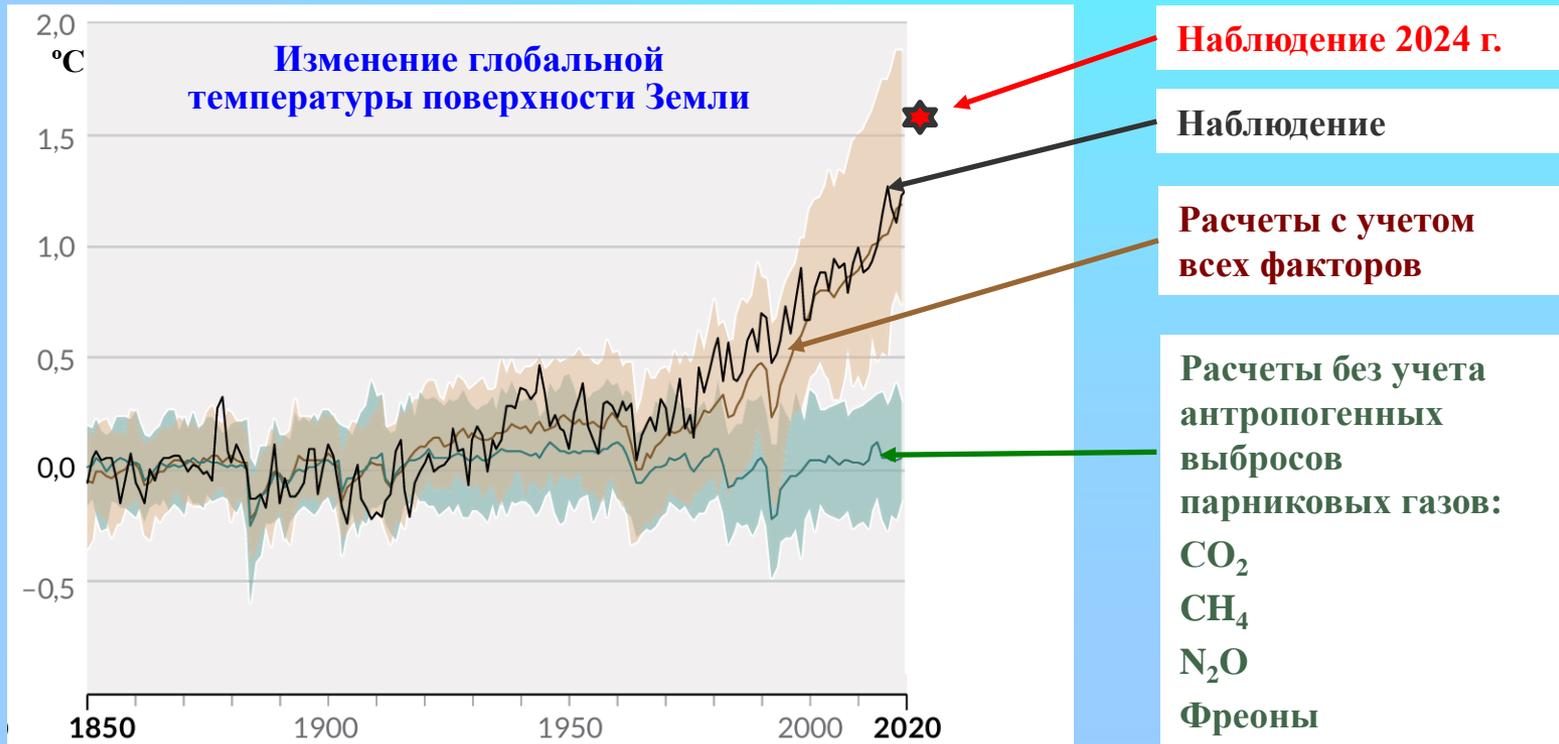
Является ведущим международным органом по оценке изменения климата.

Учреждена Программой ООН и Всемирной метеорологической организацией в 1988 г.

В 2021 г. вышел **Доклад Рабочей группы I МГЭИК** объемом 4 тыс. стр., 4 тыс. авторов!

Ниже показаны основные результаты климатических моделей Земли.

Глобальная средняя приповерхностная температура в 2024 году составила **$1,55 \pm 0,13$ °C!**



Критерии достоверности моделирования

Критерий истины - **практика**. При моделировании сложных систем по объективным причинам (недостаточная точность измерений; слишком малый период наблюдений; стохастичность процессов) **практика не может** достоверно подтвердить результаты моделирования. Тогда приемлемым допускается метод **бенчмаркинга**, который представляет собой сопоставительный анализ на основе эталонных показателей. В научных исследованиях можно выделить **2** этапа. **1 этап** – сравнение моделей на основе решения тестовых (эталонных) задач и последующее определение наилучших моделей. **2 этап** – решение поставленных сложных задач с использованием разных моделей и отбор **наиболее достоверных** результатов с учетом иерархии моделей по качеству.

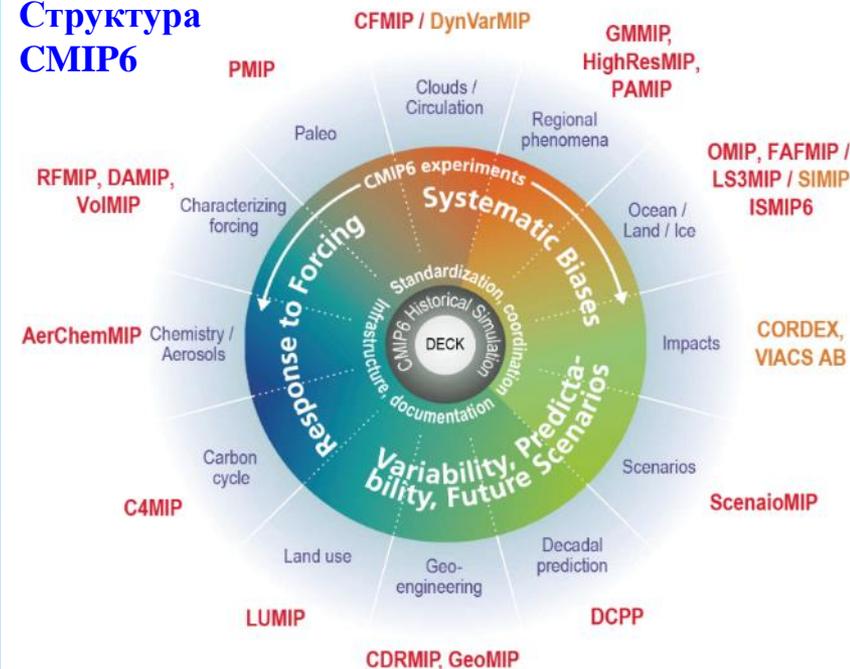
*Степень достоверности выражена с использованием **пяти** классификаторов: очень низкая, низкая, средняя, высокая и весьма высокая, и печатается курсивом, например, средняя степень достоверности. Для обозначения **оцененного правдоподобия** используются следующие термины: практически достоверно 99–100 %; весьма вероятно 90–100 %; вероятно 66–100 %; почти так же вероятно, как и нет 33–66 %; маловероятно 0–33 %; очень маловероятно 0–10 %; и крайне маловероятно 0–1 %.*

Модели МГЭИК

CMIP6 (6th phase of the Coupled Model Intercomparison Project – 6-ая фаза Проекта по взаимному сопоставлению сопряженных моделей). В **России 4** модели:

1. **Главная геофиз. обсерв.** им. А.И. Воейкова
2. **ИВМ** им. Г.И. Марчука РАН (**полная модель**)
3. **ИФА** им. А.М. Обухова РАН
4. **Московский энергетический институт МЭИ**

Структура CMIP6





Глобальное потепление: парниковые газы

Дисбаланс энергии (поглощение Землей): **2,72 Вт/м²** [$\pm 0,76$] – причина потепления (МГЭИК, 2021).

Дисбаланс возникает из-за **парникового** эффекта и эквивалентен изменению **радиационного воздействия**.

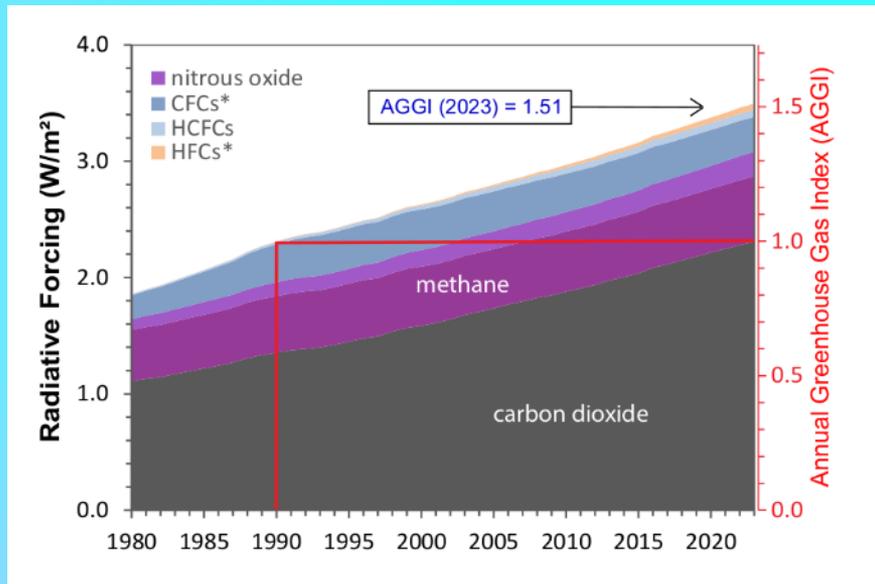
Годовой индекс парниковых газов (AGGI) -

показатель влияния долгоживущих парниковых газов в атмосфере на потепление климата. Рассчитывается как отношение общего **эффективного радиационного воздействия (ERF)** этих газов в данном году, к его общему воздействию в 1990 году.

| № | Основные парниковые газы | Вклад в ERF |
|---|---|-------------|
| 1 | Диоксид углерода, CO₂ | 66 % |
| 2 | Метан, CH₄ | 15 % |
| 3 | Закись азота, N₂O | 6 % |
| 4 | Фреоны и SF₆ | 13 % |

Потенциал глобального потепления GWP в зависимости от периода времени

| Species | Lifetime (Years) | GWP-20 | GWP-100 | GWP-500 |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| CO₂ | Multiple | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| CH₄ | 11.8 ± 1.8 | 79.7 ± 25.8 | 27.0 ± 11 | 7.2 ± 3.8 |
| N₂O | 109 ± 10 | 273 ± 118 | 273 ± 130 | 130 ± 64 |
| CFC-11 | 52.0 ± 10.4 | 8321 ± 2419 | 6226 ± 2297 | 2093 ± 865 |



Показано **радиационное воздействие** основных парниковых газов и значения **AGGI** до 2023 года. AGGI в 2023 году составил **1,51**, что означает, что с 1990 года влияние парниковых газов на потепление увеличилось на **51%**.

С точки зрения **CO₂-эквивалента**, атмосфера в 2023 году содержала **534 ppm**, из которых **419 ppm** – **CO₂**.

Глобальное потепление: *обратные связи*



Преобладающий вклад в **парниковый эффект** (на уровне **среднего** баланса энергии в атмосфере Земли) вносит **водяной пар**. Но это **зависимая** величина (как и озон). Из **независимых парниковых** газов наибольший вклад дает **CO₂**. Но в общих выбросах **CO₂** доля **антропогенной** эмиссии менее **5%** - остальное вносит **природа**. То есть, кажется, что антропогенный вклад в потепление **ничтожно мал!** Однако, в соответствии с соотношением **Клапейрона–Клаузиуса** есть очень сильная (экспоненциальная) зависимость **влажности** от температуры T : $\propto T \exp(-1/T)$, что дает сильную **обратную** связь. Рост температуры на **1°C** приводит к увеличению влажности на **7%**.

Природных выбросов **CO₂** много, но в среднем это **константа**.

Антропогенных выбросов **CO₂** мало, но это **переменная** (растущая) величина.

Малый рост **антропогенных** выбросов **CO₂** (природные выбросы константа) за счет парникового эффекта дает **малый рост температуры** атмосферы. Но этого достаточно, чтобы заметно увеличить **влажность**. А поскольку **вода** - очень сильный парниковый газ, то получается еще более **заметный рост температуры**. Таким образом, за счет обратной связи малый рост **антропогенных** выбросов **CO₂** приводит к существенному росту температуры.

То есть, **антропогенные выбросы** играют роль **спускового крючка!**

Отметим, что есть и другие обратные связи (например, явление **фертилизации**), поэтому нужно рассматривать одновременно **все** элементы **Земной системы**. Иное приводит к грубым ошибкам и непониманию **механизмов изменения климата**.

Глобальное потепление

Обратная связь между климатом и углеродным циклом

Два типа взаимодействия:

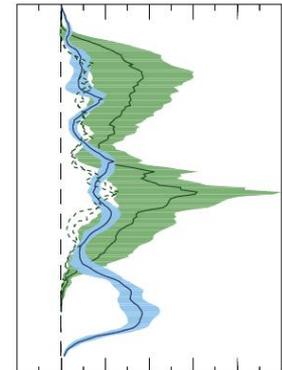
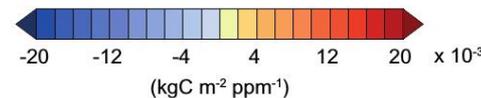
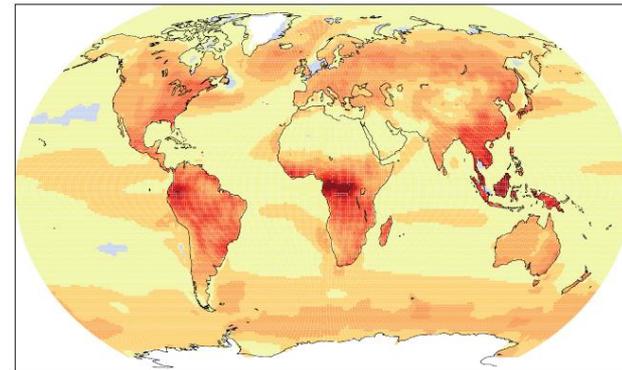
- (1) **прямое** воздействие изменения концентрации CO_2 в атмосфере на углеродный цикл (эффект **фертилизации** растений углекислым газом атмосферы);
- (2) **косвенное** воздействие изменения $[\text{CO}_2]_a$ на углеродный цикл (через **парниковый эффект**).

В **линейном** приближении поток CO_2 из атмосферы на сушу и в океан q_{CO_2} можно представить в виде (*Friedlingstein et al., 2003*):

$$q_{\text{CO}_2} = \beta \Delta[\text{CO}_2]_a + \gamma \Delta T_g$$

В проекте **C4 MIP** (Coupled Climate-Carbon Cycle Models Intercomparison Project) было проведено сравнение характеристик **обратной связи** между климатом и углеродным циклом. Показано, что β **положительны**, а γ , в основном, **отрицательны**. Противоположные относительно друг друга знаки γ и β способствуют устойчивости глобальной земной системы при внешних эмиссиях углекислого газа в атмосферу. Показано также, что обратная связь между климатом и углеродным циклом определяется, главным образом, **наземными** экосистемами.

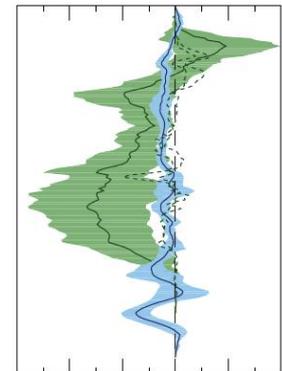
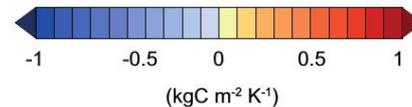
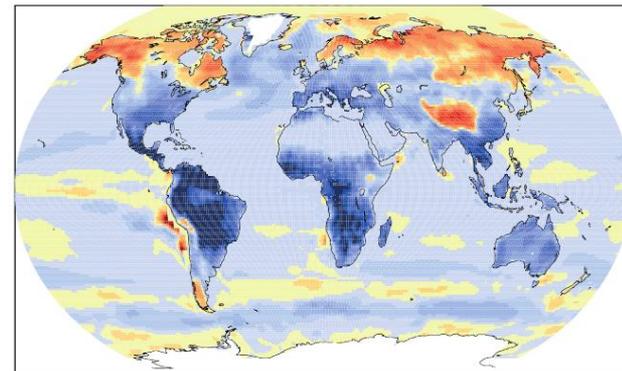
a. Regional carbon-concentration feedback β



0 0.10 0.20
($10^6 \text{ kgC m}^{-2} \text{ ppm}^{-1}$)

Land
Ocean

b. Regional carbon-climate feedback γ



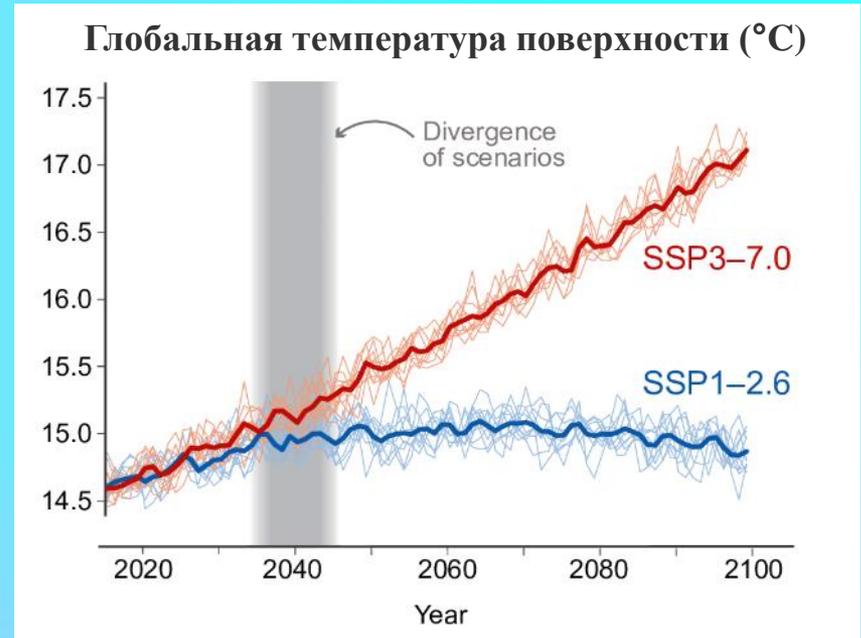
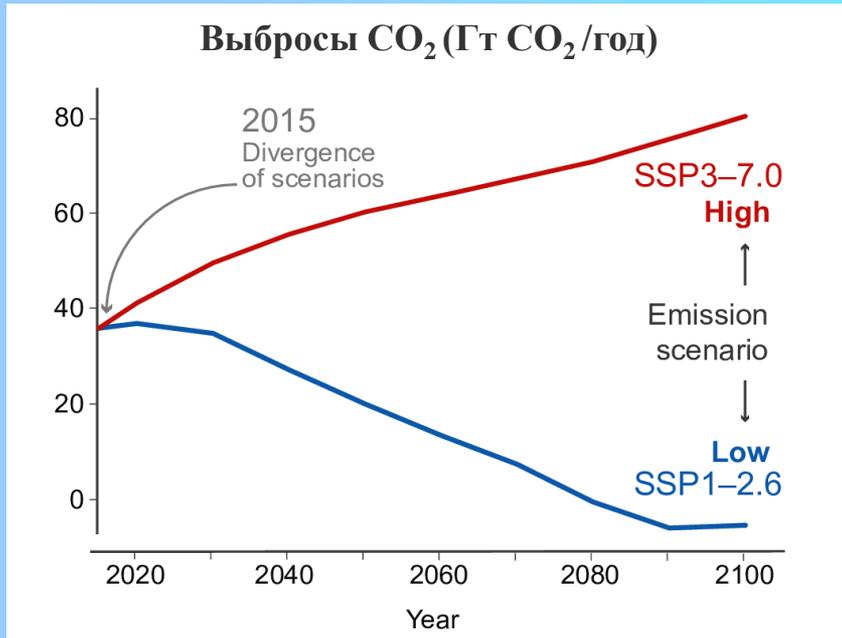
-10 0 10
($10^6 \text{ kgC m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

Пространственное распределение средних по ансамблю моделей значений β и γ в численном эксперименте с увеличением $[\text{CO}_2]_a$ на 1%/год.



Глобальное потепление

Демонстрация влияния сокращения эмиссии CO₂



2 сценария выбросов CO₂ и их влияния на глобальную температуру поверхности Земли: сценарий с низким уровнем выбросов (**SSP1-2.6, синий**) и сценарий с высоким уровнем выбросов (**SSP3-7.0, красный**).

Различия для 2 сценариев начинает проявляться через **20 – 30 лет** для **температуры** Земли.

Если произойдет крупное извержение **вулкана** (что ожидается в ближайшие 100 лет), то возникнут сильные возмущения хода **температуры**, что еще более затруднит анализ климатических изменений.



Глобальное потепление

Разрушение озонового слоя Земли

- Обнаружено **разрушение озонового слоя** Земли, вплоть до образования **озоновых дыр** в Антарктиде в **1980 г.**, которое объясняется **антропогенными выбросами озоноразрушающих веществ** (фреонов и др.).
- Подписан **Монреальский протокол (1987)**, ограничивающий применение озоноразрушающих веществ.
- Как **озоноразрушающие**, так и альтернативные **озонобезопасные** вещества обладают сильным **парниковым эффектом**. Поэтому была принята **поправка Кигали (2016)**, которая ограничивает применение таких веществ в **энергетике** и экономике уже ради защиты **климата**.
- Обнаружен обратный эффект - **парниковые газы** сильно влияют на разрушение **озонового** слоя.

Схема разрушения озонового слоя газами-галогенами

1. **ЭМИССИЯ**. Газы-источники **галогенов (фреоны)** выносятся на поверхность Земли в результате деятельности **человека** и **природных** процессов.

2. **АККУМУЛЯЦИЯ**. Газы-источники **галогенов** накапливаются в **тропосфере** и почти не изменяясь.

3. **ПЕРЕНОС**. Газы-источники **галогенов** переносятся в **стратосферу** воздушными движениями.

4. **ПРЕВРАЩЕНИЯ**. Большинство газов-источников **галогенов** преобразуются в **стратосфере** в **химически активные галогеновые газы** (типа **ClO**) в результате химических реакций с участием **ультрафиолета**.

5. **ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ**. **Химически активные галогенные газы** вызывают химическое истощение стратосферного **озона** по всему земному шару (только реакции с участием **хлора** и **брома** разрушают озон, причем, они **каталитические!**). Низкотемпературные поверхностные реакции в **полярных стратосферных облаках (PSC)** значительно увеличивают количество **химически активных галогенных газов** и тем самым вызывают серьезную потерю **озона** в полярных регионах в конце зимы и ранней весной.

6. **УДАЛЕНИЕ**. Воздух, содержащий **химически активные галогеновые газы**, возвращается в **тропосферу**, где газы удаляются **влагой** в облаках и дожде.

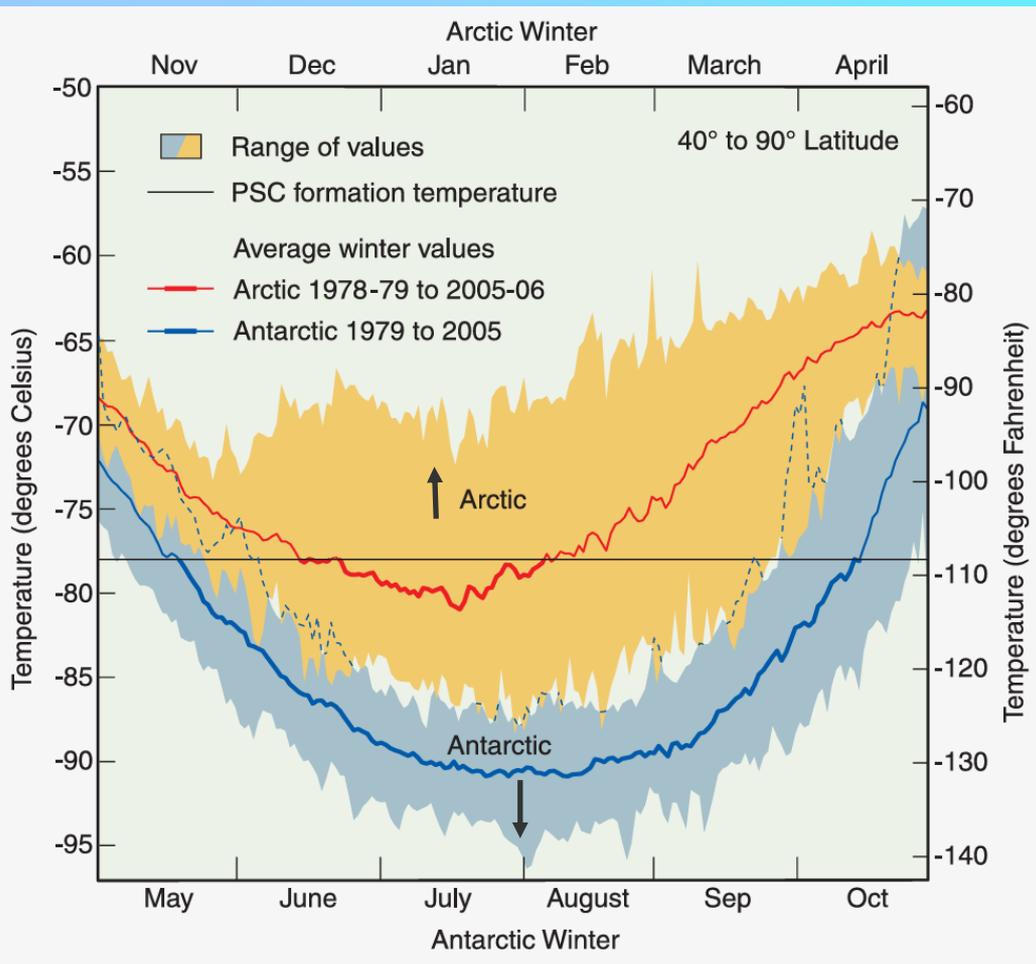


“Озоновая дыра” над Антарктидой

Полярные
стратосферные облака

Почему “озоновая дыра” образуется лишь в Антарктиде?

Минимальные температуры воздуха в полярной стратосфере



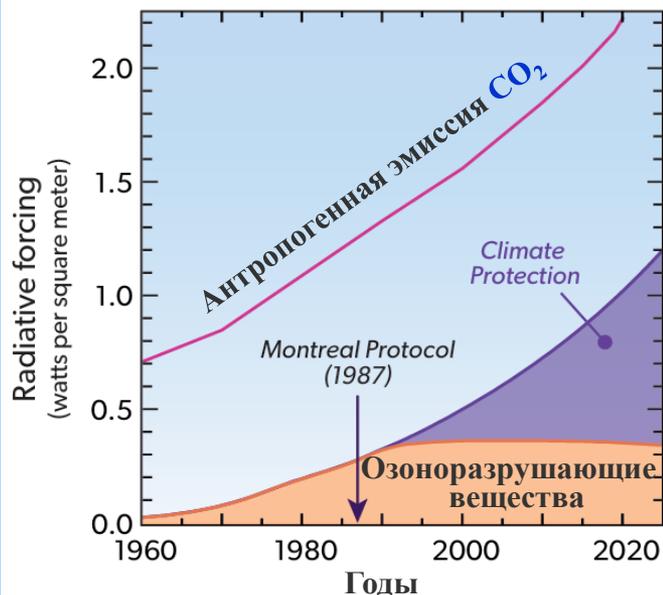
Температура воздуха в обоих полярных регионах достигает **минимальных** значений в нижней **стратосфере** зимой. Большую роль играют **полярные стратосферные облака (PSC)**, которые образуются в **озоновом слое** при температурах ниже порога их образования (около **-78°C**). Это происходит каждый год в течение 1-2 месяцев над Арктикой и около 5 месяцев над Антарктидой. Частицы образуются в результате конденсации **воды**, азотной кислоты (**HNO₃**) и серной кислоты (**H₂SO₄**). **Реакции** с жидкими и твердыми частицами **PSC** приводят к образованию газообразного высокорезакционного монооксида хлора **ClO**, который очень эффективен в процессах разрушения озона. Температуры образования **PSC** всегда присутствуют в течение многих месяцев в **Антарктике**, и серьезное **разрушение озонового слоя** происходит **каждый зимний сезон**.



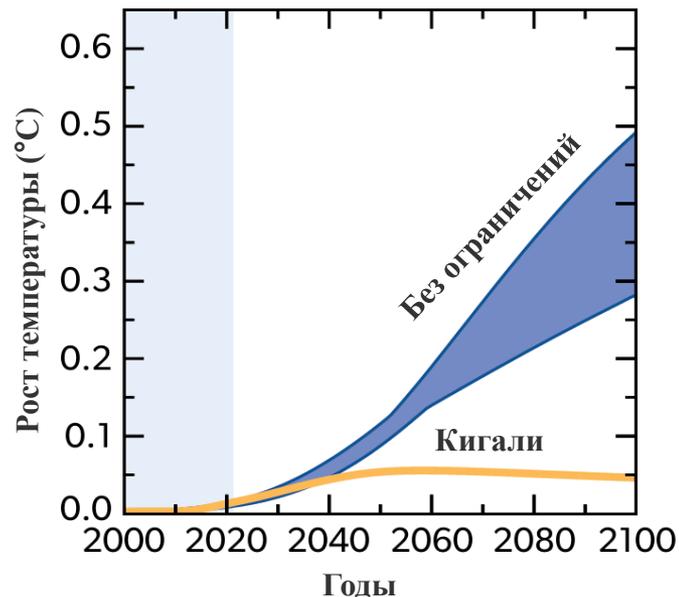
Глобальное потепление

Взаимосвязь озонового слоя с изменением климата

Озоноразрушающие вещества



Озонобезопасные вещества



Разрушение **озонового** слоя и глобальное изменение **климата взаимосвязаны**, так как **озоноразрушающие** вещества (ОРВ) и их заменители являются **парниковыми** газами. Вклад галогенов в радиационное воздействие на климат составил **0,36 Вт/м²** (дисбаланс на поверхности Земли равен **+ 2,72 Вт/м²**), что является **четвертым** по величине выбросом.

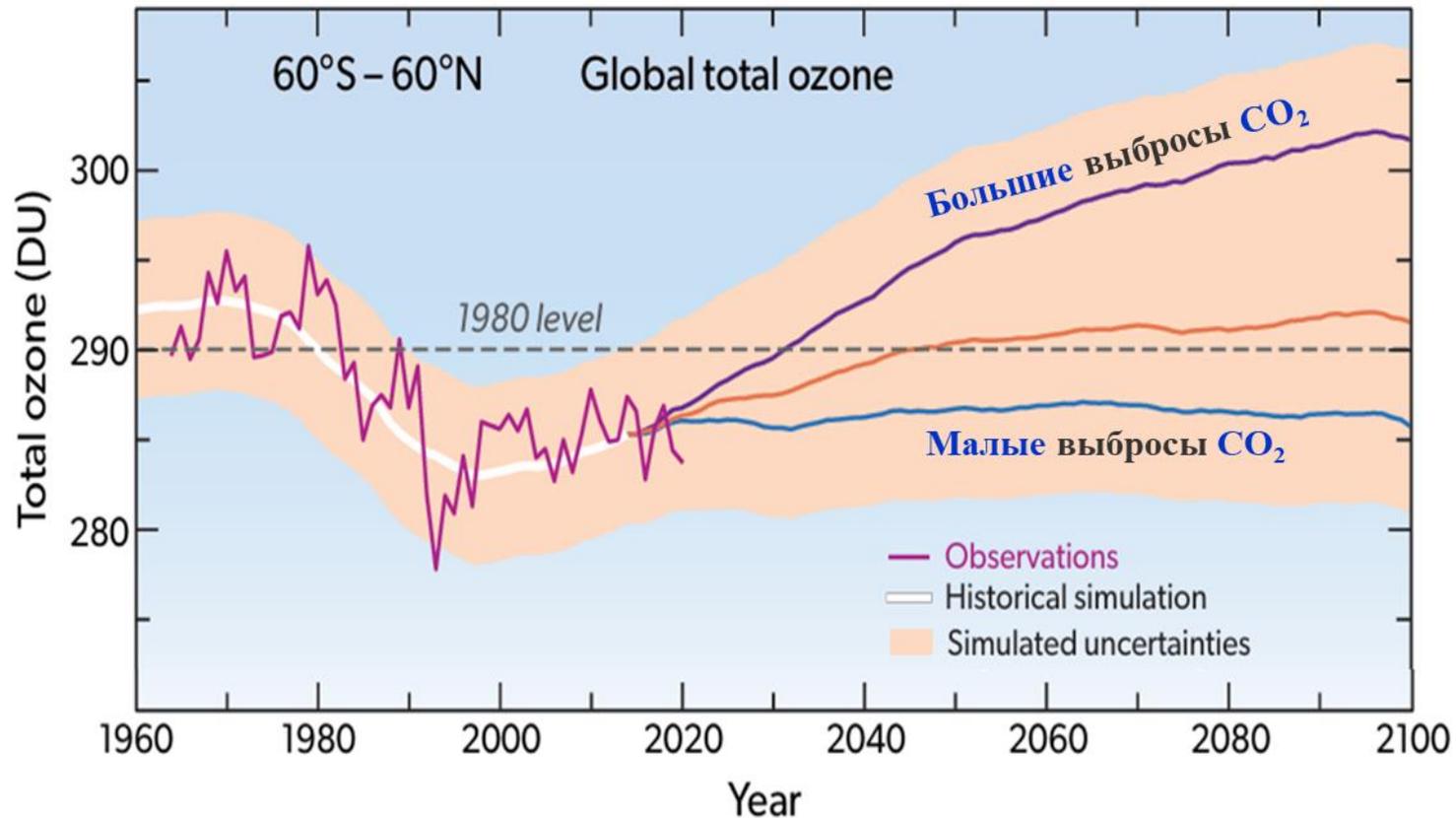
Без Монреаля, воздействие на климат из-за **ОРВ** может быть почти в **2,5 раза больше** нынешнего значения. **Озон** также является **парниковым** газом, поэтому истощение стратосферного озона приводит к **охлаждению** поверхности Земли. И наоборот, увеличение содержания тропосферного озона и других парниковых газов приводит к потеплению поверхности.

Поправка **Кигали (с 2016 г.)** к Монреальскому протоколу означает принятие правил исключительно для защиты **климата**, что позволит избежать глобального потепления на **0,2 - 0,4°C** в течение этого столетия.



Глобальное потепление

Озоновый слой: прогнозы



Существенное **восстановление** озонового слоя от воздействия озоноразрушающих веществ ожидается к **середине 21 века**. На озон большое влияние оказывает **изменение климата**. Содержание озона сильно зависит от будущих выбросов углекислого газа (CO₂), метана (CH₄) и закиси азота (N₂O) – по разному на разных широтах.

Проблема в принятии решений:

Много выбросов CO₂ – общий озон быстро восстановится (в 2030 г.).

Мало выбросов CO₂ – общий озон вообще **не** восстановится к 2100 г.!



Экстремальные климатические явления

Экстремальное явление: погодное или климатическое явление, которое редко встречается в определённом месте (а иногда и в определённое время года), например, *аномальная жара, аномальный холод, проливные дожди, периоды засухи и наводнений, сильные штормы, смерчи и др.*

Антропогенное изменение климата уже влияет на многие **метеорологические и климатические экстремальные события** во всех регионах земного шара.

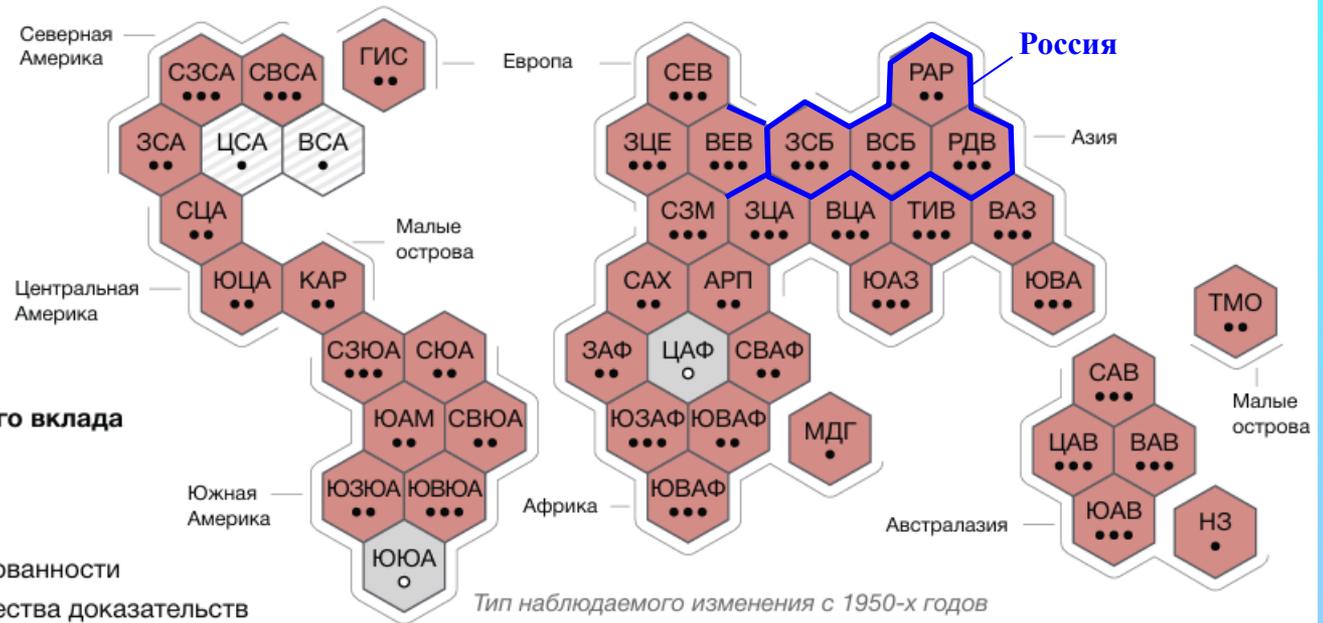
Экстремально высокие температуры и вклад человека

Тип наблюдаемого изменения экстремально высоких температур

- Увеличение (41)
- Уменьшение (0)
- Низкая степень согласованности в типе изменения (2)
- Ограниченные данные и/или литература (2)

Степень достоверности антропогенного вклада в наблюдаемое изменение

- Высокая
- Средняя
- Низкая из-за ограниченной согласованности
- Низкая из-за ограниченного количества доказательств



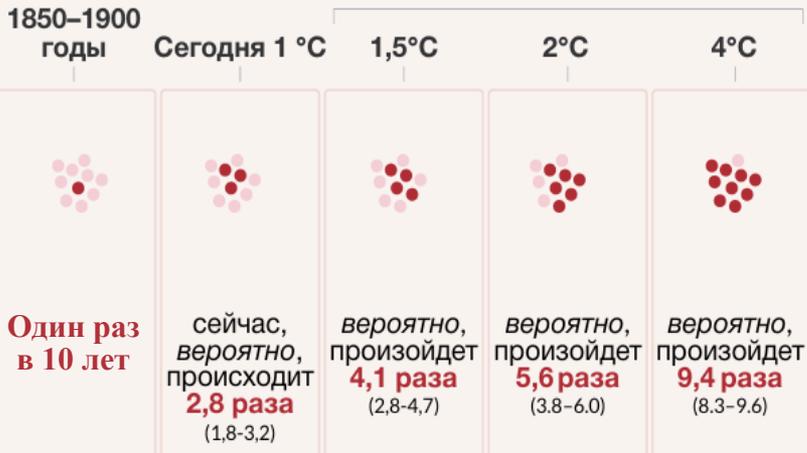
Практически достоверно, что явления **экстремальной жары** стали более **частыми** и более интенсивными в большинстве регионов суши с 1950-х годов, в то время как явления **экстремального холода** (включая волны холода) стали **менее частыми** и менее суровыми. Регионы **России**: РАР (Российская Арктика), ЗСБ (Западная Сибирь), ВСБ (Восточная Сибирь), РДВ (Российский Дальний Восток). *Climate Change 2021*



Экстремальные климатические явления

Мир

Частота экстремально высоких температур



Показан резкий **рост частоты** экстремально высоких **температур** над сушей в мире. Аналогичные выводы для **других явлений**. Так, частота и интенсивность **сильных осадков** увеличилась с 1950-х годов на большей части территории суши (высокая степень достоверности), и вероятно, что основным движущим фактором является антропогенное изменение климата.

Climate Change 2021

Россия

Количество опасных явлений по сезонам



Межгодовые изменения количества опасных метеорологических явлений в **России** в разные сезоны по данным Росгидромета. Видно, что **летом** опасных явлений намного **больше** в сравнении с другими сезонами.

*Мохов // ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА:
причины, риски, последствия, проблемы
адаптации и регулирования, 2024*

Причины экстремальных климатических явлений

Атрибуция

Недавно появилось понятие «**Атрибуция (Attribution)**», что означает процесс оценки относительного вклада нескольких **причинно-следственных факторов** в изменение или событие с присвоением статистической достоверности. Первая попытка **атрибутировать** экстремальное **погодное явление** как результат изменения климата была опубликована в **2004** году. **Экстремальные** погодные условия – один из способов, с помощью которых люди ощущают **изменение климата**.

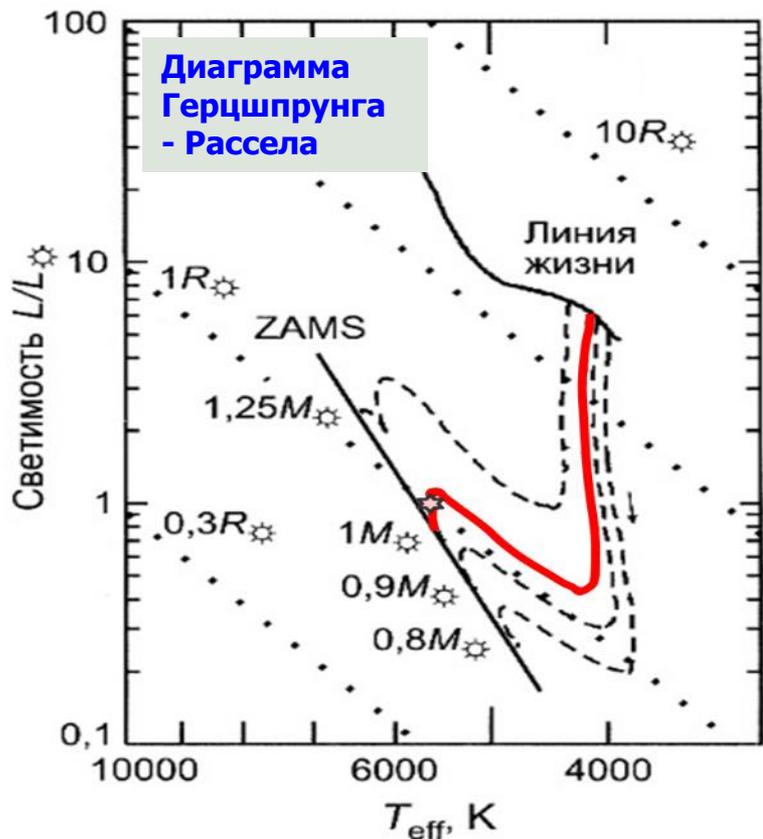
Большая часть методов атрибуции основана на **сравнении** состояния Земной системы, оцененного с использованием численных моделей при учете тех или иных физических воздействий, с так называемым «**контрфактическим**» климатом – климатом без учета таких воздействий.

Интуитивно ясно: чем выше **температура**, тем больше вклад **конвективных движений**, а значит и **уровень возмущений**.



Схема этапов разработки оценки атрибуции

Эволюция Солнца



Эволюция звезд, не дошедших до главной последовательности:

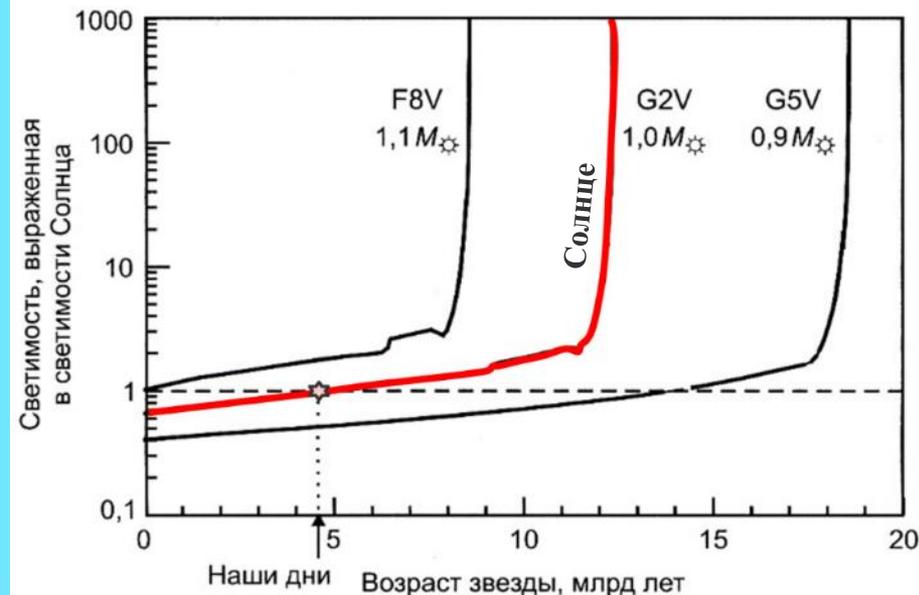
Линия жизни – формирование протозвезды.

Красная линия - выгорание дейтерия.

ZAMS - главная последовательность нулевого возраста, вблизи которой звезда выходит на стабильный режим.

Солнце достигает ZAMS за 38 млн лет.

Поведение звезд на главной последовательности



Значительную часть своей жизни звезды находятся в окрестности главной последовательности, плавно меняя свои параметры. Для Солнца этот период составляет около 11 млрд лет. Сейчас температура в ядре 15,7 млн К, поверхности - 5 780 К.

По мере выгорания водорода Солнце становится всё горячее, а его светимость медленно растет (1% за 100 млн лет). 4,7 млрд лет назад светимость Солнца составляла 0,65 от нынешней.

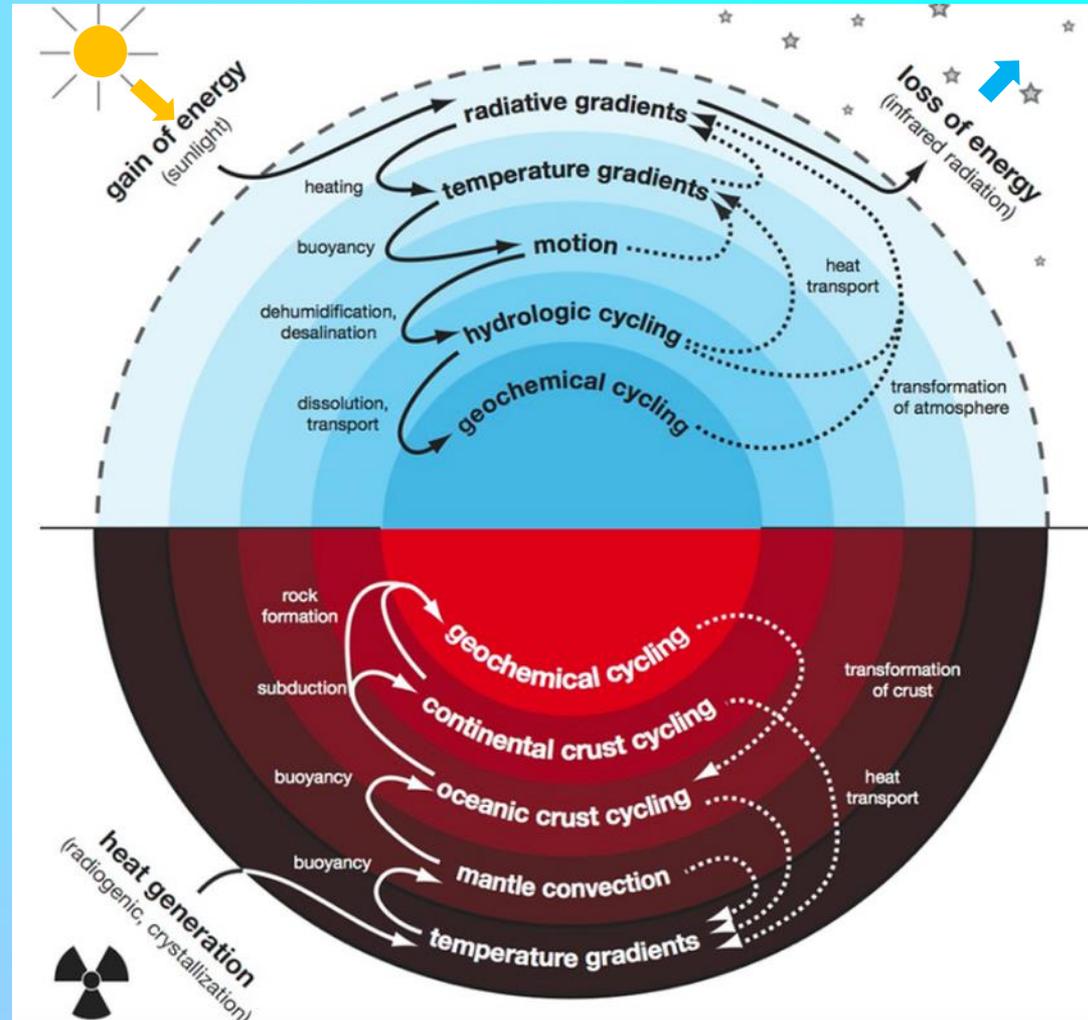
К возрасту 12,2 млрд лет Солнце покинет главную последовательность и станет красным гигантом.

На конечной стадии сформируется белый карлик, который со временем будет угасать.



Динамика климатической системы Земли

Климатическая система является вынужденной (forced), диссипативной, хаотичной системой, которая далека от равновесия, и ее сложная естественная изменчивость возникает в результате взаимодействия положительных и отрицательных **обратных связей**, неустойчивостей и механизмов насыщения. Последние успехи в применении **динамической теории систем**, с одной стороны, и **неравновесной статистической физики**, с другой, помогают понять и предсказать **поведение** таких систем.



Схема, изображающая воздействия, диссипативные процессы и процессы перемешивания, градиенты температуры и химических веществ, а также механизмы взаимодействия в системе Земли

*Ghil, Lucarini // Rev. Mod. Phys., 2020
В обзоре более 500 ссылок,
но ни одной работы из России
(кроме Будыко, 1969)!*



Динамика климатической системы: (0-D) модели

Первая ступень иерархии моделирования для атмосферы образована **нульмерными (0-D) моделями**. Цель - проследить **эволюцию** глобально усредненной **температуры** воздуха T у поверхности в результате изменений глобального **радиационного баланса**:

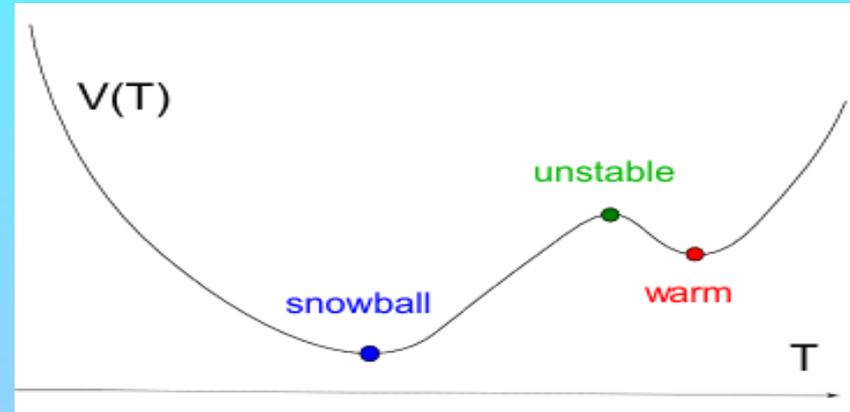
$$c dT/dt = R_i - R_o$$

$$R_i = \mu Q_0(1 - \alpha(T)), \quad R_o = \sigma m(T)T^4$$

Здесь R_i и R_o – это входящая солнечная радиация и уходящая земная радиация. Теплоемкость c – это теплоемкость глобальной атмосферы, а также или его части мирового океана. Q_0 – солнечное излучение, получаемое в верхних слоях атмосферы, σ является постоянной Стефана-Больцмана и μ представляет собой параметр инсоляции, равный единице для современных условий. Планетарное отражение (**альbedo**) α и фактор серости m выражены как функции T ; $m = 1$ для абсолютно черного тела и $0 < m < 1$ для серого тела, такого как планета Земля. Среднее альbedo Земли **33%** (океан - 4%, **лед** – 70%).

Производная по времени температуры T в уравнении баланса может быть записана как минус производная от потенциала $V(T)$:

$V(T) = - \int \{R_i(T) - R_o(T)\} dT$,
причем $dT/dt = dV(T)/dT$. Для типичных климатических условий Земли зависимость $V(T)$ демонстрирует наличие **бистабильности**: два локальных минимума V соответствуют **стабильным** решениям, локальный максимум V соответствует **нестабильному** решению.



Скалярный двухямочный потенциал $V(T)$

Теплое состояние (**warm**) и состояние **снежного кома** (**snowball**) соответствуют двум устойчивым точкам системы, разделенным неустойчивой (**unstable**). Одна из этих точек соответствует **нынешнему климату** с максимальной T - **warm**.



Динамика климатической системы: (1-D) модели

Существует два вида одномерных (1-D) атмосферных моделей, для которых единственной пространственной переменной является **широта** или **долгота** соответственно. Они представляют собой так называемые модели **энергетического баланса** (ЕВМ), которые обобщают предыдущие модели для эволюции приземной температуры воздуха, скажем, в виде $T = T(x, t)$:

$$c(x)\partial T(x, t)/\partial t = R_i - R_o + D$$

Член D описывает **горизонтальный** теплоперенос.

Обычно он содержит первую и вторую частные производные T по отношению к x , в то время как $c(x)$ представляет пространственно-зависимую теплоемкость системы.

Таким образом, уравнение (14) физически соответствует **нелинейному уравнению теплопроводности**, а математически - **нелинейному параболическому уравнению в частных производных**.

Следовательно, скорость изменения локальной температуры T по отношению ко времени также становится частной производной, $\partial T(x, t)/\partial t$.

Две такие модели (для **стационарных** условий) были представлены независимо друг от друга: *Будыко* (1969) в тогдашнем Советском Союзе и *Sellers* (1969) в США.

Budyko M.I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth // Tellus, 1969

Sellers W.D. A Global Climatic Model Based on the Energy Balance of the Earth-Atmosphere System // J. Appl. Meteor., 1969

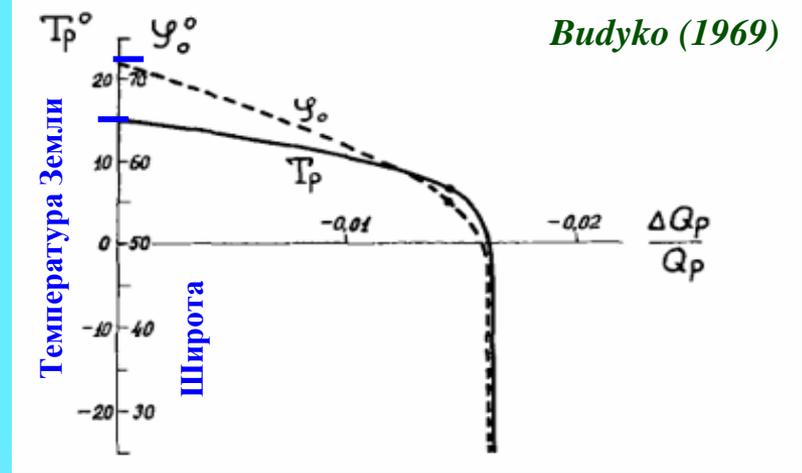
Динамика климатической системы: (1-D) модели

Будыко (1969) развил **аналитическую** модель. Установлено, что сравнительно небольших вариаций **прозрачности атмосферы** может быть достаточно для развития **оледенений**. А **прозрачность** может изменяться за счет наличия **аэрозолей**. Резкие выбросы аэрозоля в природе – следствие взрывных извержений **вулканов** или падения метеоритов. **Антропогенный** вклад – промышленные выбросы или **ядерные взрывы**. К 1985 г. накоплено **50 000 ед.** ядерных зарядов на 12 000 Мт. Сейчас – **12 000 ед.**

После публикации моделей **Будыко (1969)** и **Sellers (1969)** стало очевидно, что массивные ядерные взрывы могут вызвать **ядерную зиму**: а именно, уменьшение поступающей солнечной радиации за счет резкого увеличения содержания твердых частиц в атмосфере потенциально может спровоцировать еще большую катастрофу для жизни на Земле, чем сама ядерная война. Исследования в этом направлении сыграли важную роль в **сокращении размеров ядерных арсеналов** в конце холодной войны.

Budyko // Tellus, 1969

Будыко, Голицын, Израэль // Глобальные климатические катастрофы, 1986.



Зависимость **температуры Земли** и границы **ледяного покрова** от вариаций **радиации**.

При снижении радиации на **1,6%** ледяной покров достигает средней широты около **50°**, после чего в результате саморазвития начинает смещаться в сторону более низких широт вплоть до экватора. При этом планетарная **температура резко падает** и достигает значения в несколько десятков градусов ниже нуля (состояние **snowball earth** в современной терминологии). Такие изменения излучения лишь в несколько раз превышают его вариации, наблюдавшиеся ранее в связи с **вулканической активностью**.



Динамика климатической системы: (1-D) модели

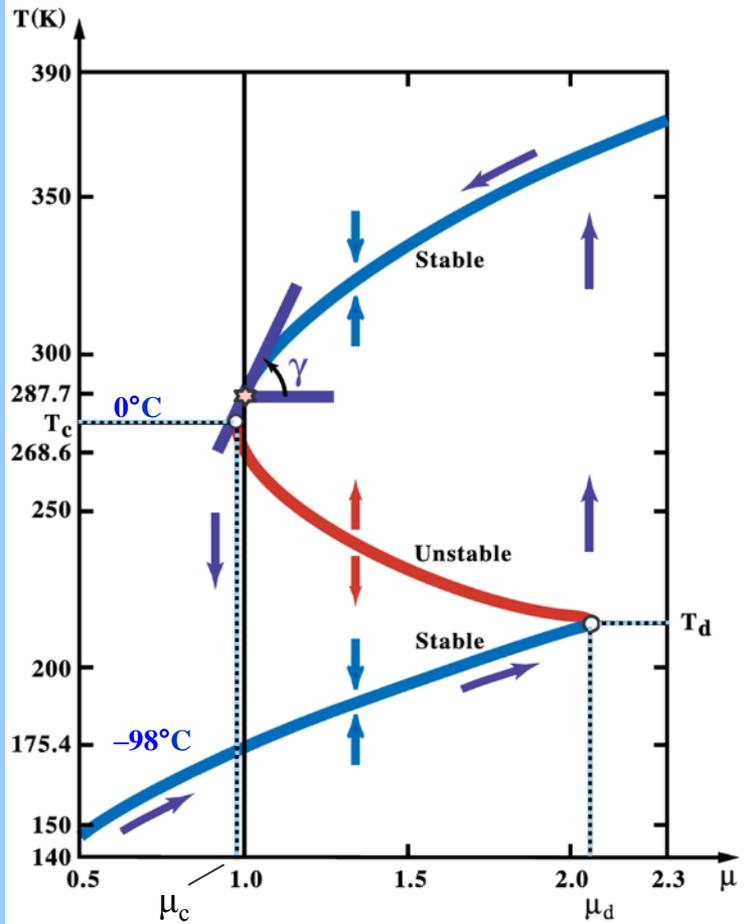


Диаграмма бифуркации 1-D ЕВМ
уравнения: $c(x)\partial T/\partial t = R_1 - R_0 + D$

★ - нынешнее состояние

*Ghil, Childress // Topics in
Geophysical Fluid Dynamics, 1987*

Бифуркационная диаграмма для решений модели энергетического баланса (ЕВМ) показывает зависимость глобальной средней температуры T от изменения инсоляции μ в верхних слоях атмосферы. Стрелки, указывающие вверх и вниз, показывают устойчивость ветвей. Другие стрелки демонстрируют цикл **гистерезиса**. Угол дает меру **чувствительности** климата к изменениям инсоляции.

S-образная кривая возникает из двух **back-to-back saddle-node bifurcations (седлоузловая бифуркация)**. Тот факт, что верхняя левая точка бифуркации (**c**) на рисунке так близка к **современным значениям инсоляции**, ($\mu_c = 0,9815$) вызвал большую **обеспокоенность** в сообществе специалистов по динамике климата в середине 1970-х годов, когда были получены данные результаты. Это означает, что современный тепловой режим и оледенение Земли характеризуются **высокой неустойчивостью**. По данным Будыко, изменения радиации всего на **1,0 - 1,5%** достаточны для формирования ледяного покрова вплоть до умеренных широт. А такие изменения излучения лишь в несколько раз превышают его вариации, наблюдавшиеся в связи с **вулканической активностью** в прошлом столетии.

Более детальные расчеты показали, что состояние **snow-ball** реализуется при снижении значений инсоляции на **2 - 5%**. Большое расстояние от современных значений инсоляции до нижней правой точки бифуркации (**d**) означает, что для того, чтобы климат Земли вернулся к комфортным температурам, потребовалось бы **удвоить (!)** инсоляцию.



Tipping points - «переломные моменты»

Общество может быть убаюкано **ложным чувством безопасности** плавными изменениями **климата**. Однако возможны так называемые **переломные моменты**, кардинально меняющие состояние климатической системы Земли, вплоть до **климатических катастроф**.

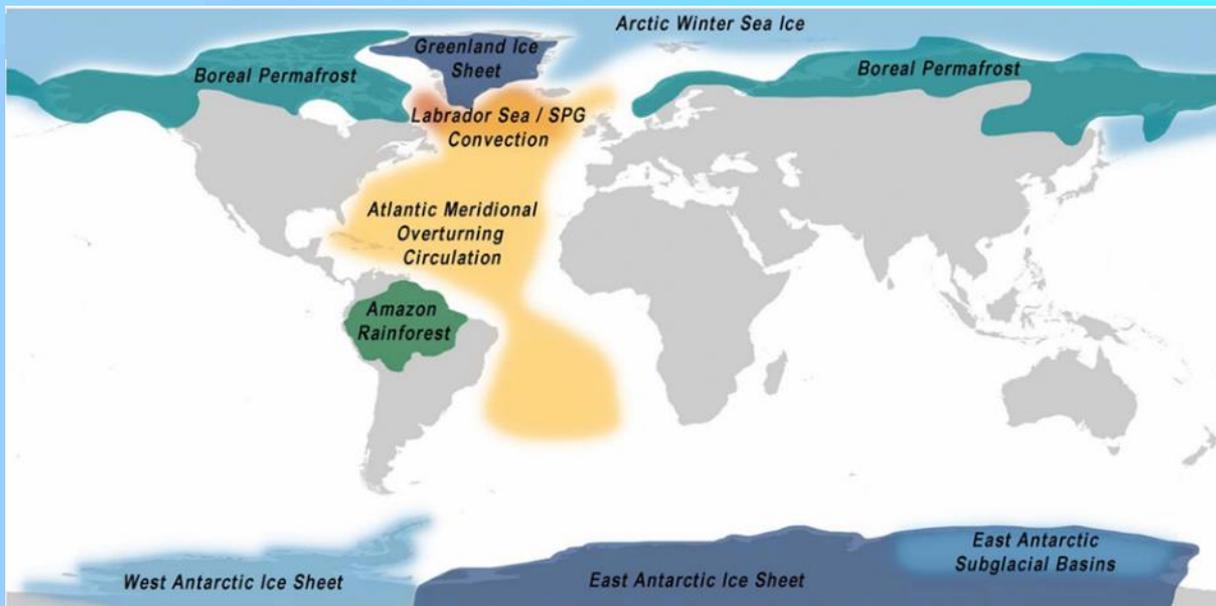
Термин «**переломный момент**» относится к **критическому порогу**, при котором крошечное возмущение может качественно изменить состояние или развитие климатической системы. Как правило, переломные моменты приводят к **необратимым** явлениям и **катастрофическим** последствиям в изменении климата, с чем и связано такое название. Понятие «переломный момент» позаимствовано из **социальных наук**.

Ранее рассмотрены переходы в **бистабильной** системе между стабильными состояниями **warm** и **snowball**, которые происходят в переломные моменты, обусловленные разными причинами, включая **антропогенный** фактор.

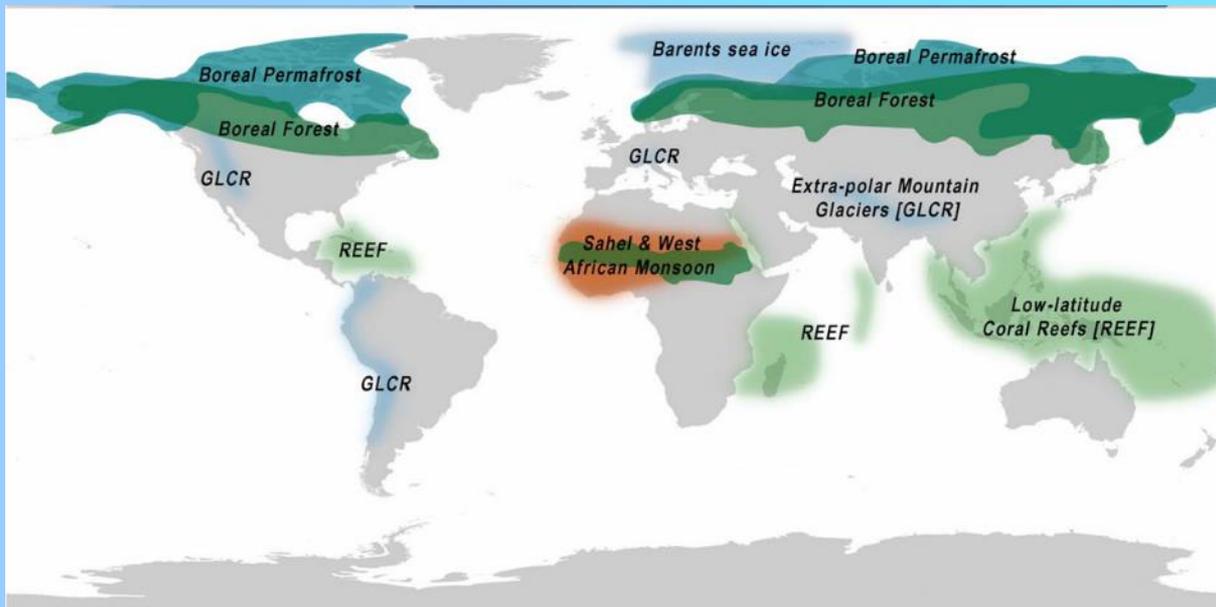
Переломные моменты часто, но не обязательно, бывают **резкими**. Например, при среднем глобальном потеплении где-то между **0,8°C** и **3°C** ледяной щит **Гренландии** проходит переломный момент, но его таяние будет происходить в течение **тысячелетий**. Переломные моменты возможны при сегодняшнем глобальном потеплении чуть более чем на **1°C** по сравнению с доиндустриальными временами и весьма вероятно выше **2°C** глобального потепления. Возможно, что некоторые переломные моменты близки к пересечению или уже были пройдены, например, ледяные щиты Западной Антарктики и Гренландии, тропические леса Амазонки и тепловодные коралловые рифы.

Далее приводится современный **перечень переломных моментов (элементов опрокидывания)** в климатических процессах и их **классификация** с математической точки зрения. Обсуждается возможность создания системы **раннего предупреждения** для обнаружения близости некоторых переломных точек. На сегодня насчитывается **16 переломных моментов**.

Переломные моменты в климатической системе Земли



Глобальные элементы
опрокидывания – всего **9**
(Core tipping elements)



Региональные элементы
опрокидывания – всего **7**
(Regional tipping elements)

*Armstrong McKay et al //
Science, 2022*

Глобальные основные опрокидывающие элементы

Глобальные элементы опрокидывания (Core tipping elements of the Earth System) – 9 ед.

| Климатический переломный элемент | Пороговое значение (°С) | | | Временная шкала (годы) | | |
|---|--------------------------|------|-------|------------------------|--------|--------|
| | Оценка | Мин. | Макс. | Оценка | Мин. | Макс. |
| Ледяной щит Гренландии (<i>разрушение</i>) | 1,5 | 0.8 | 3.0 | 10 000 | 1 000 | 15 000 |
| Ледяной щит Западной Антарктики (<i>разрушение</i>) | 1,5 | 1.0 | 3.0 | 2 000 | 500 | 13 000 |
| Лабрадор-Ирмингерские моря/конвекция SPG (<i>коллапс</i>) | 1,8 | 1.1 | 3.8 | 10 | 5 | 50 |
| Восточно-Антарктические подледные бассейны (<i>коллапс</i>) | 3,0 | 2.0 | 6.0 | 2 000 | 500 | 10 000 |
| Арктический зимний морской лед (<i>коллапс</i>) | 6,3 | 4.5 | 8.7 | 20 | 10 | 100 |
| Ледяной щит Восточной Антарктики (<i>разрушение</i>) | 7.5 | 5.0 | 10.0 | ? | 10 000 | ? |
| Тропические леса Амазонки (<i>вымирание</i>) | 3,5 | 2.0 | 6.0 | 100 | 50 | 200 |
| Бореальная вечная мерзлота (<i>обвал</i>) Россия | 4,0 | 3.0 | 6.0 | 50 | 10 | 300 |
| Атлантическая меридиональная опрокидывающая циркуляция (<i>коллапс</i>) Гольфстрим | 4,0 | 1.4 | 8.0 | 50 | 15 | 300 |

Региональные опрокидывающие элементы

Региональные элементы, влияющие на изменение климата (regional tipping elements) – 7 ед.

| Климатический переломный элемент | Пороговое значение (°C) | | | Временная шкала (годы) | | |
|---|-------------------------|------|-------|------------------------|------|-------|
| | Оценка | Мин. | Макс. | Оценка | Мин. | Макс. |
| Коралловые рифы низких широт (<i>вымирание</i>) | 1,5 | 1.0 | 2.0 | 10 | ~ | ~ |
| Бореальная вечная мерзлота (<i>резкое таяние</i>) Сев. Америка | 1,5 | 1.0 | 2.3 | 200 | 100 | 300 |
| Лед Баренцева моря (<i>резкое выпадение</i>) | 1,6 | 1.5 | 1.7 | 25 | ? | ? |
| Горные ледники (<i>потеря</i>) | 2,0 | 1.5 | 3.0 | 200 | 50 | 1,000 |
| Сахель и З. Африканский муссон (<i>озеленение</i>) | 2,8 | 2.0 | 3.5 | 50 | 10 | 500 |
| Бореальные леса (<i>вымирание на юге</i>) Россия | 4,0 | 1.4 | 5.0 | 100 | 50 | ? |
| Бореальные леса (<i>расширение на север</i>) Сев. Америка | 4,0 | 1.5 | 7.2 | 100 | 40 | ? |

Дополнительная **опасность** еще в том, что если переломный момент в одной системе будет преодолен, это может вызвать **каскад** других переломных моментов, что приведет к катастрофическим последствиям. Для анализа взаимодействия переломных моментов могут быть эффективными методы **искусственного интеллекта** (нейронные сети, например).

Существуют и другие **возможные элементы опрокидывания**, но они либо не имеют порогового поведения, либо показывают только локальное опрокидывание. Среди них – постепенное таяние бореальной вечной **мерзлоты**; потеря летнего морского льда в **Арктике**; растворение **морских гидратов метана**; резкий рост **озоновой дыры** в Арктике; экстремальный **Эль-Ниньо**.

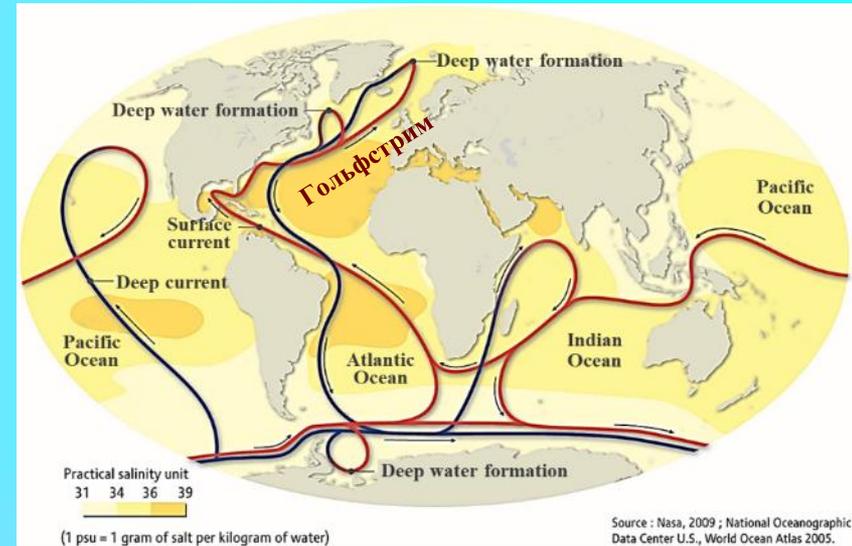


Пример переломного момента: Гольфстрим

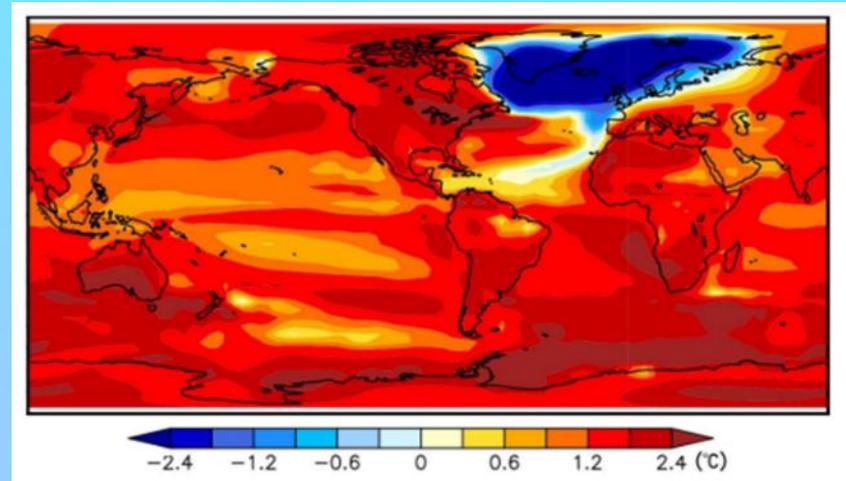
Теория, упрощенные модели и реконструкции резких изменений в прошлом предполагают, что Атлантическая меридиональная опрокидывающая циркуляция (АМОС или Гольфстрим) переживает переломный момент. Температурный порог: $4,0^{\circ}\text{C}$ (мин $1,5^{\circ}\text{C}$, макс 8°C). Если поступление пресной воды от тающих ледников достигнет определенного порога, она может перейти в состояние пониженного стока. Даже после прекращения таяния АМОС может не вернуться в свое текущее состояние. Если АМОС действительно прекратит свою работу, может возникнуть новое стабильное состояние, которое продлится тысячи лет и, возможно, приведёт к другим критическим точкам. Общее снижение температуры: $-0,5^{\circ}\text{C}$ (низкая достоверность), региональное: $-(4 - 10)^{\circ}\text{C}$.

Open Letter by Climate Scientists to the Nordic Council of Ministers Reykjavik, October 2024:

Недавние исследования, проведенные со времени последнего доклада МГЭИК, свидетельствуют о том, что МГЭИК недооценила этот риск и что прохождение этого переломного момента является серьезной возможностью уже в ближайшие несколько десятилетий.



Термохалинная циркуляция



Изменение средней температуры в сценарии удвоения CO₂, при котором АМОС рухнет.



Классификация переломных моментов

Поведение **климатических переломных моментов** можно описать в **математических терминах**.

Выделено **три типа** переломных моментов:

N-Tipping: Noise-induced (шумозависимые)

B-Tipping: Bifurcation-due (бифуркационные)

R-Tipping: Rate-induced (зависящие от скорости)

На диаграмме: (a), (c), (e) - примеры **временных рядов** (цветные линии), проходящих через переломный момент. Черными сплошными линиями обозначены стабильные климатические состояния (например, малое или большое количество осадков), а пунктирными линиями обозначена граница между стабильными состояниями.

(b), (d), (f) - **ландшафты стабильности** обеспечивают интуитивное понимание различных типов переломных моментов. Долины представляют различные климатические состояния, которые может занимать система, с вершинами холмов, разделяющими стабильные состояния.

Стабильность климатического состояния подразумевается как **глубиной долины**, так и расстоянием до **вершины холма**. Текущее состояние системы представлено в виде **шара**.

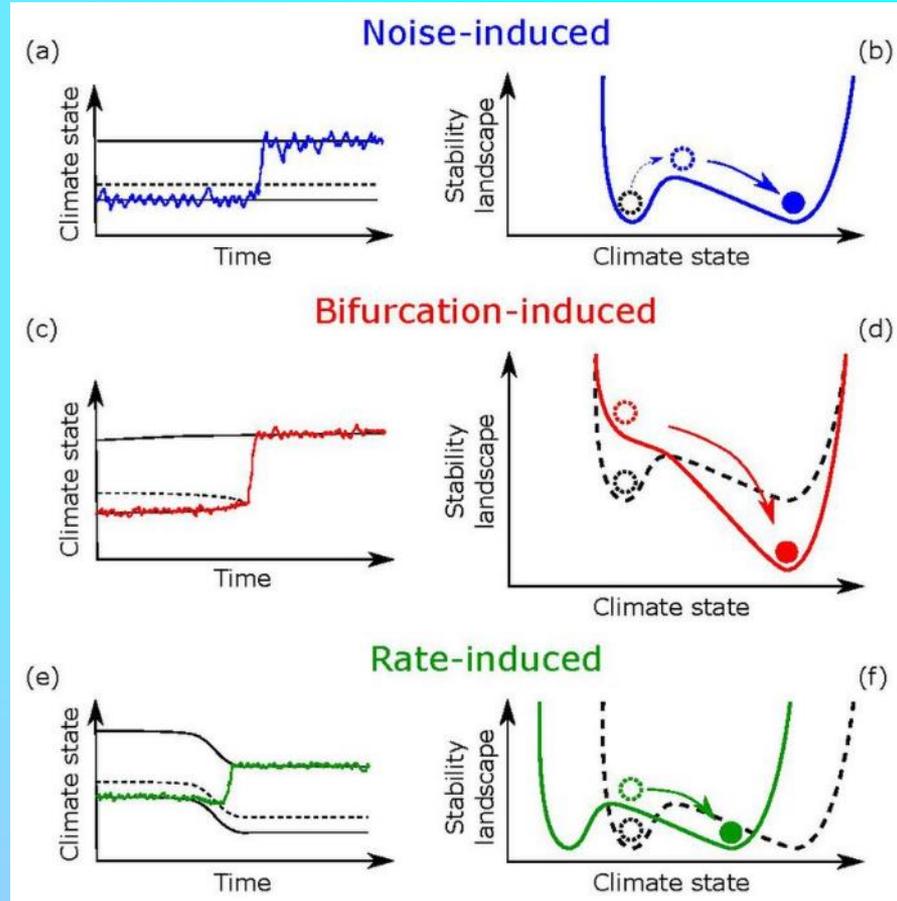


Иллюстрация трех типов переломного момента



N-Tipping: Noise-induced переломный момент

Бистабильность климатической системы Земли: (0-D) модели

В текущей конфигурации Земля находится в **мультистабильном** режиме - могут быть реализованы **два** асимптотических состояния (*Будыко, 1969; Sellers, 1969*). **Теплое** состояние, в котором мы находимся, конкурирует с состоянием **снежного** кома, покрытого льдом. Бистабильность существует благодаря положительной **обратной связи** лед-альbedo. **Стохастически** возмущая параметр, управляющий интенсивностью поступающего **солнечного излучения**, система выполняет переходы между теплым и снежным состоянием (**шум-индуцированные** переходы, соответствующие **N-Tipping**).

$$\begin{aligned} cdT/dt &= R_i - R_o \\ R_i &= \mu Q_0 \{1 - \alpha(T)\} \\ R_o &= \sigma m(T)T^4 \end{aligned} \quad (1)$$

$$V(T) = - \int \{R_i(T) - R_o(T)\} dT, \quad (2)$$

$$dT/dt = dV(T)/dT \quad (3)$$

$$dT(t) = - \{dV(T)/dT\} dt + \varepsilon dW \quad (4)$$

$$\partial p(T, t)/\partial t = \nabla_T \{ \nabla_T V(T)p(T, t) \} + \varepsilon^2 \Delta p(T, t)/2 \quad (5)$$

В простейшем случае (0-D) моделей имеем уравнение энергетического баланса (1). Вводя потенциал (2), уравнение (1) принимает вид (3). Если включить **стохастическое** воздействие в виде аддитивного **гауссова белого шума** в правой части уравнения (3), то мы получим уравнение (4), где **dW** - инкремент броуновского движения, а амплитуда шума $\varepsilon > 0$. К стохастическому дифференциальному уравнению (4) можно присоединить уравнение **Фоккера - Планка**, описывающее эволюцию функции плотности вероятности (**pdf**) $p(T, t)$ ансамбля траекторий, подчиняющихся стохастическому дифференциальному уравнению (5). Наличие случайного воздействия позволяет системе образовывать переходы между окрестностями детерминированных аттракторов, пересекая границы бассейна, которые в невозмущенном случае являются непроницаемыми.



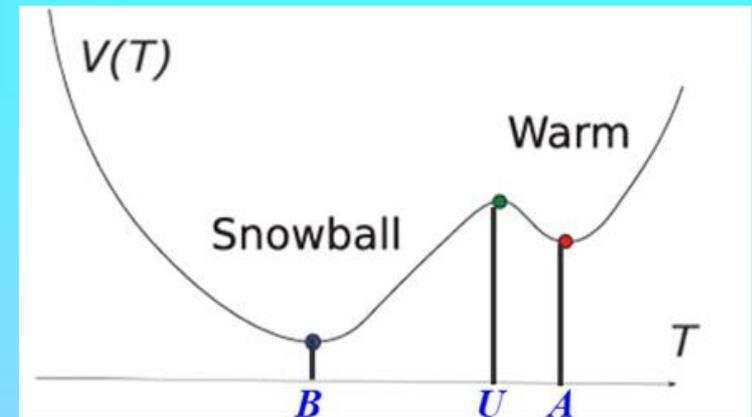
N-Tipping: Noise-induced переломный момент

Бистабильность климатической системы Земли: (0-D) модели

В пределе **слабого шума** стационарное распределение может быть выражено в первом порядке как (6). Локальные минимумы потенциала V (аттракторы с фиксированной точкой в случае детерминированной динамики с $\varepsilon = 0$) соответствуют локальным максимумам p , так что, например, потенциал двойной лунки соответствует **бимодальному pdf**. Используя *теорию больших отклонений*, можно получить, что при ведущем порядке **среднее время выхода для перехода** из бассейна притяжения устойчивого решения A в бассейн притяжения устойчивого решения B через **неустойчивое седло** U записывается как (7).

$$p(T) \propto \exp \{-2V(T)/\varepsilon^2\} \quad (6)$$

$$\tau_{A \rightarrow B} \propto \exp \{2(V(U) - V(A))/\varepsilon^2\} \quad (7)$$



Теория больших отклонений предлагает методы построения так называемых **инстантонов**, которые являются **наиболее вероятными траекториями под действием шума**, ведущими к переходам от одного бассейна притяжения к другому. В пределе слабого шума траектории, начинающиеся вблизи локального минимума V , обычно **долго ждут**, прежде чем перейти в окрестности другого локального минимума V , и переходы, скорее всего, **происходят через седло с наименьшей энергией**, связывающее начальный бассейн притяжения с любым другим бассейном.



N-Tipping: Noise-induced переломный момент

Бистабильность климатической системы Земли: (PUMA-GS)-модель

Более сложная климатическая модель построена путем объединения примитивных уравнений атмосферной модели PUMA с (1-D) моделью энергетического баланса Гила-Селлерса. Рассматриваются атмосфера и океан. Температура поверхности океана $T_S(t, \phi, \lambda)$, где ϕ - широта, а λ - долгота, изменяется следующим образом:

$$c(\phi)\delta T_S/\delta t = \mu(1 + \sigma dW/dt)I(\phi)Q_0(1 - \alpha(\phi, T_S))/4 - R_0(T_S) - D_\phi(T_S) + \chi(T_S, T_A) \quad (8)$$

Здесь, Q_0 - это современное солнечное излучение, теплоемкость c и геометрический фактор I явно зависят от ϕ . Альbedo α зависит от ϕ и T_S . R_0 - это выходящее излучение, которое увеличивается с T_S , D_ϕ - это оператор диффузии, параметризующий меридиональный тепловой транспорт, и χ описывает теплообмен между океаном и атмосферой. Стохастическое возмущение модулирует солнечное излучение через фактор $(1 + \sigma dW/dt)$, где σ контролирует интенсивность шума, и dW - это инкремент процесса Винера. Шум является мультипликативным. При численном интегрировании уравнения (8), в соответствии с dW/dt , на каждом временном шаге Δt (1 ч) вставляется гауссовская случайная величина с среднеквадратичным отклонением σ_0 . Это соответствует относительной флуктуации солнечного излучения $\sigma = \sigma_0/\sqrt{N}$ на временной шкале $\tau = N \cdot \Delta t$.

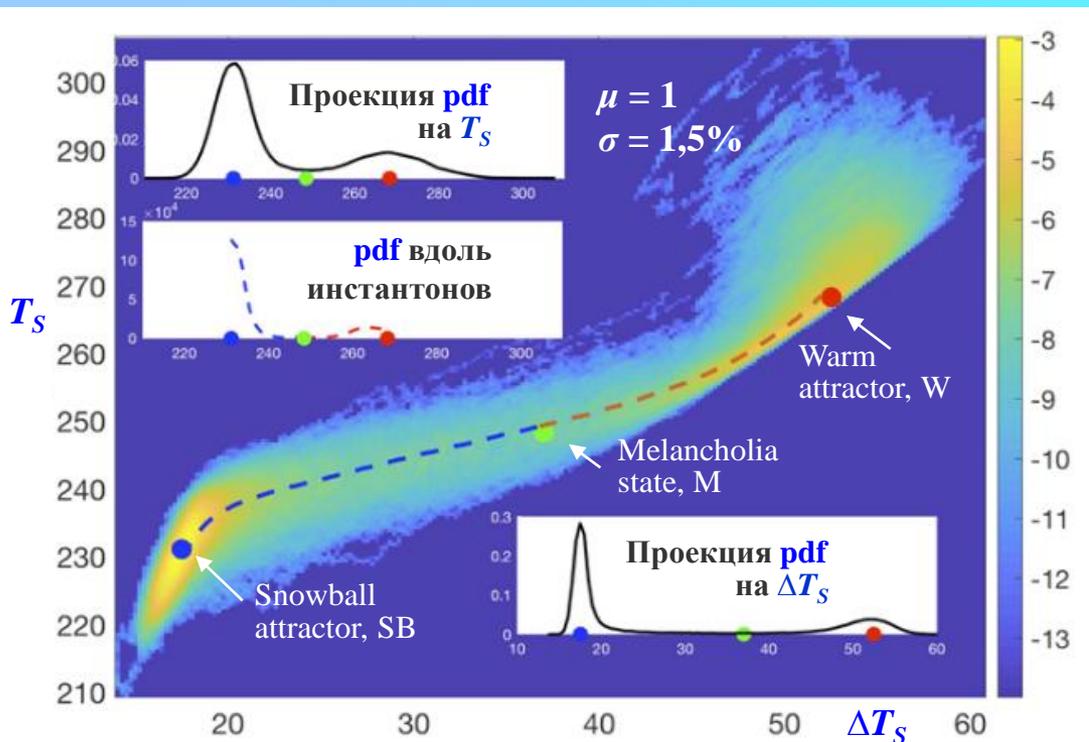
Для каждого значения σ рассчитываются 50 траекторий из бассейна притяжения W к аттрактору SB , и наоборот, на основании чего набирается статистика времен и количества переходов.

Альтернатива – Lévy noise (шум Леви).



N-Tipping: Noise-induced переломный момент

Бистабильность климатической системы Земли: (PUMA-GS)-модель



Логарифм проекции инвариантной меры (функции распределения вероятностей pdf) на плоскость $(\Delta T_S, T_S)$.

Указаны положения теплового аттрактора **W** (красная точка), Snowball аттрактора **SB** (синяя точка), состояния меланхолии **M** (зеленая точка) для $\mu = 1,0$ и $\sigma = 1,5\%$.

Также указываются **инстантоны** $W \rightarrow SB$ и $SB \rightarrow W$.

Здесь, ΔT_S - разность температур от экватора до полюса; T_S - глобально усредненная температура поверхности Земли.

Интервал интегрирования $2,9 \cdot 10^4$ лет. При $\sigma = 1,5\%$ наблюдается **41** переход $SB \rightarrow W$ и $W \rightarrow SB$. Занято около **30%** для бассейна **W** и около **70%** для бассейна притяжения **SB**; времена перехода $\tau(W \rightarrow SB) \sim 210$ лет и $\tau(SB \rightarrow W) \sim 460$ лет. С увеличением σ до 1,8% количество переходов растет до 73.

Видно, что пики pdf хорошо согласуются с положением аттракторов **W** и **SB**.

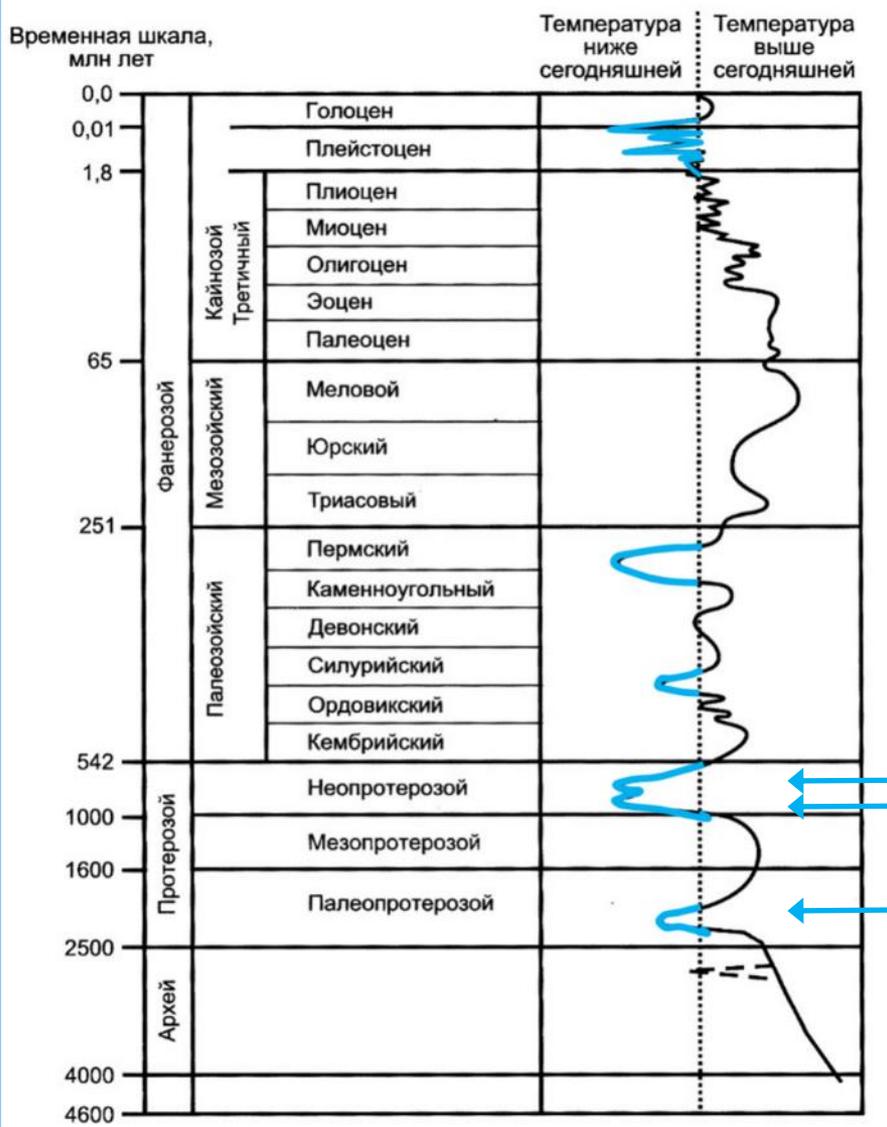
Выстраивая pdf вдоль **инстантонов**, видно, что они следуют по пути **монотонного спуска** (близко к гребням pdf) с минимумом в состоянии **M**. Показано, что состояния **меланхолии** действуют как **шлюзы**.

При $\mu = 0,98$ количество переходов невелико, потому что выйти из состояния **SB** крайне сложно.

При $\mu = 1,02$ количество переходов еще меньше, потому что **еще труднее** выйти из теплового состояния **W**.



Ледниковые периоды в истории Земли



Предполагается, что состояние «снежного шара (snowball)» имело место в период следующих наиболее мощных оледенений: **Мариноанское оледенение**, **Стертовское оледенение**, **Гуронское оледенение**.

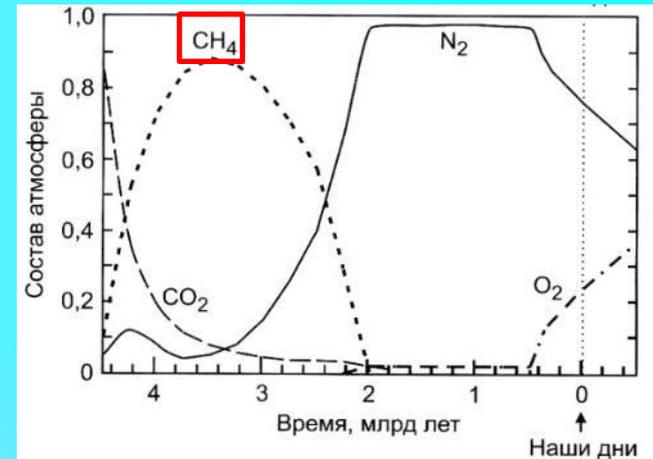
Термин **snowball earth** ввел **J. Kirschvink**, биоманетист и палеомагнетист из Технологического института Калифорнии в **1992** году. Он связал концепцию безудержного альbedo льда с известным геологическим событием — **мариноанским оледенением**.

- Мариноанское оледенение: **640 - 635 млн лет назад**
- Стертовское оледенение: **720 - 710 млн лет назад**
- Гуронское оледенение: **2,4 - 2,1 млрд лет назад**



Ледниковые периоды в истории Земли

Гуронское (Макганьенское) оледенение — одно из древнейших и наиболее продолжительных оледенений на Земле. Началось и закончилось в **2,4 - 2,1 млрд лет** назад, продлившись около **300 млн лет**. Земля полностью покрылась льдом. Причиной гуронского оледенения была **кислородная катастрофа**, в ходе которой в атмосферу Земли поступило большое количество **кислорода**, выработанного фотосинтезирующими организмами. **Метан**, который ранее присутствовал в атмосфере в больших количествах и вносил основной вклад в **парниковый эффект**, соединился с **кислородом** и превратился в углекислый газ и воду.



Состав атмосферы (моделирование)

Стертское (Sturtian) оледенение, произошло между **720 и 710** миллионами лет назад. Ледниковый период длился **5 миллионов лет** и более, в течение которых большая часть поверхности Земли была покрыта льдом.

Мариноанское (Marinoan) оледенение, произошло между **640 и 635** миллионами лет назад. Оледенение могло длиться от **6 до 12 миллионов лет**.

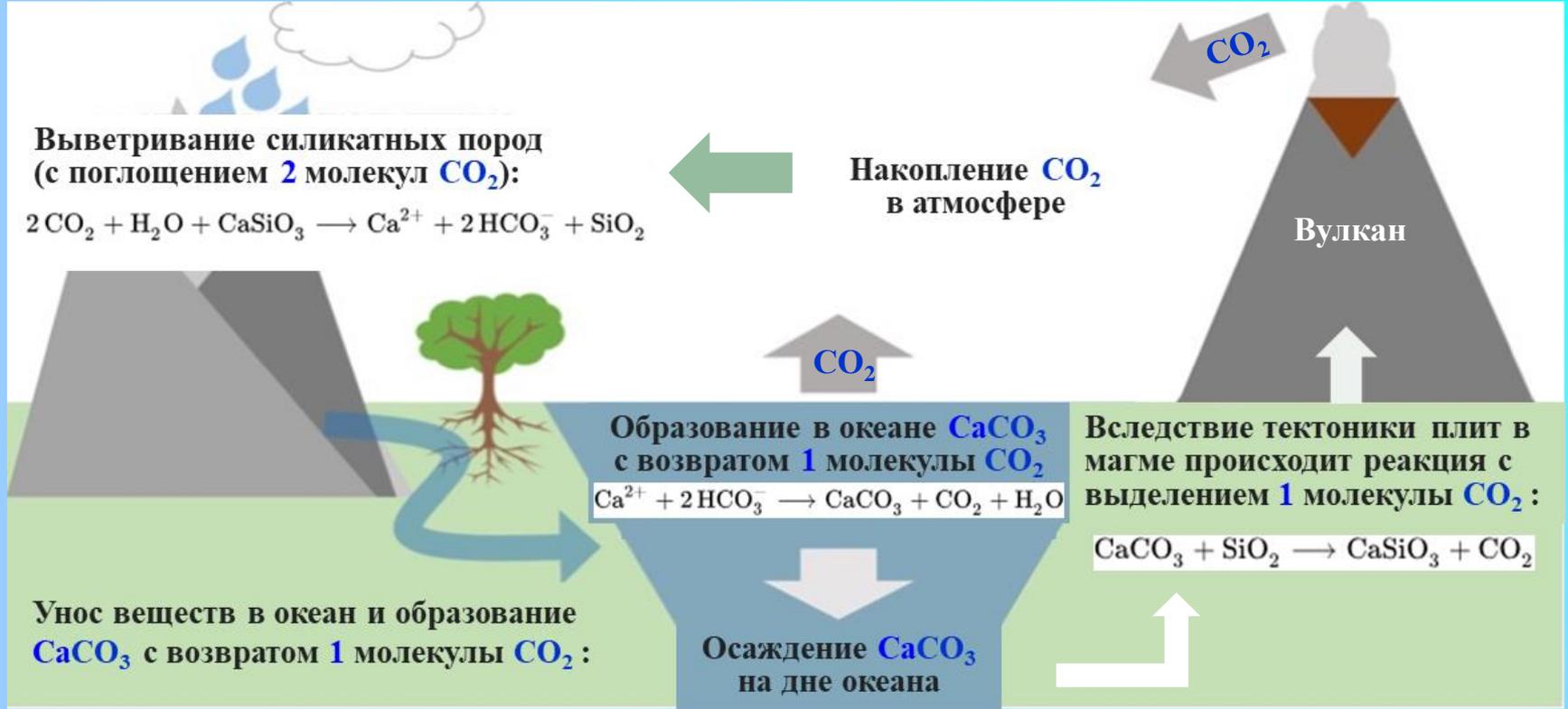
Если более **половины Земли покрыто льдом**, то эффект **альбедо** создает неконтролируемую петлю обратной связи, которая быстро покрывает остальную часть планеты льдом. **Безудержная обратная связь** возникает, когда снег и лед накапливаются быстрее, чем абляция, которая представляет собой комбинированный эффект сублимации и испарения при удалении снега с поверхности.

Каков механизм выхода из, казалось бы, необратимого состояния Snowball?

Интенсивный вулканизм приведет к образованию дополнительных парниковых газов и, соответственно, к глобальному потеплению, что наглядно демонстрируется **карбонатно - силикатным циклом**.



Карбонатно - силикатный цикл



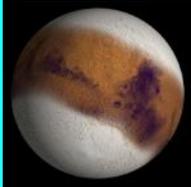
Большая часть земной коры состоит из **силикатов**. По сути весь углерод находится в форме **карбоната**. Из реакций следует, что полностью закрывается **углеродный баланс**.

ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ: Если в атмосфере накапливается CO_2 , **парниковый эффект** приведёт к повышению **температуры** поверхности, что, в свою очередь, увеличит количество осадков и силикатное выветривание, которое будет удалять углерод из атмосферы. Таким образом, в **долгосрочной перспективе** карбонатно-силикатный цикл оказывает **стабилизирующее воздействие на климат Земли**, поэтому его называют «**термостатом Земли**». Если бы не было возврата, весь углерод удалился бы из атмосферы за **400 млн лет**.



Необратимые явления на планетах

Необратимый парниковый эффект: Венера



Если температура поверхности всегда выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, то вода в жидком виде отсутствует. Тогда нарушается **карбонатно-силикатный цикл**. Соответственно, накапливается CO_2 , и за счет парникового эффекта неуклонно растет температура. Такой процесс называется **необратимым парниковым эффектом**. Считается, что в таком состоянии находится **Венера**. Температура поверхности равна $470\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление – 92 атм, а атмосфера состоит из CO_2 .

Есть гипотеза, как это произошло. На ранних этапах **светимость Солнца** была существенно **ниже** (на 35% в сравнении с сегодняшним днем). И на **Венере** была вода, как и на Земле. Затем **светимость Солнца** монотонно **возрастала**, соответственно, интенсивно испарялась вода, которая накапливалась в верхних слоях атмосферы. В **стратосфере** молекулы воды под действием **ультрафиолета** разлагались, и **водород** улетучился из планеты. Такое явление называется **влажным парниковым эффектом**. По оценкам такой процесс начался, когда температура **Венеры** достигла $67\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Необратимое оледенение: Марс

Другая **необратимость** обусловлена **обратными** связями, где главную роль играет **альbedo** – коэффициент отражения разных зон Земли, особенно покрытых **льдом**. Чем больше поверхность льда, тем больше отражается энергии, и тем больше понижение температуры, приводящее к росту оледенения. Этот эффект называется **необратимым оледенением**. Предполагается, что такое явление произошло на **Марсе**. Средняя температура на Марсе: $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Похоже, ранее Марс был покрыт обширными океанами. Но **Марс** по массе в **10 раз** меньше Земли, поэтому достаточно быстро остыл, тектоника плит и вулканизм остановились более **2 млрд лет** назад. Прекратилась подпитка атмосферы **углекислым газом** из недр, что и привело к **необратимому оледенению**. **Марс** не защищен озоном, поэтому за счет фотолиза вода разложилась на водород, который быстро улетучился от планеты с небольшой массой, а кислород окислил множественные запасы железа, придав планете характерный **красный** цвет.



Что делать? Роль энергетики



Климатическая доктрина Российской Федерации

УТВЕРЖДЕНА Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812

... Возникает необходимость учета изменения климата в качестве одного из ключевых долговременных факторов безопасности Российской Федерации, а также признания проблемы глобального изменения климата одним из приоритетов внутренней и внешней политики Российской Федерации.

Определены дополнительные меры по декарбонизации, позволяющие достичь не позднее 2060 года баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением.

Принимаются меры, обеспечивающие:

- а) повышение энергетической эффективности во всех отраслях экономики;
- б) развитие использования возобновляемых и альтернативных источников энергии с низким уровнем выбросов парниковых газов;
- в) осуществление климатических проектов, в том числе в области лесного хозяйства, направленных на сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение их поглощения, повышение качества поглотителей и накопителей парниковых газов.

Научный совет РАН по проблемам климата Земли

Председатели Совета: академики РАН В.Г. Бондур и И.И. Мохов.

Академик И. Мохов: «У России есть все возможности быть мировым лидером в области решения климатических проблем» (2023 г.).

Экспертный совет СО РАН по проблематике Парижского соглашения по климату

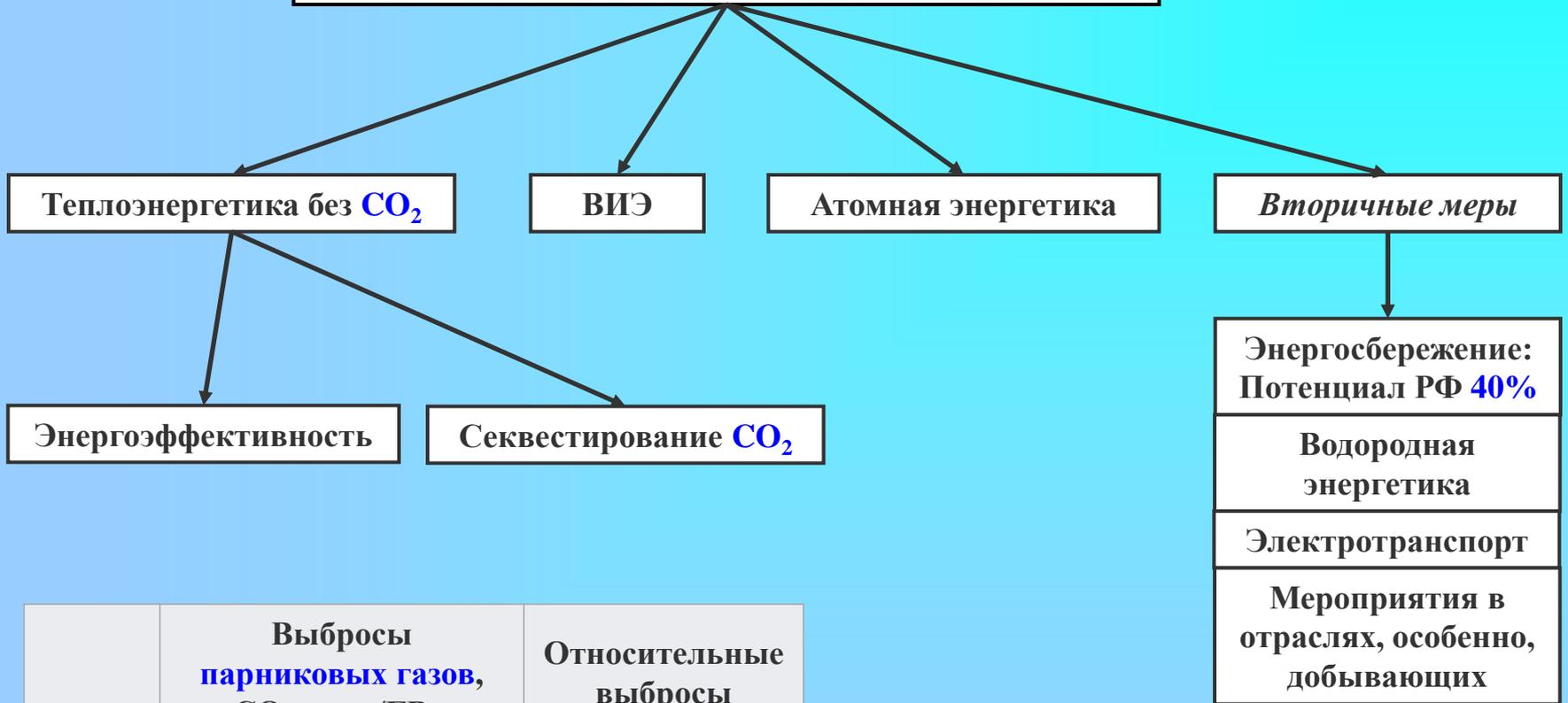
Председатель Совета: академик РАН В.Н. Пармон.

Заместители: академики РАН С.В. Алексеенко, Е.А. Ваганов, В.А. Крюков, Д.М. Маркович.

Ученые секретари: В.В. Данилов, Е.А. Иванов. Состав: всего 34 члена.



Направления снижения выбросов парниковых газов в энергетике



| | Выбросы парниковых газов, т CO ₂ -экв./ГВт·ч | Относительные выбросы |
|-------|---|-----------------------|
| Уголь | 820 | 1.00 |
| Газ | 490 | 0.60 |
| ФЭУ | 48 | 0.06 |
| АЭС | 12 | 0.015 |
| ВЭС | 11 | 0.013 |



Цикл Аллама на природном газе

Сжигание природного газа в O_2 : $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

Нет выбросов CO_2 в атмосферу!

Теплоноситель – **сверхкритический CO_2** .

Параметры цикла: **$1150^\circ C$, 300 атм.**

КПД нетто **59%**.

Нормированная себестоимость составит **6 цент/кВт ч !**

Пилотный стенд на газе **50 МВт (т)** в Хьюстоне (**2018 г.**).

Создана **турбина** на сверхкритическом CO_2 (Тошиба).

Коммерческий проект на газе **300 МВт (э)**.

Разработчик: **NET Power**. Заказы на 2 ТЭС по **280 МВт (э)**.

Если потребовать секвестирование CO_2 для ПГУ, то их КПД упадет до **40 - 50%** вместо 50 - 60%.



Родни Аллам (Великобритания)
– лауреат Нобелевской премии
и премии Глобальная энергия.

Цикл ОИВТ на природном газе
с **бескомпрессорной** парогазовой
установкой – *аналог*.

КНТП «Энергетика больших мощностей нового поколения»:
Проект 4. Создание опытно-промышленного кислородно-топливного энергетического комплекса с нулевыми выбросами на сверхкритическом CO_2 .
Инвестор: энергокомпания **ЭН+**.



Пилотный стенд 50 МВт (т) в Хьюстоне



Газификация угля (синтез-газ)

Генеральное направление в угольной теплоэнергетике связано с **глубокой переработкой угля**, прежде всего, **газификацией** - неполным сжиганием угля и получением **синтез-газа** (смесь H_2 и CO).

Газификация: $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$.

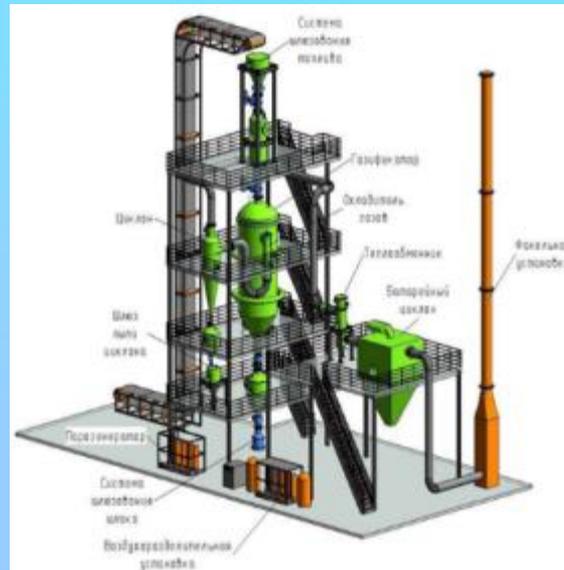
Обычное сжигание: $C + O_2 \rightarrow CO_2$

Назначение газификации: производство тепловой и электрической **энергии**; получение **водорода** и жидкого топлива; производство **химических продуктов**.

Цикл Аллама на угле

Включение **цикла Аллама** в общий термодинамический цикл на угле дает новое качество. Сначала получается **синтез-газ** в процессе газификации угля а затем синтез-газ используется в цикле Аллама с итоговым КПД порядка **51%**. То есть, реализуется цикл Аллама на угле с полным секвестированием **CO_2** . Таким образом решается проблема удовлетворения требований **Парижского соглашения**, в соответствии с которым необходимо полностью отказаться от сжигания угля из-за выбросов **CO_2** .

НИЦ «Экоэнергетика 4.0» ТПУ



Одна из целей – подготовка к реализации **цикла Аллама**. В составе - **две** полномасштабные технологические линии по газификации твердых топлив (**Томская ТЭЦ-3**), в т.ч. : **Горновая газогенераторная установка (ОАО «ВТИ»)**.

Комплекс перерабатывает до **4 тонн топлива в час** – самый **крупный** в России и Европе.

Научный руководитель:
С.В. Алексеенко, акад. РАН

Водоугольное топливо

Развита технология получения водоугольного топлива **ВУТ** (65% угля) на основе шаровой мельницы и генератора **кавитации** с добавлением пластификатора.

Размер угольных частиц около **50-70 мкм**.

Разработан метод сжигания **ВУТ** в вихревой камере с использованием оригинальной пневматической **форсунки**.

Преимущества:

- Возможность сжигания широкой гаммы твердых топлив: низкосортных углей, сланцев, торфа, угольных шламов с зольностью до **50%**.
- Подача ВУТ при $t > 10^\circ\text{C}$, мазута при $t > 70^\circ\text{C}$.
- Температура горения – до **1500 °C** (жидкое шлакоудаление).
- Степень выгорания горючей массы **95 – 97%**.
- Высокие экологические характеристики: существенное снижение в продуктах сгорания **окислов азота** (в **1,5...2 раза**), **окси углерода** (в **2 раза**) и **бенз(а)пирена** (в **5 раз**) и практически нулевые выбросы твердых частиц.

2025 г.: Выполняется коммерческий пилотный проект на котле мощностью **50 МВт**.

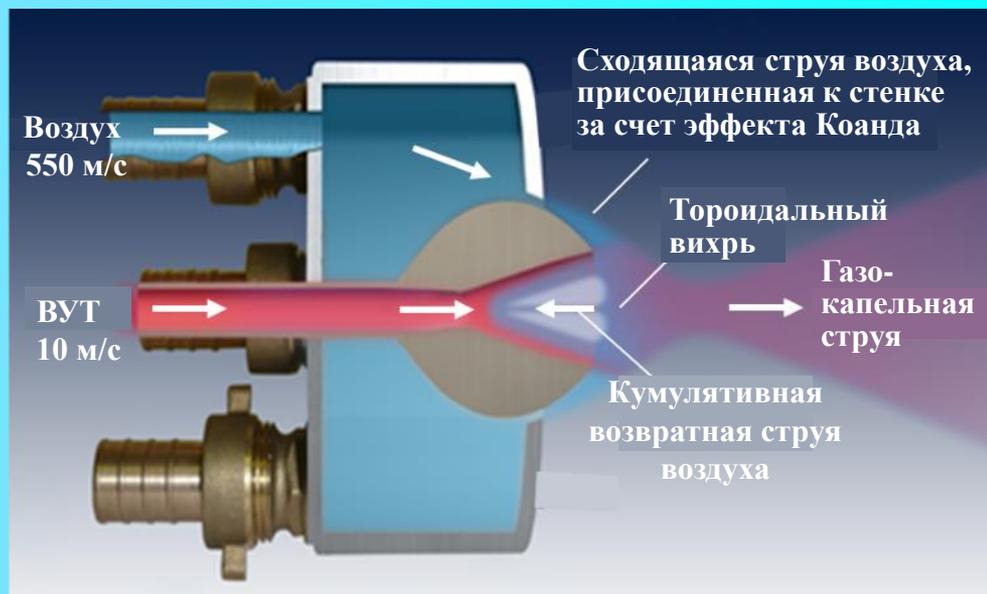


Схема пневматической форсунки и структуры течения

Основным элементом предлагаемой технологии является новый тип **форсунки** (распылителя). Принцип работы распылителя основан на применении **эффекта Коанда** и **кумулятивных струй**. Воздушная струя из конического щелевого сопла образует **сходящийся струйный поток** газа, присоединенный к стенке за счет **эффекта Коанда**. В результате сходимости конической струи образуются высокоскоростная **кумулятивная возвратная струя** и **торoidalный вихрь**. Смешение суспензии с воздухом (распыление) происходит вне сопла и приводит к образованию **мелкодисперсной газожидкостной струи**. Особенность форсунки – **низкий эрозионный износ**.



Атомная энергетика

Реакторы на быстрых нейтронах

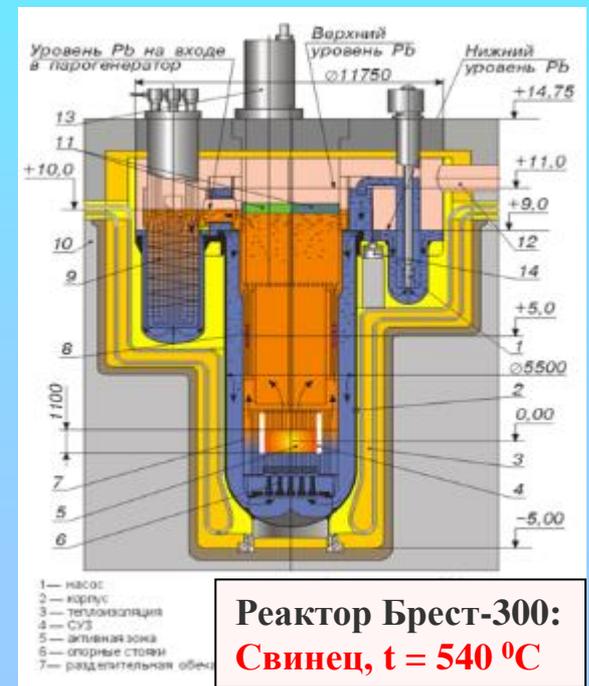
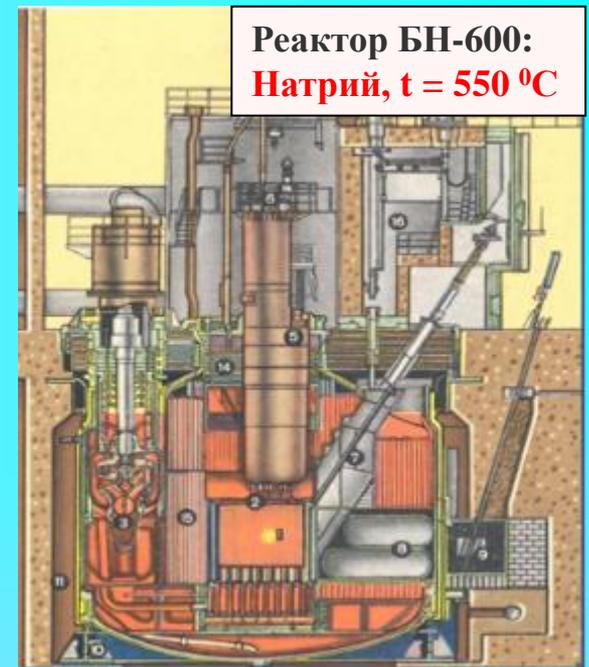
Вне всяких сомнений **будущая энергетика** будет базироваться на источниках с максимально высокой концентрацией энергии. И здесь вне конкуренции **ядерная энергетика**. Ввиду ряда аварий на АЭС современное состояние ядерной энергетике в мире можно оценить как **нестабильное**. Прогноз вклада АЭС в энергетику: **6 – 13,5%** к 2050 г.

В атомной энергетике используется преимущественно изотоп урана **U235** (в реакторах на тепловых нейтронах), но его очень мало (запас на **несколько десятков лет**). В то время как запасов **U238** при использовании в **быстрых реакторах** хватит на **1 000 лет** при нынешнем мировом энергопотреблении. Пока в мире эксплуатируются только два быстрых реактора с **натриевым** теплоносителем (**БН-600, БН-800, Екатеринбург**), но это будущее ядерной энергетике.

Новое прорывное направление в ядерной энергетике прописано в российском проекте «**Прорыв**». Предусмотрено сооружение опытно-демонстрационного энергоблока с РУ **БРЕСТ-ОД-300** (реактор на быстрых нейтронах со **свинцовым** теплоносителем) мощностью 300 МВт (э), технологий замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), новых видов топлива и материалов.

Старт проекта был дан в **сентябре 2021 г., г. Томск**.

Термоядерный синтез в планах на 21 век не рассматривается.





Возобновляемые источники энергии (ВИЭ)

Основные комплексные задачи по направлению «Возобновляемые источники энергии»:

1. Развитие технологий **солнечной** энергетики.
 2. Развитие технологий **ветроэнергетики**.
 3. Развитие технологий использования **биомассы**, включая **отходы**.
 4. Развитие технологий **гидроэнергетики**, включая малые (до 25 МВт) и крупные (более 25 МВт) гидроэнергетические установки.
 5. Развитие технологий **геотермальной** энергетики.
 6. Развитие **других** видов возобновляемой энергетики. Разработка **гибридных** схем.
- Развитие технологий использования **низкопотенциального** тепла (**энергосбережение**).
7. **Накопители энергии**.

По сценарию Международного энергетического агентства к **2050** году почти **90%** производства электроэнергии будет производиться из возобновляемых источников, при этом на долю **ветра** и **солнечной энергии** вместе приходится почти **70%**. Для России такой подход **неприемлем**, поскольку условия для реализации этих типов ВИЭ неподходящие. Но главное причина - в России (самой холодной стране мира) огромная доля энергии потребляется в виде **тепла** для обогрева (175 ГВт из 450 ГВт в мире, то есть почти **40%!**). **Невозможно столько тепла производить из ВИЭ!**

Анализ проблем использования возобновляемых источников энергии показывает, что в числе наиболее перспективных видов ВИЭ, да и вообще будущей энергетики, оказывается **геотермальная энергия!**



Геотермальная энергия

ПРИПОВЕРХНОСТНОЕ ТЕПЛО – тепло подземных источников нагретой воды
ГИДРОГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ГЛУБИННОЕ ТЕПЛО (3 – 10 км) – тепло сухих пород с температурой до **350 °С**
ПЕТРОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

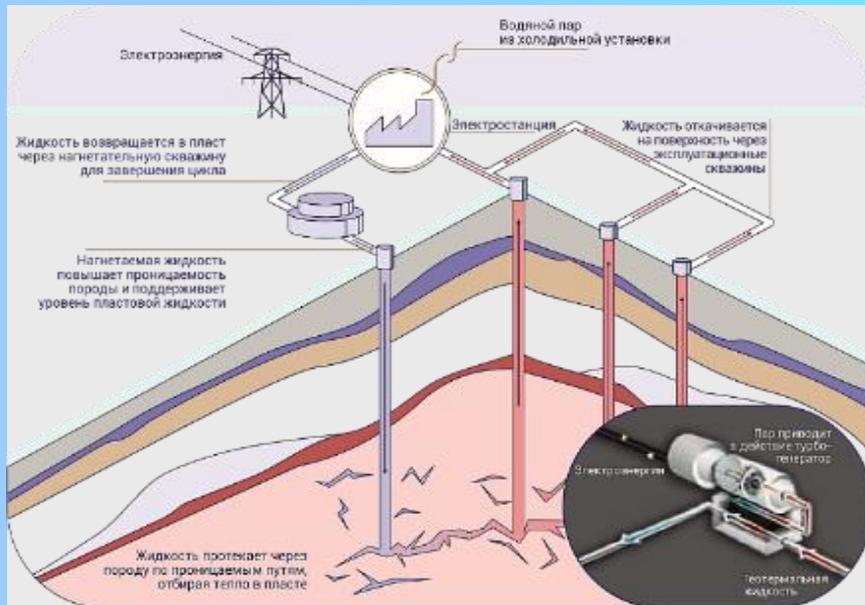


Схема утилизации глубинного тепла.
Глубина до **10 км**, температура до **350°С**.

Петротермальная энергетика

Извлекаемые запасы геотермальной энергии в США: **20 000** годовых потреблений энергии (!).

Планы:

К 2030 г. достичь цены **4,5 ¢/kWh** за геотермальную энергию.

К 2050 г. достичь уровня **90 ГВт** за счет глубинного тепла (**5,5%** установленной **электрической** мощности в США или **37%** - в России) и **12,5%** по производству энергии.

А также **320 ГВт** по теплу.

В РФ все теплоснабжение составляет **175 ГВт**.
28 млн. геотермальных тепловых насосов!

Тезис: Петротермальной энергии достаточно, чтобы навсегда обеспечить человечество энергией!

Массачусетский технологический институт (MIT) представил свой ежегодный список десяти прорывных технологий на 2024 год. Среди них:

- (1) **Enhanced Geothermal Systems (EGS)** - Улучшенные Геотермальные Системы
- (2) **Геотермальные тепловые насосы**



Superhot Rock System

Новая концепция - **Superhot Rock** (сверхгорячие породы). Тепло добывается на глубине **10 - 25 км** или вблизи резервуаров **магмы**, что позволяет получать **сверхкритические** флюиды ($> 374^{\circ}\text{C}$ и > 218 атм). Предлагается **революционный** подход к сверхглубокому бурению - Технология **Quaise Inc.**, основанная на применении **миллиметровых волн (MMW)**. MMW генерируются **гиротроном** и направляется к горячей породе по **волноводам**. Мировой лидер в разработке гиротронов – Н. Новгород (академик **А.Г. Литвак**). Возможно обеспечить тепловую мощность **> 120 МВт** на скважину. Это в 5-10 раз больше энергии, чем обычно производится сегодня из обычной геотермальной системы, и это повышение плотности энергии может сделать геотермальную энергию конкурентоспособной с **нефтью и газом**.

Технология **Quaise MMW** автоматически **расплавляет** породу для создания прочного **стеклянного «вкладыша»**, который предотвращает обрушение скважины и защищает волновод. Конструкция типа «труба-в-трубе».

Глубинное бурение с помощью **традиционной** технологии затраты более **5 000 долларов за метр** (5 млрд руб.). Бурение **MMW** позволяет достичь вдвое большей глубины при затратах на бурение около **1 000 долларов за метр**.

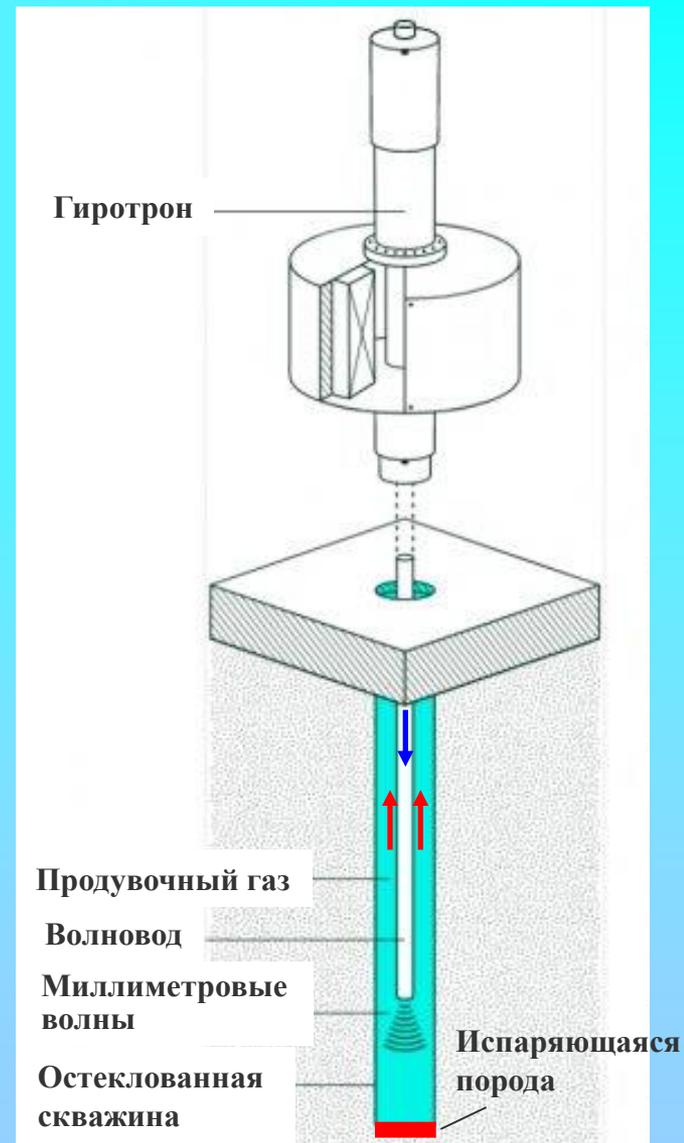
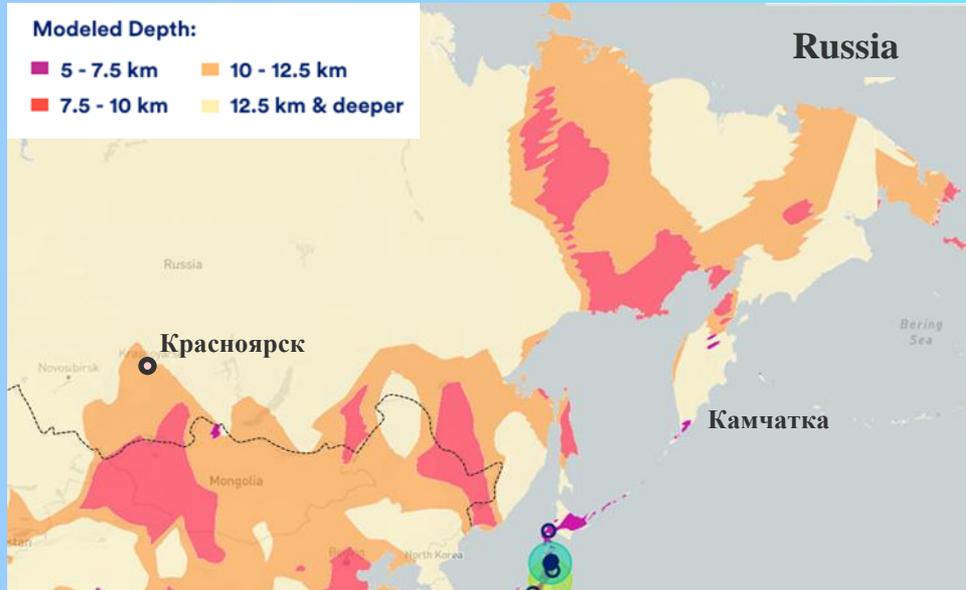


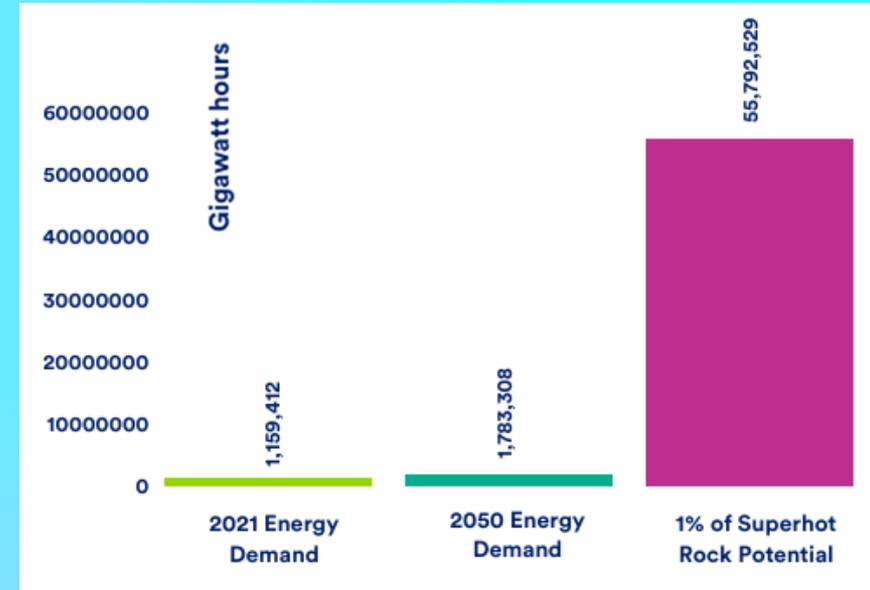
Схема бурения миллиметровыми волнами



Superhot Rock System: Russia



Распределение глубин пород с температурой более **450°C**



Сценарии потребления электроэнергии в РФ

В России есть значительные ресурсы супергорячих пород. Всего **1%** геотермального запаса супергорячих пород России в **48** раз превышает потребление электроэнергии страны в 2021 году. Геотермальная энергия из супергорячих пород России может иметь уровень LCOE в диапазоне от **2** до **3,5** центов за кВт ч.

Методы утилизации геотермальной энергии

Бинарная ГеоЭС на базе ОЦР (органического цикла Ренкина)

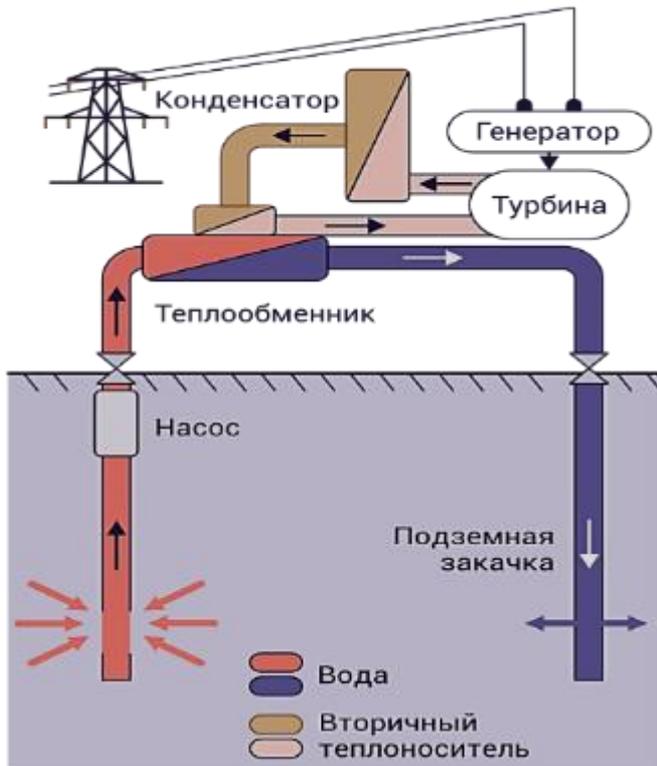
Паратунская ГеоЭС (1967 - 1974)

Разработчик ИТФ СО АН СССР

Авторы технологии: *С.С. Кутателадзе, Л.М. Розенфельд, Ю.М. Петин, В.Н. Москвичева* при поддержке академика *М.А. Лаврентьева*.

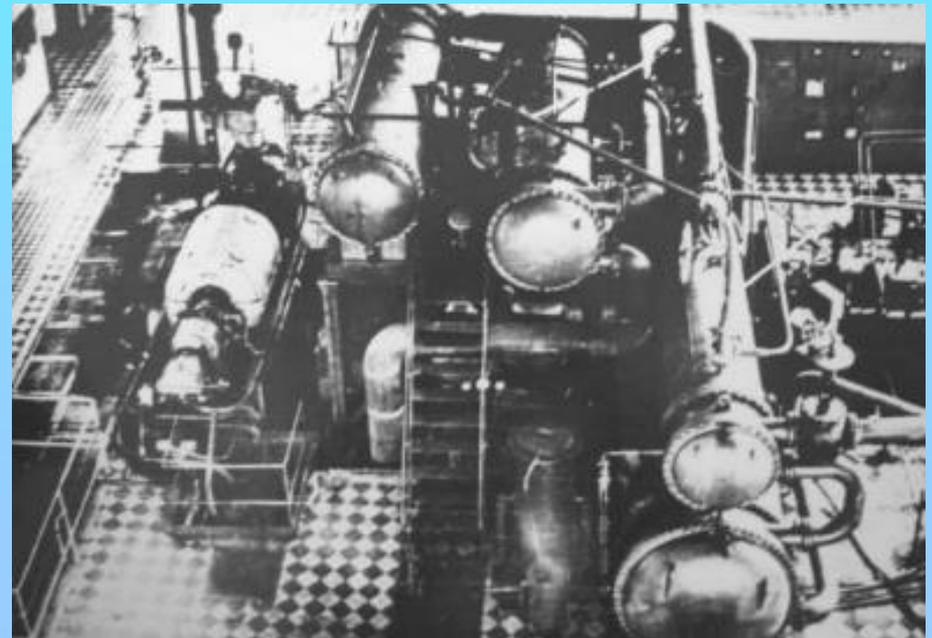
Впервые в мире применен бинарный цикл с фреоновой турбиной на фреоне R-12 для выработки э/э из геотермального источника: Мощность 815 кВт, $t_{\text{вода}} = 80^\circ\text{C}$.

Сегодня в России нет!



Органический цикл Ренкина эффективен при $t \leq 400^\circ\text{C}$ и мощности $1 \text{ кВт} \div 10 \text{ МВт}$. В мире в эксплуатации 600 ТЭС на ОЦР общей мощностью 2 ГВт.

Существуют сотни рабочих тел для ОЦР. Но в коммерческих целях используется лишь несколько веществ: R134a, R245fa, N-пентан, изобутан, изопентан, изобутан-изопентановая смесь.





Проблема выбора рабочих тел для тепловых машин

Рекомендации по выбору рабочего тела в ОЦР, тепловых насосах и холодильной технике

Практически все основные **рабочие тела** (кроме воды) в тепловых машинах являются либо **озоноразрушающими**, либо **парниковыми** (или то и другое), либо **горючими**, либо **токсичными**, либо **малоэффективными**. **Фреоны**, основной вид рабочих тел, будут полностью запрещены в будущем. Поэтому существует принципиальная **проблема выбора** рабочих веществ для холодильной техники, тепловых насосов, органического цикла Ренкина.

СЕГОДНЯ:

R134a, R245fa, N-пентан, изобутан, изопентан, изобутан-изопентановая смесь.

В ПЕРСПЕКТИВЕ:

Углеводороды (НС): пропан, изобутан, N-пентан, изопентан и их смеси.

Углекислый газ CO_2 .

Гидрофторолефины (?): R-1234yf ($\text{CH}_2=\text{CFCF}_3$) ...

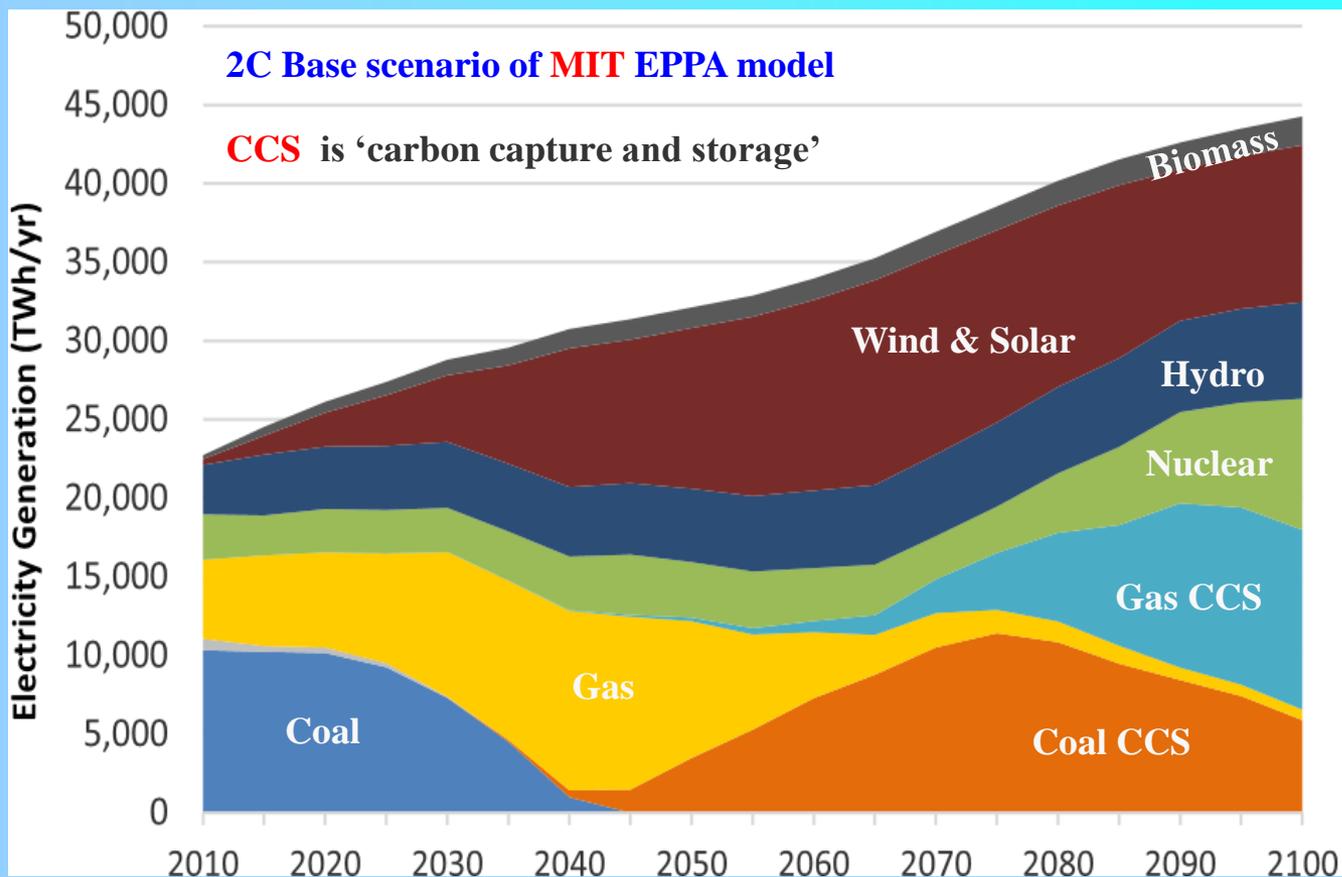
Кислородсодержащие соединения (?): Novac-649 ($\text{CF}_3\text{CF}_2\text{C}(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$) ...

Аммиак NH_3 .

Наиболее подходящими рабочими телами (неводного типа) с точки зрения озонобезопасности и парникового эффекта являются давно известные **природные агенты**: углеводороды типа пропана и изобутана; углекислый газ; аммиак. У каждого свои особенности, в частности, токсичность и горючесть. **Аммиак** выглядит особо перспективным, поскольку освоен в глобальных масштабах, кроме того, это лучший **способ хранения водорода**, и он является **эффективным топливом** для **топливных элементов**, а также процессов экологически чистого **сжигания**.



Наиболее оптимистический сценарий развития энергетики (модель MIT)



К 2100 году на **CCS** приходится почти **40%** мирового производства электроэнергии. Конечная глобальная генерация в 2100 году составит около **13% coal CCS**, **26% gas CCS**, **19% nuclear**, **14% hydro**, **23% wind and solar**, **4% biomass** и менее **2% natural gas**.



Заключение 1: Изменения климата

- Обнаружен **рост температуры** поверхности Земли, который связывается с **глобальным потеплением**. Его главной причиной является **антропогенная эмиссия парниковых газов**, прежде всего, **CO₂**. Основной вклад вносит **энергетика** на **органическом топливе**.
- Парижское соглашение не может быть реализовано в полной мере, но **глобальная декарбонизация энергетики** неизбежна.
- В **России** потепление климата идет более высокими темпами (в **2,5 раз** быстрее) и ведет к значительному **сокращению** потребности в топливе (до **15%**), в основном из-за снижения расходов на теплоснабжение.
- Глобальное потепление сопровождается существенным ростом **экстремальных климатических и погодных явлений**.
- Особую опасность представляют так называемые **переломные моменты (tipping points)**, которые проявляются при превышении **порогового** значения параметров системы и могут привести к необратимым **катастрофическим** последствиям.
- Показано, что в текущей конфигурации Земля находится в **бистабильном (мультистабильном)** режиме - могут быть реализованы **два** асимптотических состояния. **Теплое** состояние (**warm**), в котором мы находимся, конкурирует с состоянием **снежного кома (snowball)**. Бистабильность существует благодаря положительной **обратной связи лед-альbedo**.
- Необходимо дальнейшее развитие **климатических моделей** Земли с одновременной организацией систем климатического **мониторинга**.



Заключение 2: Разрушение озонового слоя Земли

- Показано, что **антропогенные выбросы ОРВ** (озоноразрушающих веществ) типа фреонов приводят к **разрушению озонового** слоя Земли и образованию **озоновых «дыр»** в Антарктике.
- Показано, что **разрушение озонового слоя** и **глобальное изменение климата** взаимосвязаны, поскольку озоноразрушающие вещества и их заменители являются парниковыми газами. **Озон** также является парниковым газом.
- Снижение выбросов ОРВ благодаря соблюдению **Монреальского** протокола позволяет избежать глобального потепления примерно на **0,5 – 1°C** к **2050 г.** по сравнению с экстремальным сценарием с неконтролируемым увеличением ОРВ на 3 - 3,5% в год.
- Соблюдение принятой в 2016 году поправки **Кигали** к Монреальскому протоколу, которая требует поэтапного сокращения производства и потребления некоторых гидрофторуглеродов (ГФУ) в климатических целях, по оценкам, позволит избежать потепления на **0,3 – 0,5°C** к **2100** году.
- Ожидается, что общий объем **озонового слоя** вернется к значениям 1980 года примерно в **2066** году в **Антарктике**, примерно в **2045** году в **Арктике** и примерно к **2040** году для **среднемирового** значения (60° северной широты – 60° южной широты).

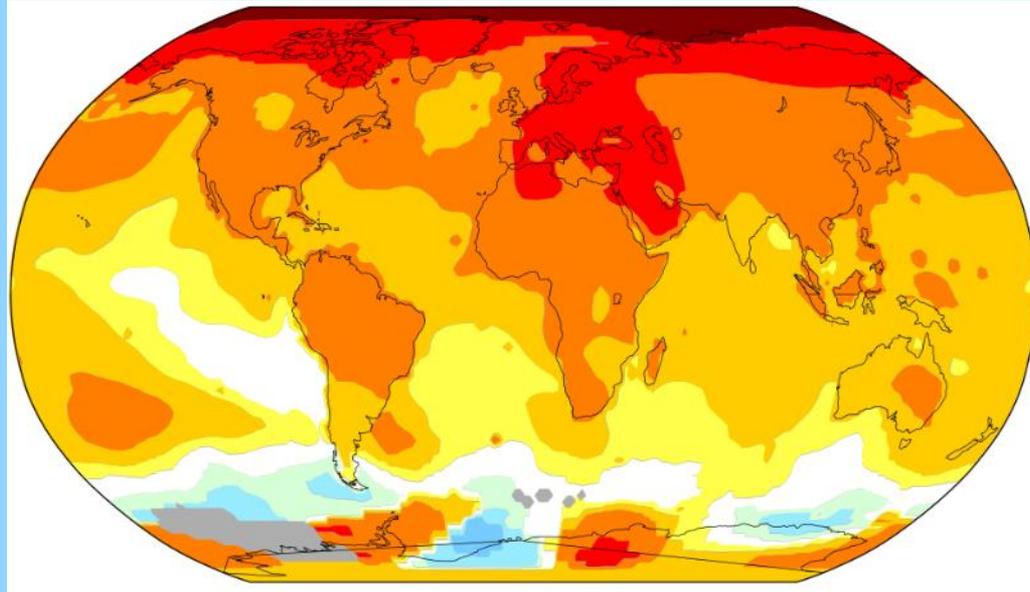


Заключение 3: Энергетические технологии

- Необходимо последовательно осуществлять **декарбонизацию энергетики** со скоростями, не превосходящими **экономические возможности** страны.
- В сфере энергетики на **органичном** топливе, прежде всего, необходимо повышать **эффективность** производства энергии. Радикальным подходом является применение технологий с **секвестированием** CO₂. В числе наиболее перспективных – **цикл Аллама**, предусматривающий сжигание топлива в кислороде без выбросов оксида углерода в атмосферу и использование сверхкритического CO₂ в качестве рабочего тела.
- Альтернативными безуглеродными технологиями являются **атомная** энергетика и возобновляемые источники энергии (**ВИЭ**). В числе наиболее перспективных ВИЭ видится **геотермальная** энергетика с переходом в будущем на **глубинное** (петротермальное) тепло. **Петротермальной** энергии достаточно, чтобы навсегда обеспечить человечество энергией!
- Значительный вклад энергетика вносит в разрушение **озонового слоя**. Поскольку практически все основные рабочие тела (типа **фреонов**) в тепловых машинах являются либо озоноразрушающими, либо парниковыми (или то и другое), то существует принципиальная проблема выбора рабочих веществ. Наиболее подходящими рабочими телами (неводного типа) с точки зрения озонобезопасности и парникового эффекта являются давно известные природные агенты: **углеводороды** типа пропана и изобутана; **углекислый газ**; **аммиак**. **Аммиак** выглядит особо перспективным, поскольку освоен в глобальных масштабах, кроме того, он представляет собой соединение, которое можно считать одним из лучших способов хранения водорода.



Итоговое заключение



**Изменение климата –
это вызов, а не катастрофа**

*Climate Working Group (2025)
A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate.
Washington DC: Department of Energy,
July 23, 2025*



Спасибо за внимание!