

*Обзор Королевского общества и
Национальной академии наук США*

Изменение климата Доказательства и причины



Обновление 2020



NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES

THE
ROYAL
SOCIETY

Предпосылка

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА ЯВЛЯЕТСЯ ОДНИМ ИЗ ДОСТОПРИМЕЧАТЕЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ НАШЕГО ВРЕМЯ.

Сейчас, как никогда раньше, на основе многочисленных улик подтверждается, что именно люди изменяют климат Земли. Атмосфера и океаны нагрелись, что сопровождается повышением уровня моря, значительным сокращением площади арктического льда и другими климатическими изменениями. Влияние изменения климата на людей и природу становится все более очевидным: беспрецедентные наводнения, волны жары и лесные пожары наносят ущерб на миллиарды долларов. Такие явления возникают в ответ на изменение температуры и режимов осадков, что нарушает естественное равновесие планеты.

Королевское общество и Национальная академия наук США, имеющие общую цель - способствовать использованию науки во благо общества и информировать общественность о важных политических вопросах, в 2014 году опубликовали совместную работу «Изменение климата: доказательства и причины». Этот труд был написан и рецензирован ведущими климатологами из Великобритании и США. Новое обновленное издание подготовлено той же командой авторов с учетом свежих климатических данных и научных исследований, углубляющих наше понимание изменений климата, вызванных человеческой деятельностью.

Доказательства очевидны. Однако, учитывая природу науки, не каждая деталь окончательно определена, и не на все вопросы уже получены ответы. Научные данные продолжают активно собираться во всем мире, что постоянно расширяет наше понимание климатических процессов. Некоторые аспекты стали более понятны, а также появились новые представления. Например, период замедленного потепления в 2000-х — начале 2010-х годов завершился резким ростом температур между 2014 и 2015 годами. Площадь морского льда в Антарктике, ранее имевшая тенденцию к увеличению, с 2014 года начала уменьшаться, достигнув в 2017 году рекордно низкого уровня, что сохраняется до сих пор. Эти и другие недавние наблюдения учтены в обсуждении вопросов, представленных в этой брошюре. Призывы к действиям становятся все громче. В исследовании «Глобальные риски 2020 года», опубликованном Всемирным экономическим форумом, изменение климата и связанные с ним экологические проблемы были определены среди пяти серьезных рисков, которые могут возникнуть в ближайшие десять лет. Впрочем, международное сообщество все еще недостаточно амбициозно в своих действиях по смягчению последствий, адаптации и предотвращению дальнейших изменений климата.

Научная информация чрезвычайно важна для общества, ведь именно она позволяет

принимать обоснованные решения относительно путей уменьшения масштабов изменения климата и адаптации к его последствиям. Эта брошюра выступает ключевым справочным источником для лиц, принимающих решения, политиков, педагогов и всех, кто стремится получить авторитетные и научно обоснованные ответы по поводу современного состояния знаний об изменении климата.

Мы благодарны за то, что шесть лет назад, под руководством доктора Ральфа Дж. Сицерона — бывшего президента Национальной академии наук США — и сэра Пола Нерса, бывшего президента Королевского общества, эти две ведущие научные организации объединились, чтобы подготовить высокоуровневый обзор современных научных знаний. Как нынешние президенты этих учреждений мы рады представить обновленную версию этого ключевого справочного издания, созданную при поддержке семьи Сицерона.

Марсия Макнатт

Президент Национальной академии наук

Венки Рамакришнан

Президент Королевского общества

[Для дальнейшего чтения](#)

Более подробное обсуждение тем, рассмотренных в этом документе (включая ссылки на исходные оригинальные исследование) см.:

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019:
Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate
[<https://www.ipcc.ch/srocc>]
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM), 2019: *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*

[<https://www.nap.edu/catalog/25259>]

- Royal Society, 2018: *Greenhouse gas removal*
[<https://raeng.org.uk/greenhousegasremoval>]
- U.S. Global Change Research Program (USGCRP), 2018: *Fourth National Climate Assessment Volume II: Impacts, Risks, and Adaptation in the United States*
[<https://nca2018.globalchange.gov>]
- IPCC, 2018: *Global Warming of 1.5°C*
[<https://www.ipcc.ch/sr15>]
- USGCRP, 2017: *Fourth National Climate Assessment Volume I: Climate Science Special Reports*
[<https://science2017.globalchange.gov>]

- NASEM, 2016: Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change [<https://www.nap.edu/catalog/21852>]
- IPCC, 2013: *Fifth Assessment Report (AR5) Working Group 1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>]
- NRC, 2013: Abrupt Impacts of Climate Change: Anticipating Surprises [<https://www.nap.edu/catalog/18373>]
- NRC, 2011: *Climate Stabilization Targets: Emissions, Concentrations, and Impacts Over Decades to Millennia* [<https://www.nap.edu/catalog/12877>]
- Royal Society 2010: *Climate Change: A Summary of the Science* [[\[policy/publications/2010/ climate-change-summary-science\\]\]\(https://www.nap.edu/catalog/12782\)](https://royalsociety.org/topics-

</div>
<div data-bbox=)

- NRC, 2010: *America's Climate Choices: Advancing the Science of Climate Change* [<https://www.nap.edu/catalog/12782>]

- Большинство исходных данных, на которых

основываются научные выводы,

- обсуждены в этом документе, есть в открытом доступе по адресу

:

- <https://data.ucar.edu/>
- <https://climatedataguide.ucar.edu>
- <https://iridl.ldeo.columbia.edu>
- <https://ess-dive.lbl.gov/>
- <https://www.ncdc.noaa.gov/>
- <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- <http://scrippsco2.ucsd.edu>
- <http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/>

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (NAS) Национальный совет по исследованиям США был создан для предоставления консультаций правительству Соединенных Штатов по научным и техническим вопросам, когда президент Авраам Линкольн подписал соответствующий закон Конгресса в 1863 году. Этот совет, являющийся оперативным подразделением Национальной академии наук и Национальной инженерной академии, опубликовал многочисленные отчеты о причинах изменения климата и возможных мерах реагирования на него. Материалы Национального совета по исследованиям доступны по адресу: nationalacademies.org/climate.

КОРОЛЕВСКОЕ ОБЩЕСТВО является самоуправляющимся сообществом многих величайших ученых мира. Его члены представляют все области науки, инженерии и медицины. Общество является национальной академией наук Великобритании. Основная цель организации, закрепленная в ее учредительных уставах 1660-х годов, состоит в признании, продвижении и поддержке научных достижений, а также в поощрении развития и применения науки во благо человечества. Более подробную информацию о деятельности Общества в сфере изменения климата можно найти на сайте www.royalsociety.org/policy/climate-change.



NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES

THE
ROYAL
SOCIETY



THE
ROYAL
SOCIETY



Итог	2
------------	---

Вопросы и ответы об изменении климата

1 Потеплел ли климат	3
2 Как ученые узнали, что последние климатические изменения в значительной степени вызваны деятельностью человека?.....	5
3 CO ₂ уже естественным образом присутствует в атмосфере, так почему же выбросы, вызванные деятельностью человека, имеют столь большое значение?.....	6
4 Какую роль сыграло Солнце в изменении климата за последние десятилетия?	7
5 О чем свидетельствуют изменения в вертикальной структуре температуры атмосферы от поверхности до стратосферы о причинах последних климатических изменений?	8
6 Климат всегда меняется. Почему изменения климата сейчас вызывают беспокойство?	9
7 Является ли нынешний уровень CO ₂ в атмосфере беструдоспособным в истории Земли? ..	9
8 Есть ли точка, после которой увеличение концентрации CO ₂ больше не приведет к дополнительному потеплению?.....	10
9 Изменяется ли темп потепления из десятилетия в десятилетие?	11
10 Означало ли замедление потепления в 2000-х — начале 2010-х годов, что изменения климата больше не происходят?.....	12

Основы изменения климата B1–B8

Вопросы и ответы по изменению климата (продолжение)

11 Если мир станет теплее, почему некоторые зимы и лета все еще бывают очень холодными?..	13
12 Почему площадь морского льда в Арктике уменьшается, тогда как в Антарктике почти не исчезает?.....	14
13 Как изменение климата влияет на силу и частоту наводнений, засух, ураганов и торнадо?..	15

14	С какой скоростью поднимается уровень моря?	16
15	Что такое закисление океана и почему оно имеет значение?	17
16	Насколько уверены ученые, что Земля и дальше будет нагреваться в течение следующего столетия?.....	18
17	Являются ли изменения климата всего на несколько градусов поводом для беспокойства?...	19
18	 Что делают учёные, чтобы устранить основные неопределенности в нашем понимании климатической системы?.....	19
19	Есть ли сценарии катастроф, связанные с критическими точками, например «остановка Гольфстрим» или высвобождение метана из Арктики, поводом для беспокойства?.....	21
20	Если прекратить выброс парниковых газов, вернется климат к условиям, которые были 200 лет назад?.....	22

Заключение	23
Благодарности.....	24

ПАРНИЧНЫЕ ГАЗЫ такие как углекислый газ (CO_2), поглощают тепло (инфракрасное излучение), излучаемое с поверхности Земли. Увеличение концентрации этих газов приводит к потеплению планеты, поскольку они удерживают большую часть этого тепла. Деятельность человека, особенно сжигание ископаемого топлива с начала промышленной революции, повлекла за собой увеличение концентрации CO_2 в атмосфере более 40 %, при этом более половины этого роста произошло с 1970 года. С 1900 г. средняя глобальная температура поверхности Земли повысилась примерно на 1 °C (1,8 °F). Это сопровождалось потеплением океанов, повышением уровня моря, значительным сокращением арктического морского льда, распространенным увеличением частоты и интенсивности волн жары и многими другими климатическими эффектами. Значительная часть этого потепления произошла за последние пять десятилетий. Подробный анализ показал, что он является главным образом результатом увеличения концентраций CO_2 и других парниковых газов. Продолжение выбросов этих газов приведет к дальнейшим изменениям климата, включая значительное повышение средней глобальной температуры поверхности и существенные изменения регионального климата. Масштабы и сроки этих изменений зависят от многих факторов, и периоды замедления или ускорения потепления, продолжающиеся десятилетия и более, будут продолжаться. Однако долгосрочные изменения климата в течение многих десятилетий будут определяться главным образом общим количеством CO_2 и других парниковых газов, выбрасываемых в результате деятельности человека.



1

Потеплеет ли климат?

Да. Средняя температура воздуха на поверхности Земли повысилась примерно на 1°C ($1,8^{\circ}\text{F}$) с 1900 года, причем более половины этого повышения приходится на период с середины 1970-х годов [рис. 1a]. Широкий спектр других наблюдений – таких как уменьшение площади арктического морского льда и увеличение теплоемкости океана – а также признаки в природном мире (например, смещение к полюсам ареалов рыб, млекопитающих, насекомых и других температурно чувствительных видов) вместе предоставляют неоспоримые доказательства глобального потепления.

Наиболее очевидные доказательства потепления поверхности проистекают из широко распространенных термометрических записей, которые в некоторых местах ведутся с конца XIX века. Сегодня температуру измеряют в тысячах точек как на суше, так и поверхности океанов. Косвенные оценки изменений температуры из таких источников, как годовые кольца деревьев или керны льда, помогают разместить современные изменения температуры в историческом контексте. Что касается средней температуры поверхности Земли, эти косвенные оценки показывают, что период с 1989 по 2019 год, скорее всего, был самым теплым 30-летним периодом за последние 800 лет; а последнее десятилетие (2010–2019 гг.) является самым теплым за всю историю инструментальных наблюдений (с 1850 г.). Широкий спектр других наблюдений дает еще более полное представление о потеплении климатической системы. К примеру, нижние слои атмосферы и верхние слои океана также потеплели, снежный и ледяной покров в Северном полушарии уменьшается, слои океана также потеплели, снежный и ледяной покров в Северном полушарии уменьшается, ледниковый покров Гренландии сокращается, а уровень моря поднимается [рис. 1b]. Эти измерения производятся с помощью различных наземных, океанических и космических инструментов, что придает уверенность в реальности глобального потепления климата Земли.

Рисунок 1а. Средняя глобальная температура Земли. Температура поверхности Земли повысилась, как показано на этом графике, составленном на основе измерений на суше и в океане с 1850 по 2019 год, полученных на основе трех независимых анализов доступных наборов данных. Изменения температуры относительно средней глобальной температуры поверхности 1961–1990 гг. Источник: NOAA Climate.gov; данные от Британской метеорологической службы Hadley (бордовый), Национального управления авиации и космических исследований – Института

космических исследований им. Годдарда (красный) и Национальной администрации США по океанам и атмосферным исследованиям — Национальные центры экологической информации (оранжевый)

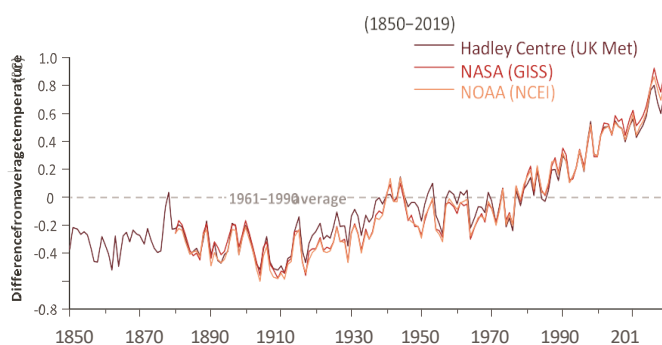
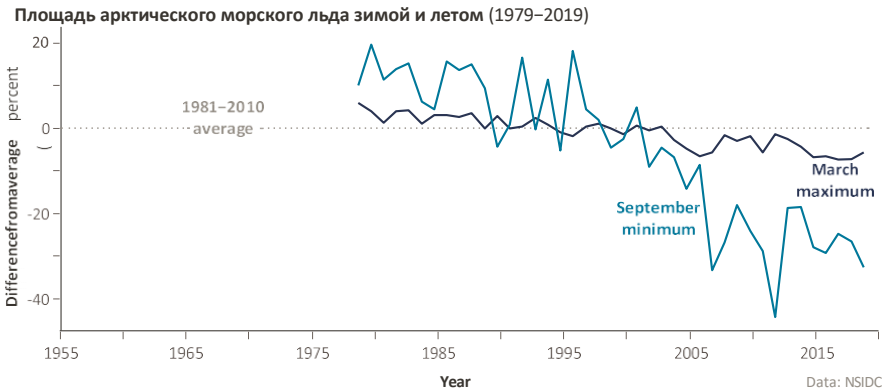
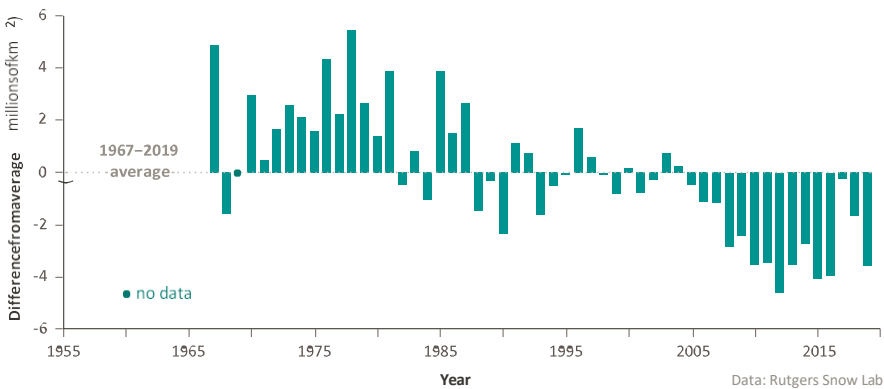


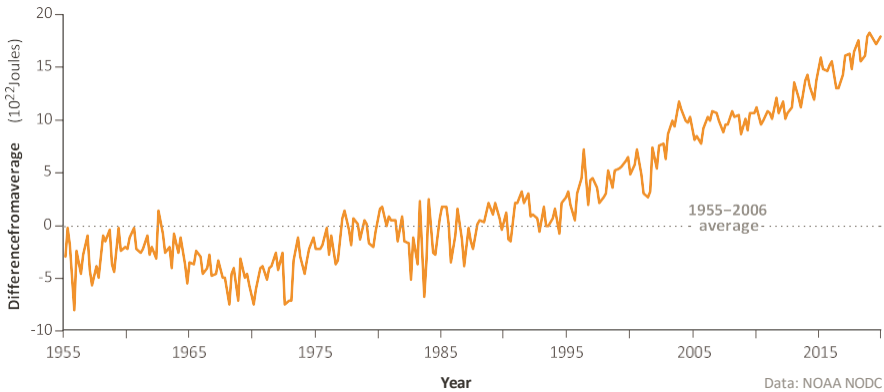
Рисунок 1b. Большое количество наблюдаемых данных, кроме данных о температуре поверхности, свидетельствует о том, что климат Земли меняется. Например, дополнительные доказательства тенденции к потеплению можно найти в резком уменьшении площади арктического морского льда в период, происходящий в сентябре, уменьшении снежного покрова в северном полушарии, увеличении среднего глобального верхнего слоя океана (верхний 700 м или 2300 футов) — показано относительно среднего значения за 0,5/0,0/0,0/0,0/0,0/0,0/0,0/0,5/0/0. мирового моря. Источник: NOAA Climate.gov



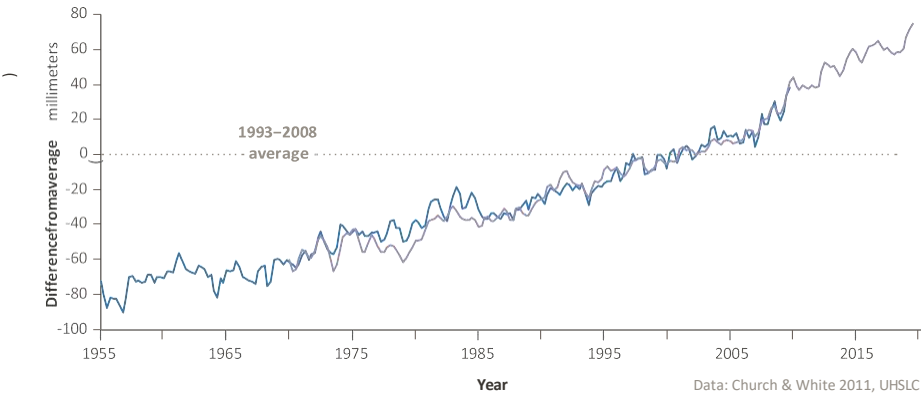
Снежный покров в северном полушарии в июне (1967–2019)



Теплоемкость верхних слоев океана (1955–2019)



Глобальный уровень моря (1955-2019)





2 Как ученые определяют, что современные изменения климата в значительной степени обусловлены деятельностью человека?

Ученые определяют, что последние климатические изменения в значительной степени связаны с деятельностью человека, опираясь на понимание основ физики, сравнение наблюдений с моделями и анализ детальных моделей климатических изменений, вызванных различными антропогенными и природными факторами.

С середины 1800-х годов ученые знают, что CO_2 является одним из главных парниковых газов, играющих ключевую роль в энергетическом балансе Земли. Прямые измерения CO_2 в атмосфере и анализ воздуха, уловленного в ледниках, показывают, что с 1800 по 2019 год содержание CO_2 в атмосфере выросло более чем на 40%. Измерения разных форм углерода (изотопы, см. вопрос 3) свидетельствуют, что это увеличение является следствием деятельности человека. Другие парниковые газы, в частности метан и закись азота, также возрастают из-за антропогенного воздействия. Наблюдаемое повышение глобальной температуры поверхности с 1900 года согласуется с подробными расчетами влияния на увеличение концентрации парниковых газов и других изменений, вызванных деятельностью человека, на энергетический баланс Земли. Различные факторы, влияющие на климат оставляют уникальные следы в климатических записях. Эти отпечатки легче заметить, если анализировать не только одно число (например, среднюю температуру Земли), а также географические и сезонные модели изменений климата. Наблюдаемые модели изменений поверхности, температуры в атмосфере, увеличение теплового содержания океана, повышение атмосферной влажности, повышение уровня моря и усиление таяния льда на суше и в морях согласуются с моделями, которые ученые ожидают увидеть в результате деятельности человека (см. вопрос 5). Ожидаемые изменения климата основываются на нашем понимании того, как парниковые газы удерживают тепло. Фундаментальные знания физики парниковых газов и исследования по климатическим моделям показывают, что естественные причины сами по себе не могут объяснить недавние наблюдаемые изменения климата. К естественным причинам относятся изменения в энергоизлучении Солнца и вокруг него орбите Земли, вулканические извержения и внутренние колебания климатической системы (такие как Эль-Ниньо и Ла-Нинья). Расчеты с использованием климатических моделей (см. Инфобокс, с. 20) моделируют, что произошло бы с глобальными температурами, если бы на климат влияли только природные факторы. Эти модели показывают незначительное потепление или даже небольшое охлаждение в течение 20 века и начале 21 века. Лишь когда модели учитывают влияние деятельности человека на состав атмосферы, полученные изменения температуры согласуются с наблюдаемыми данными.

Деятельность человека значительно нарушила естественный цикл углерода: добыча ископаемого топлива и его сжигание для получения энергии приводят к выбросам СО₂ в атмосферу.

В природе СО₂ постоянно обменивается между атмосферой, растениями и животными через фотосинтез, дыхание и разложение, а также между атмосферой и океаном через газообмен. Очень небольшая доля СО₂ (около 1% от выбросов от сжигания ископаемого топлива) также выбрасывается во время вулканических извержений. Эти выбросы компенсируются эквивалентным количеством, удаляемым вследствие химического выветривания горных пород.

Уровень СО₂ в 2019 году был более чем на 40% выше, чем в 19 веке. Значительная часть этого роста произошла с 1970 г., примерно в то время, когда глобальное потребление энергии резко увеличилось. Снижение доли других форм углерода (изотопов ¹⁴С и ¹³С) и небольшое снижение концентрации кислорода в атмосфере (наблюдения доступны с 1990 года) свидетельствуют, что увеличение СО₂ преимущественно обусловлено сжиганием ископаемого топлива, имеющего низкое содержание ¹³С и не содержит ¹⁴С. Вырубка лесов и другие изменения в использовании земель также повлекли за собой высвобождение углерода из биосферы, где он обычно сохраняется в течение десятилетий и веков. Дополнительный СО₂ от сжигания ископаемого топлива и вырубки лесов нарушил баланс углеродного цикла, поскольку естественные процессы, способные восстановить равновесие, слишком медленны по сравнению со скоростью, с которой человеческая деятельность добавляет СО₂ в атмосферу. В результате значительная часть СО₂, выброшенная человеком, накапливается в атмосфере, где часть его остается не только на протяжении десятилетий или веков, но и на протяжении тысяч лет. Сравнение с уровнями СО₂, измеренными в воздухе, уловленном в ледовых кернах, показывает, что нынешние концентрации значительно выше, чем по крайней мере в течение последних 800 000 лет (см. вопрос 6).



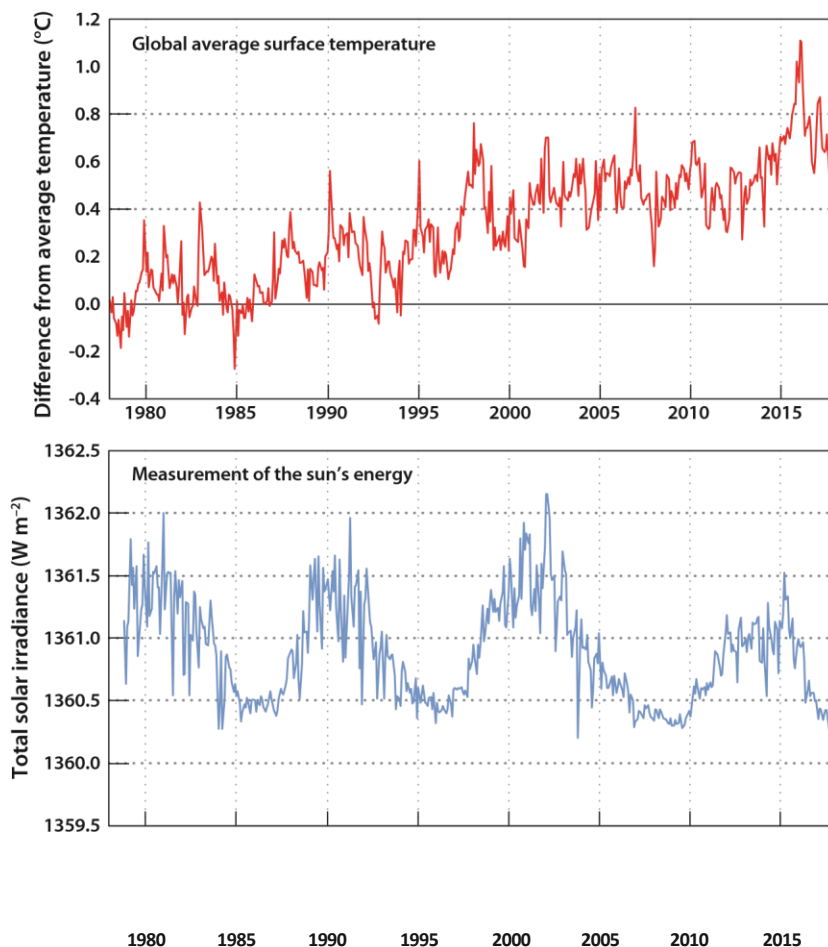
4

Какую роль сыграло Солнце в изменении климата в последние десятилетия?

Солнце является основным источником энергии, влияющим на климатическую систему Земли, однако его вариации играют очень незначительную роль в изменениях климата, наблюдаемых за последние десятилетия. Прямые спутниковые измерения, проведенные с конца 1970-х годов, не обнаруживают чистого увеличения солнечного излучения, в то время как глобальные температуры поверхности Земли продолжают расти [Рисунок 2].

Для периодов до начала спутниковых измерений знания о солнечных изменениях менее точны, поскольку они базируются на косвенных источниках, таких как количество солнечных пятен и концентрации определенных изотопов углерода или бериллия, скорость образования которых на Земле зависит от солнечной активности. Существуют доказательства того, что 11-летний солнечный цикл, во время которого энергосодержание Солнца изменяется примерно на 0,1%, может влиять на концентрацию озона, температуру и ветры в стратосфере (слой атмосферы над тропосферой обычно на высоте от 12 до 50 км в зависимости от широты и широты). Эти стратосферные изменения могут оказать незначительное влияние на климат поверхности в течение 11-летнего цикла. Однако существующие данные не указывают на существенные долгосрочные изменения солнечной энергии в течение последнего столетия, в течение которого антропогенное повышение концентрации CO₂ было главным фактором, влияющим на долгосрочное повышение глобальной температуры поверхности. Дополнительные доказательства того, что современное потепление не вызвано изменениями Солнца, можно найти в тенденциях температуры на разных высотах атмосферы (см. вопрос 5).

Рисунок 2. Измерение энергии поступающего на Землю Солнца не показывают чистого увеличения солнечного излучения за последние 40 лет, и поэтому это не может быть причиной потепления в этот период. Данные показывают лишь небольшие периодические колебания. амплитуды, связанные с 11-летним солнечным циклом. Источники: данные TSI от Physikalisch-Meteorologisches Dавос, Швейцария, по новой шкале VIRGO (1978 – середина 2018); данные о температуре за тот же период из набора HadCRUT4, Британская метеорологическая служба.



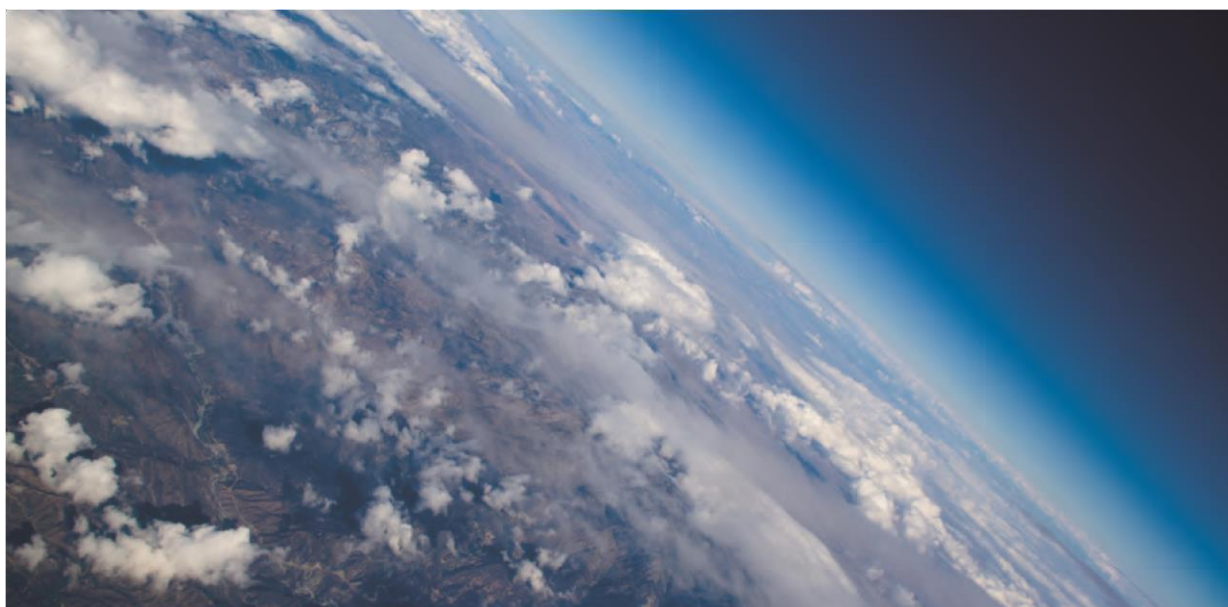
5 Как изменения в вертикальном профиле температуры атмосферы от поверхности до стратосферы свидетельствуют о причинах последних климатических изменений?

Наблюдаемое потепление в нижних слоях атмосферы и одновременное охлаждение верхних слоев дают важную информацию об основных причинах изменения климата и свидетельствуют о том, что природные факторы сами по себе не могут объяснить эти наблюдаемые изменения.

В начале 1960-х годов результаты математических и физических моделей климатической системы впервые показали, что увеличение содержания CO₂, вызванное деятельностью человека, приведет к постепенному потеплению нижних слоев атмосферы (тропосферы) и охлаждению верхних уровней (стратосферы). При этом увеличение энергии Солнца привело бы к потеплению как тропосферы, так и стратосферы по всей вертикали. В то время данных наблюдений было недостаточно, чтобы проверить это предвидение,

однако последующие измерения температуры с помощью метеорологических аэростатов и спутников подтвердили эти ранние прогнозы. Сегодня известно, что наблюдаемая в течение последних 40 лет тенденция к потеплению тропосферы и охлаждению стратосферы отвечает компьютерным моделям, что учитывают увеличение содержания CO_2 и уменьшение озона в стратосфере, вызванные деятельностью человека. Эта наблюдаемая закономерность не согласуется с чисто естественными изменениями, такими как колебания солнечной активности, вулканическая активность или естественные климатические колебания, в частности, Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Несмотря на общее соответствие между глобальными моделями и наблюдаемыми данными об атмосфере, все еще существуют разногласия. Самые заметные из них наблюдаются в тропиках, где модели показывают большее потепление тропосферы, чем было зафиксировано, и в Арктике, где наблюдаемое потепление тропосферы превышает прогнозы большинства моделей.



6

КЛИМАТ ПОСТОЯННО ИЗМЕНЯЕТСЯ. Почему климатические изменения вызывают беспокойство именно сейчас?

Все обширные климатические изменения, даже естественные, имеют разрушительные последствия. Климатические изменения в прошлом приводили к вымиранию многих видов, миграции населения и значительным изменениям в циркуляции поверхности Земли и океанов. Скорость современных климатических изменений превышает темпы большинства событий усложняющего прошлого, адаптацию как человеческих обществ, так и природной среды.

Наибольшими глобальными климатическими изменениями в недавнем геологическом прошлом Земли являются циклы ледниковых периодов (см. Инфобокс, с. В4), состоящие из длительных холодных ледниковых эпох, за которыми следуют более короткие теплые периоды [Рисунок 3]. Последние несколько таких природных циклов повторялись примерно каждые 100 000 лет. Они в основном обусловлены медленными изменениями орбиты Земли, изменяющими распределение солнечной энергии по широтам и сезонам. Однако эти орбитальные изменения в течение последних нескольких сотен лет очень незначительны и сами по себе недостаточны, чтобы повлечь за собой наблюдаемые изменения температуры со времен промышленной революции, а также не могут влиять на глобальный климат. Во время ледниковых периодов эти постепенные орбитальные изменения приводили к изменениям в размерах ледовых щитов и содержимом CO₂ и других парниковых газов, что, в свою очередь, усиливало начальные температурные изменения.

Последние оценки повышения средней глобальной температуры с конца последнего ледникового периода составляют от 4 до 5 °C (7–9 °F). Это потепление произошло в течение примерно 7000 лет, начиная с 18000 лет назад. Содержание CO₂ выросло более чем на 40% только за последние 200 лет, при этом значительная часть этого роста приходится на 1970-е годы. Это привело к изменению энергетического баланса планеты и привело к потеплению Земли примерно на 1 °C (1,8 °F). Если концентрация CO₂ будет расти бесконтрольно, к концу этого столетия или вскоре после него можно ожидать потепления такого же масштаба, как и при выходе из ледникового периода. Скорость современного потепления более чем в десять раз превышает темпы в конце ледникового периода, что является самым быстрым естественным длительным изменением глобальной температуры.



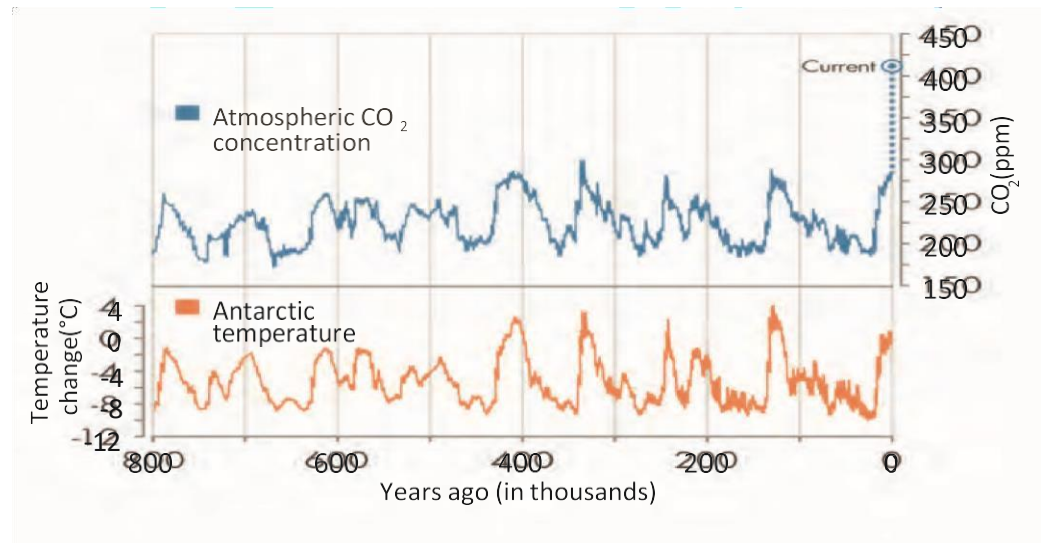
Является ли текущий уровень концентрации CO₂ безработным в истории Земли?

Нынешний уровень концентрации CO₂ в атмосфере почти наверняка беспрецедентен за последний миллион лет, в течение которого эволюционировали современные люди и формировались общества. В то же время концентрация CO₂ в далеком прошлом (многие миллионы лет назад) была еще выше, причем палеоклиматические и геологические данные свидетельствуют, что тогда температуры и уровень моря также превышали современные.

Измерения воздуха в ледовых кернах показывают, что за последние 800 000 лет до 20 века концентрация CO₂ в атмосфере оставалась в пределах от 170 до 300 частей на миллион (ppm), что делает особенно заметным ее быстрый рост до более 400 ppm за последние 200 лет [Рис.3] В течение ледниковых циклов последних 800 000 лет CO₂ и метан выступали

важными усилителями климатических изменений, вызванных орбитальными колебаниями Земли вокруг Солнца. Когда Земля начала нагреваться после последнего ледникового периода, температура и уровень CO_2 начали повышаться примерно одновременно и продолжали расти параллельно примерно с 18 000 до 11 000 лет назад. Изменения температуры, циркуляции, химии и биологии океана способствовали высвобождению CO_2 в атмосферу, что в сочетании с другими обратными связями привело к еще большему потеплению на Земле. Для более ранних геологических периодов концентрации CO_2 и температуры определялись менее прямыми методами. Данные свидетельствуют, что концентрация CO_2 последний раз приближалась к 400 ppm примерно 3–5 миллионов лет назад, когда средняя глобальная температура поверхности, по оценкам, была на 2–3,5 °C выше, чем в доиндустриальный период. Приблизительно 50 миллионов лет назад концентрация CO_2 могла достигать 1000 ppm, а средняя глобальная температура была, вероятно, около 10 °C выше современной. При таких условиях на Земле было мало льда, а уровень моря был по меньшей мере на 60 метров выше современного.

Рисунок 3. Данные из ледовых кернов использованы для реконструкции температур в Антарктике и концентраций CO_2 за последние 800 000 лет. Температура определена на основе измерений изотопного состава воды в ледовом керне Купола С. Концентрацию CO_2 измеряют в сохранившемся во льду воздухе на основе образцов из кернов Купола С и Станции Восток. Текущая концентрация CO_2 (обозначенная синей точкой) определена по прямым атмосферным измерениям. Циклические колебания температуры формируют ледниково-межледниковые циклы. При этих циклах изменения концентрации CO_2 (синим цветом) тесно совпадают с изменениями температуры (оранжевым цветом). Как показывают данные, современный рост концентрации CO_2 в атмосфере является беспрецедентным за последние 800 000 лет. В 2016 году уровень CO_2 превысил 400 ppm, а среднее значение в 2019 году составило более 411 ppm. Источник: адаптирован с рисунка Джереми Шакуна; данные из Lüthi et al., 2008 и Jouzel et al., 2007.



Существует ли предел, после которого дальнейший рост выкидышей CO₂ перестанет вызывать потепление?

Нет. Увеличение концентрации CO₂ в атмосфере будет продолжать вызывать повышение температуры поверхности Земли. Хотя рост уровня CO₂ постепенно становится менее эффективным в поглощении дополнительного количества тепловой энергии, каждое новое увеличение концентрации все равно ведет к дальнейшему нагреву климатической системы. Таким образом, даже при уменьшении эффекта на единицу выбросов, общее потепление будет продолжаться с ростом объема CO₂ в атмосфере.

Наше понимание физических процессов, посредством которых CO₂ влияет на энергетический баланс Земли, подтверждается как лабораторными измерениями, так и подробными спутниковыми и наземными наблюдениями за излучением и поглощением инфракрасной энергии атмосферой. Парниковые газы поглощают часть инфракрасной энергии, излучаемой Землей в определенных диапазонах сильного поглощения — на определенных длинах волн. Различные газы поглощают энергию на разных длинах волн. CO₂ имеет самую мощную полосу удержания тепла, сосредоточенную вблизи длины волны 15 микрометров (миллионных частиц метра), с поглощением, которое распространяется на несколько микрометров в обе стороны. Есть также бесчисленные более слабые полосы поглощения. Когда концентрация CO₂ в атмосфере растет, поглощение в центре главного диапазона уже настолько насыщено, что оно лишь незначительно влияет на дальнейшее потепление. Однако дополнительная энергия поглощается в более слабых полосах и на краях основного диапазона, что приводит к дальнейшему нагреву поверхности и нижним слоям атмосферы.

Изменяется ли темп потепления из десятилетия в десятилетие?

Да. Наблюдаемая скорость потепления изменялась от года к году, от десятилетия до десятилетия и в разных регионах года к году, от десятилетия до десятилетия и в разных регионах мира, что согласуется с нашим климатическим пониманием системы. Такие краткосрочные колебания в основном обусловленные природными факторами и не противоречат фундаментальному пониманию того, что долгосрочная тенденция к потеплению в основном вызвана ростом уровней CO₂ и других парниковых газов в атмосфере.

Несмотря на постоянный рост уровня CO₂ в атмосфере, что приводит к постепенному потеплению поверхности Земли, существует много естественных факторов, модулирующих этот долгосрочный процесс. Большие извержения вулканов увеличивают количество мелких частиц в стратосфере, отражающих солнечный свет, вызывая кратковременное охлаждение поверхности продолжительностью обычно два-три года, после чего наступает постепенное восстановление. Циркуляция и перемешивание океанских вод естественно изменяются на разных временных масштабах, что приводит к колебаниям температуры поверхности моря и изменениям в скорости переноса тепла в более глубокие слои океана. Например, тропическая часть Тихого океана периодически переходит между более теплой фазой Эль-Ниньо и более прохладной фазой Ла-Нинья с интервалом от двух до семи лет. Ученые исследуют различные типы климатических колебаний – от десятилетних до многолетних – в Тихом и Северном Атлантическом океанах. Каждый из этих типов имеет свои характерные особенности. Такие океанические колебания приводят к значительным региональным и глобальным изменениям температуры и режима осадков, что подтверждается наблюдениями. На изменение темпов потепления от десятилетия до десятилетия могут влиять и антропогенные факторы, в частности, колебания в выбросах парниковых газов и аэрозолей — мелких частиц в воздухе, которые способны вызывать как потепление, так охлаждение.

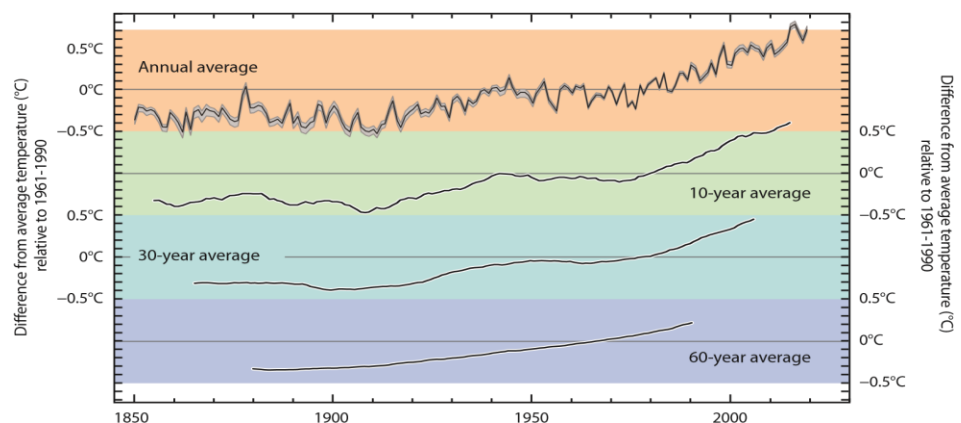
Основными источниками таких выбросов есть угольные электростанции и другие виды промышленного загрязнения.

Эти колебания температурных тенденций отчетливо прослеживаются в наблюдаемых температурных данных [Рисунок 4]. Краткосрочные естественные климатические колебания могут влиять на долгосрочные антропогенные изменения климата и наоборот, поскольку климатические процессы в различных пространственных и временных масштабах способны взаимодействовать между собой. Именно поэтому прогнозы изменения климата осуществляют с помощью климатических моделей (см.Инфобокс,с.20), которые учитывают разные типы климатических колебаний и их взаимодействие. Надежные выводы об антропогенных изменениях климата можно делать только с учетом долгосрочной перспективы, используя данные, охватывающие многие десятилетия.

Рисунок 4. Климатическая система претерпевает изменения от года к году и от десятилетия до десятилетия. Для формирования надежных выводов относительно антропогенных изменений климата обычно необходимо использовать многодесятилетние или еще более длительные ряды наблюдений. Усреднение данных за столь долгие временные периоды позволяет более четко проследить долгосрочные тенденции. На графике представлена средняя глобальная температура за период 1850–2019 гг. (по данным Британского метеорологического бюро, относительно среднего значения за 1961-1990 гг.).

Верхний график показывает средние значения и диапазон неопределенности для среднегодовых данных. Второй график иллюстрирует среднегодовую температуру, усредненную

за 10 лет, начиная с любой даты. Третий график показывает аналогичные данные, усредненные за 30 лет, а четвертый – за 60 лет. Источник: Hadley Centre Met Office, на основе данных HadCRUT4 от Met Office и Climatic Research Unit (Morice et al., 2012).



10 Свидетельствует ли замедление потепления в 2000-х в начале 2010-х о прекращении климатических изменений?

Нет. После аномально теплого 1998 года, вызванного мощным явлением Эль-Ниньо 1997-1998 годов, темпы повышения средней температуры поверхности временно замедлились по сравнению с предыдущим десятилетием быстрого потепления. Однако даже при этом замедлении 2000-е годы оставались теплее 1990-х. Период временной стабилизации завершился резким повышением температур между 2014 и 2015 годами, после чего все годы с 2015 по 2019 были более теплыми, чем любой предыдущий год за всю историю замедление не опровергает научного понимания долговременного антропогенного потепления вызванного ростом Концентрации парниковых газов.

Десятилетие с замедленным или, напротив, ускоренным потеплением является естественной частью колебаний климатической системы. Такие периоды — более холодные или более теплые относительно общей долгосрочной тенденции — прослеживаются как в наблюдениях за последние 150 лет, так и в результатах климатических моделей. Поскольку атмосфера содержит сравнительно немного тепла, температура поверхности может изменяться довольно быстро под влиянием перераспределения тепловой энергии в других компонентах климатической системы (например, океане) и под действием внешних факторов, таких как извержение вулканов, выбрасывающих частицы в верхние слои атмосферы.

Более 90% тепла, поступившего в климатическую систему Земли за последние десятилетия, было поглощено океанами и постепенно проникает в глубокие слои воды. Когда тепло погружается в океанские глубины, это временно замедляет повышение температуры на поверхности Земли и в атмосфере, однако не изменяет общей долгосрочной тенденции потепления, обусловленной накоплением CO₂. К примеру, современные исследования свидетельствуют, что во время теплых фаз Эль-Ниньо часть тепла переходит из океана в атмосферу, тогда как во время холодных фаз Ла-Нинья больше тепла погружается в океанские глубины. Такие процессы повторяются циклически в течение десятилетий и даже веков. Показательным примером является мощное явление Эль-Ниньо 1997–1998 годов, когда средняя глобальная температура воздуха достигла рекордных значений XX века из-за интенсивной передачи тепла от океана к атмосфере, главным образом путем испарения. Навіть у періоди уповільнення зростання середньої температури поверхні Землі довгострокова тенденція до потепління продовжувалася (див. рисунок 4). Да, именно в это время фиксировались рекордные тепловые волны: в Европе – летом 2003 года, в России – летом 2010 года, в США – в июле 2012 года, и в Австралии – в январе 2013 года. Каждое из последних

четырёх десятилетий было теплее любого предыдущего десятилетия с момента начала систематических термометрических наблюдений в 1850-е годы. Длительные последствия глобального потепления проявляются в росте теплового содержания океанов, повышении уровня моря, а также устойчивом таянии арктического морского льда, ледников и ледяного покрова Гренландии.

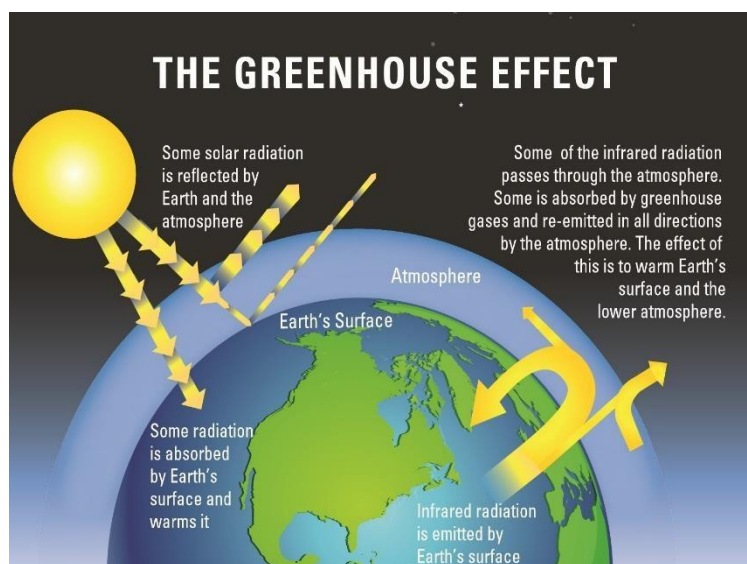
О с н о в ы Изменений климата

Парниковые газы влияют на энергетический баланс и климат земли

Солнце является основным источником энергии для климатической системы Земли. Часть солнечного света отражается обратно в космос, особенно светлых поверхностей, таких как лед и облака, а остальные поглощаются поверхностью и атмосферой. Значительная часть поглощенной солнечной энергии излучается в виде теплового (длинноволнового или инфракрасного) излучения. Атмосфера в свою очередь поглощает и излучает тепло, часть которого выходит в космос. Любое нарушение этого баланса поступающей и исходящей энергии влияет на климат. Например, даже небольшие изменения в солнечном излучении оказывают непосредственное влияние на этот энергетический баланс.

Если бы вся тепловая энергия, излучаемая с поверхности Земли, сразу выходила в космос без влияния атмосферы, средняя температура поверхности была бы на десятки градусов ниже, чем сейчас. Парниковые газы в атмосфере – в частности водяной пар, углекислый газ, метан и закись азота – делают поверхность значительно теплее, поскольку они поглощают и излучают тепловую энергию по всем направлениям, включая вниз, поддерживая тепло на поверхности и в нижних слоях атмосферы [Рисунок Б1]. Без этого парникового эффекта жизнь, которую мы знаем, не могла бы существовать на нашей планете. Увеличение количества парниковых газов делает атмосферу более эффективной в сдерживании тепла от выхода в космос. Когда энергия, покидающая Землю, становится меньше поступающей энергии, планета нагревается до установления нового баланса.

Рисунок 3. Рисунок В1.
Парниковые газы в атмосфере — водяной пар, углекислый газ, метан и закись азота — поглощают тепловую энергию и излучают ее по всем направлениям, включая поддерживая тепло на поверхности Земли и в нижних слоях атмосферы. Увеличение концентрации парниковых газов усиливает этот эффект, производя поверхность и нижняя атмосфера еще теплее. Изображение создано на основе рисунка Агентства по охране окружающей среды США.



Выбрасываемые в результате деятельности человека парниковые газы изменяют энергетический баланс Земли и, соответственно, ее климат. Люди также влияют на климат, изменяя характер поверхности земли (например, вырубая леса для сельского хозяйства) и выбросы загрязняющих веществ, которые влияют на количество и тип частиц в атмосфере. Ученые установили, что с учетом всех человеческих и природных факторов климатический баланс Земли изменился в сторону потепления, причем наибольший вклад в это имеет увеличение выбросов CO₂.

Человеческая деятельность повлекла за собой рост концентрации парниковых газов в атмосфере

Концентрация углекислого газа, метана и закиси азота в атмосфере возросла с начала промышленной революции. Так, средняя концентрация CO₂, измеренная в обсерватории Мауна-Лоа на Гавайях, поднялась с 316 частей на миллион (ppm) в 1959 г. (первый полный год имеющихся данных) до более 411 ppm в 2019 г. [Рисунок В2]. Подобный рост наблюдался на многих других станциях по всему миру. По сравнению с доиндустриальным периодом концентрация CO₂ в атмосфере увеличилась более чем на 40%, метана — более на 150%, а оксида азота — примерно на 20%. Более половины прироста CO₂ вышло после 1970 года. Рост концентрации всех трех газов способствует глобальному потеплению, причем самый большой вклад в него имеет CO₂. Подробнее об антропогенных источниках парниковых газов см. на странице В3.

Ученые исследовали парниковые газы в контексте прошлого. Анализ воздуха, накапливавшийся со временем в Антарктиде, показывает, что концентрация CO₂ начала резко возрастать в 19 веке [Рисунок В3], после того как в течение предыдущих 10 000 лет она держалась в пределах 260-280 ppm. Данные ледовых кернов, охватывающие последние 800 000 лет, свидетельствуют, что в течение этого периода концентрация CO₂ оставалась в диапазоне 170-300 ppm во время многих циклов.

«ледникового периода» (см. инфобокс, стр. В4), и ни разу не превышала 300 ppm до последних 200 лет

Рисунок В2. Измерения концентрации атмосферного CO₂ с 1958 года, выполненные на обсерватории Мауна-Лоа (Гавайи, черная линия) и Южном полюсе (красная линия), демонстрируют стабильный ежегодный рост CO₂. Измерения производятся в отдаленных регионах, где локальные процессы минимально влияют на концентрацию газа, что делает эти данные репрезентативными для фоновой атмосферы. Небольшие сезонные колебания отражают изменения в поглощении и выбросах CO₂ растениями. Источник: Программа Скриппса по изучению CO₂.

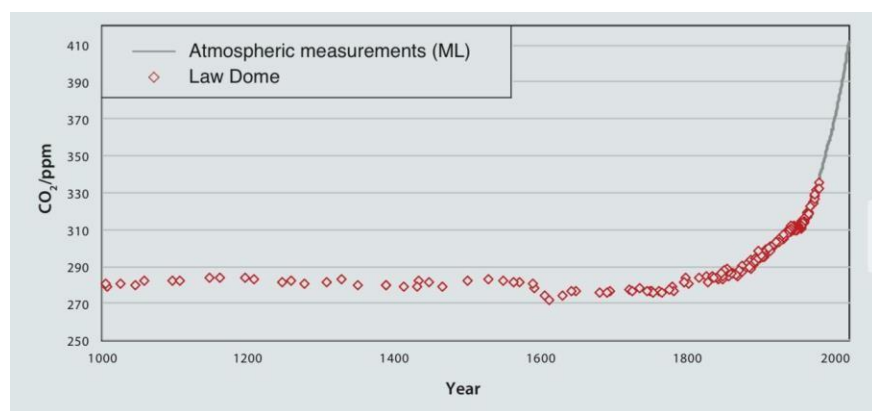
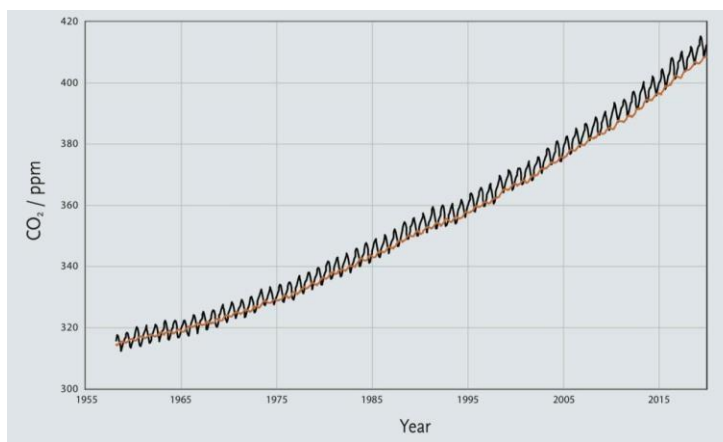


Рисунок В3. Изменения концентрации CO₂ за последние 1000 лет, определенные по анализу воздуха, захваченного в ледовом керне из Антарктиды (красные квадраты), показывают резкий рост атмосферного CO₂, начиная с конца 19 века. Современные атмосферные измерения по обсерватории Мауна-Лоа наложены серым цветом для сравнения. Источник: рисунок Эрика Вольфа, данные Etheridge et al., 1996; Макфарлинг Мюр и др., 2006; Программа Скриппса по изучению CO₂.

Узнайте об источниках парниковых газов, выбрасываемых человеком:

- Углекислый газ (CO_2) поступает как из природных, так и из антропогенных источников, но его концентрация растет прежде всего из-за сжигания ископаемого топлива, производства цемента, вырубки лесов (что уменьшает поглощение CO_2 деревьями и увеличивает выбросы CO_2 при разложении органических остатков) и другие изменения в использовании земель. Увеличение выбросов CO_2 является основным фактором глобального потепления.
- Метан (CH_4) поступает как из природных, так и из антропогенных источников, и его концентрация значительно выросла с доиндустриальных времен через деятельность человека, такую как выращивание скота, культивация риса, заполнение мусорных свалок и использование природного газа (часть которого может высвобождаться при добыче, транспортировке и потреблении).
- Концентрация закиси азота (N_2O) возросла в первую очередь из-за сельскохозяйственной деятельности, в частности использования азотных удобрений, а также из-за изменений в землепользовании.
- Галогенуглероды, включая хлорфторуглероды (ХФУ), используются как хладагенты и огнезащитные вещества. Они являются мощными парниковыми газами и разрушают озоновый слой. Хотя производство большинства ХФУ в настоящее время запрещено и их влияние начинает уменьшаться, многие заменители ХФУ также являются сильными парниковыми газами, и их концентрация вместе с концентрацией других галогенуглеродов продолжает расти.

Измерения изотопного состава углерода в современной атмосфере демонстрируют четкий след «старого» углерода (с низким содержанием природного радиоактивного ^{14}C), который происходит от сжигания ископаемого топлива, в отличие от «нового» углерода, поступающего от живых систем. Кроме того, известно, что человеческая деятельность (за исключением изменений в землепользовании) сейчас выбрасывает около 10 миллиардов тонн углерода ежегодно, главным образом из-за сжигания ископаемого топлива, что более чем достаточно для объяснения наблюдаемого роста концентрации CO_2 .

Все эти доказательства вместе убедительно свидетельствуют о том, что увеличение концентрации CO_2 в атмосфере обусловлено деятельностью человека

Климатические данные свидетельствуют о тенденции к потеплению.

Чтобы оценить повышение средней глобальной температуры поверхности воздуха, анализируется множество измерений со всего мира — с наземных станций, кораблей и спутников. Несмотря на сложности при объединении этих данных, несколько независимых исследовательских групп пришли к одному и тому же выводу: с 1900 средняя глобальная температура поверхности воздуха выросла примерно на 1°C ($1,8^\circ\text{F}$) [Рисунок В4]. Хотя наблюдаются отдельные периоды замедления или ускорения потепления, каждое из последних четырех десятилетий было теплее любого предыдущего десятилетия со времени начала инструментальных наблюдений в 1850 году.



Узнайте о ледниковых периодах:

Подробный анализ океанических отложений, ледовых кернов и других данных показывает, что по крайней мере за последние 2,6 миллиона лет Земля переживала длительные

холодные периоды, когда большие территории Северного полушария были покрыты толстыми слоями льда. Эти длительные ледниковые циклы, длившиеся около 100 000 лет, прерывались более короткими теплыми «межледниковыми» периодами, включая последние 10 000 лет.

Благодаря сочетанию теории, наблюдений и моделирования ученые пришли к выводу, что ледниковые периоды вызваны периодическими изменениями орбиты Земли, которые

прежде всего, изменяют региональное и сезонное распределение солнечной энергии, которая достигает планеты. Эти относительно небольшие колебания солнечного излучения

постепенно усиливаются на протяжении тысячелетий благодаря изменениям в ледовом покрове Земли (криосфере),

особенно над Северным полушарием, а также в составе атмосферы, что в конечном итоге приводит к значительным изменениям глобальной температуры. Среднее глобальное колебания температуры во время ледникового цикла оцениваются примерно в 5°C $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ($9 \pm 2^{\circ}\text{F}$).

* Обратите внимание, что с геологической точки зрения Земля находится в ледниковом период уже около 36 миллионов лет, когда сформировался значительный ледниковый щит. Однако в этом документе мы используем термин в более разговорном смысле, имея в виду регулярное появление больших ледниковых щитов над Северной Америкой и Северной Евразией.

Если в таких материалах, как годовые кольца деревьев, ледовые керны и морские отложения, воспроизводят давние температуры. Сравнение этих опосредованных измерений с современными термометрическими данными показывает, что период с начала 1980-х годов является самым теплым 40-летним промежутком за последние восемь веков. Глобальная температура достигла пиковых значений, которые последний раз наблюдались 5–10 тысяч лет назад в самой теплой фазе нашего современного межледникового периода. Многие другие последствия потепления стали очевидными в последние годы: летний арктический морской ледяной покров значительно сократился; теплоемкость океана возросла; средний глобальный уровень моря поднялся примерно на 16 см (6 дюймов) с 1901 года из-за теплового расширения воды и добавления талой воды из ледников и ледяных щитов на суше. Потепление и изменения осадков влияют на географический ареал многих видов растений и животных и сроки их жизненных циклов.

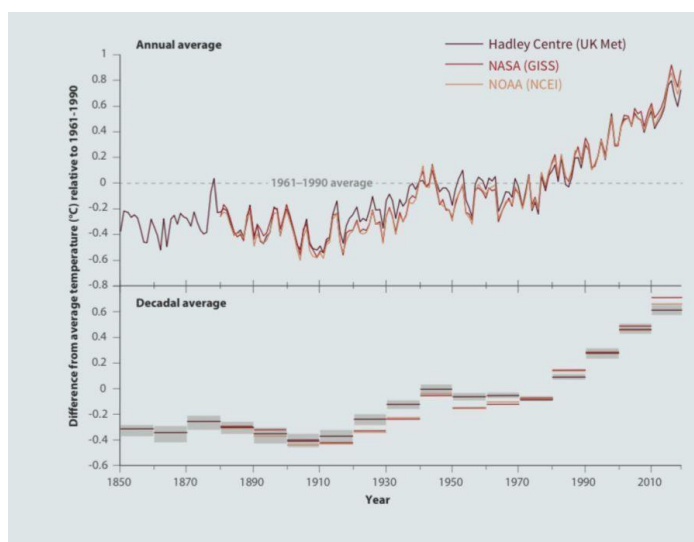


Рисунок В4. Средняя глобальная температура поверхности Земли неуклонно растет, что видно на графике, демонстрирующем объединенные измерения температуры на суше и океане с 1850 по 2019 год. Данные получены на основе трех независимых анализов имеющихся наборов наблюдений. На верхней панели представлены среднегодовые значения температуры каждого анализа, а на нижней панели — среднее десятилетние значения, где также показан диапазон неопределенности (серые полосы) для набора данных HadCRUT4. Все изменения температуры приведены относительно среднего глобального значения за базовый период 1961–1990 годов. Источник: NOAA Climate.gov, на основе данных IPCC ARs, полученных от Британской метеорологической службы Hadley Centre (бордовый цвет), Goddard Institute for Space Studies (NASA, США) (красный цвет), National Centers for Environmental Information (NOAA, США) (оранжевый цвет).

Наш климат формируется под влиянием многих сложных действий.

Исходя только из физических свойств CO_2 , удвоение его концентрации в атмосфере по сравнению с доиндустриальным уровнем (до примерно 560 ppm) приведет к повышению средней глобальной температуры примерно на 1°C ($1,8^\circ\text{F}$). Однако в реальной климатической системе ситуация более сложная: первоначальное потепление запускает обратные связи, которые могут усиливать или ослаблять этот эффект.

Важнейшие обратные связи в климатической системе связаны с водой. Более теплая атмосфера содержит больше водяного пара, который является мощным парниковым газом и влечет за собой дополнительное потепление. Через короткий срок существования водяных паров в атмосфере ее концентрация в основном реагирует на потепление, поэтому она усиливает, а не инициирует климатические изменения. В полярных регионах повышение температур приводит к таянию морского льда и уменьшению снежного покрова, обнажая более темную поверхность океана и суши, которая поглощает больше тепла и дополнительно повышает температуру. Еще одна важная, но менее понятная обратная связь касается облаков. Потепление и увеличение водяного пара могут изменять количество, высоту и свойства облаков, что может либо усиливать, либо ослаблять потепление. Современные оценки показывают, что в целом смены облаков, вероятно, усиливают глобальное потепление.

Океан смягчает последствия изменения климата, выступая огромным тепловым резервуаром. Из-за того, что теплая вода обычно остается у поверхности, нагреть океан во всю глубину трудно, и скорость передачи тепла в более глубокие слои медленна. Она меняется от года к году и от десятилетия до десятилетия и в значительной степени определяет темпы потепления на поверхности. К 1970 году наблюдения за подводными слоями были ограничены, но с тех пор четко видно потепление верхних 700 м (2300 футов), а с 1990 года наблюдается потепление и на больших глубинах. Температура поверхности и количество осадков в большинстве регионов значительно отличаются от глобальных средних значений из-за географического расположения, включая широту и положение на континентах. На средние значения температуры, осадков и их экстремальные проявления (обычно влияющие на природные системы и инфраструктуру) также сильно влияют местные ветровые условия.

Для оценки последствий обратных связей, скоростей потепления и региональных изменений климата используются математические модели атмосферы, океана, суши и ледникового покрова (криосферы). Они базируются на законах физики и современных знаниях о влияющих на климат физических, химических и биологических процессах и выполняются на мощных компьютерах. Хотя модели дают разные прогнозы относительно ожидаемого дополнительного потепления (в зависимости от типа модели и предположений относительно процессов, таких как образование облаков или циркуляция океана), все они сходятся в том, что общий эффект обратных связей усиливает потепление.

Деятельность человека изменяет климат.

Тщательный анализ всех имеющихся данных и улики показывает, что большую часть глобального потепления за последние 50 лет нельзя объяснить природными факторами, что означает значительную роль человеческой деятельности в этом процессе.

Чтобы определить влияние человека на климат, ученые учитывают многочисленные естественные колебания, влияющие на температуру, количество осадков и другие климатические показатели от местного до глобального масштаба, во временных масштабах от дней до десятилетий и дольше. Одним из таких колебаний является южное колебание Эль-Ниньо (ENSO) — нерегулярное чередование потепления и похолодания (продолжительностью от двух до семи лет) в экваториальной части Тихого океана, что вызывает значительные региональные и глобальные изменения температуры и осадков ежегодно. Вулканические извержения также влияют на климат, частично увеличивая количество мелких аэрозольных частиц в стратосфере, которые отражают или поглощают солнечный свет, что приводит к кратковременному охлаждению поверхности в течение примерно двух-трех лет. В течение сотен тысяч лет медленные повторяющиеся изменения орбиты Земли вокруг Солнца изменяют распределение солнечной энергии на планете, были достаточными для возникновения циклов ледниковых периодов за последние 800 000 лет.

«Отпечатки пальцев» — это мощный метод исследования причин изменения климата. Различные факторы воздействия на климат оставляют разные закономерности в климатических записях. Это особенно заметно, когда ученые анализируют не только среднюю температуру планеты, но и географические и временные закономерности ее изменения. Например, увеличение энергии, поступающей от Солнца, влечет за собой совсем другие пространственные и вертикальные закономерности изменения температуры по сравнению с вызванными ростом концентрации CO₂.

Узнайте больше об антропогенных причинах изменения климата:

Помимо воздействия на излучение тепла с поверхности Земли и отражения солнечного света обратно в космос, деятельность человека изменяет энергетический баланс планеты и влажность регионов. Например:



- Выбросы загрязняющих веществ (кроме парниковых газов). Некоторые промышленные процессы образуют аэрозоли — мелкие капли или зависающие в атмосфере частицы. Большинство аэрозолей охлаждают Землю, отражая солнечный свет обратно в космос. Некоторые аэрозоли также влияют на образование облаков, что может приводить как к потеплению, так и охлаждению в зависимости от их типа и расположения.
- Частицы черного углерода («сажа»), возникающие при сжигании ископаемого топлива или растительности, обычно вызывают потепление, поскольку поглощают солнечное излучение.
- Изменения в использовании земель. Превращение лесов, сельскохозяйственных угодий или городов изменяет отражательную способность поверхности, что может вызвать как локальное потепление, так и охлаждение. Изменения в использовании земель. Превращение лесов, сельскохозяйственных угодий или городов изменяет отражательную способность поверхности, что может вызвать как локальное потепление, так и охлаждение.



Наблюдаемые изменения температуры атмосферы имеют характер, значительно ближе к долгосрочному повышению уровня CO_2 , чем к колебаниям, вызванным только солнечной активностью. Ученые регулярно проверяют, могут ли исключительно природные факторы — изменения солнечной активности, вулканическая деятельность или внутренняя изменчивость климата — правдоподобно объяснить наблюдаемые закономерности в разных аспектах климатической системы. Результаты этих исследований показывают, что климатические изменения последних десятилетий нельзя объяснить только природными факторами.

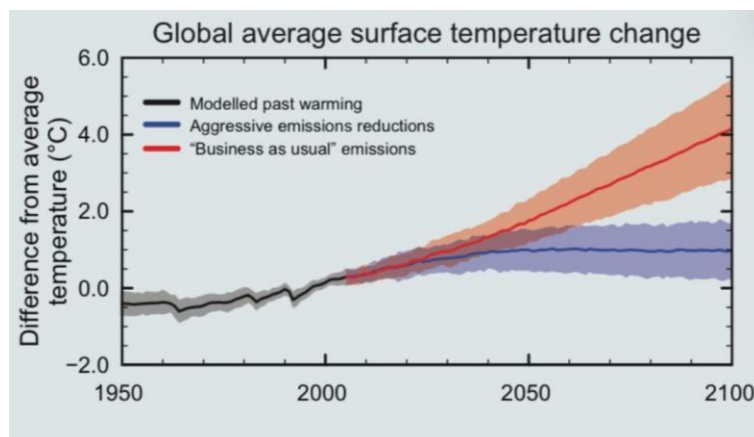
Как изменится климат в будущем?

Ученые достигли значительного прогресса в наблюдениях, теоретическом анализе и моделировании климатической системы Земли, что позволяет более уверенно прогнозировать будущие изменения климата. Однако несколько факторов усложняют точное предсказание того, как глобальные и региональные температурные тенденции будут развиваться десятилетиями вперед. Во-первых, невозможно точно предсказать, сколько CO_2 будет выброшено в атмосферу в результате деятельности человека, поскольку это зависит от экономического развития мира, изменений в производстве и потреблении энергии и других социальных факторов в ближайшие десятилетия. Во-вторых, из-за сложности механизмов климатических обратных связей существует широкий спектр возможных результатов даже для конкретного

сценария выбросов CO₂. В-третьих, естественная изменчивость климата в течение десятилетий может модулировать эффекты основной тенденции.

изменения температуры. В общем, все климатические модели сходятся в том, что Земля будет продолжать существенно нагреваться в течение ближайших десятилетий и веков. Если не будут осуществлены технологические или политические изменения для уменьшения выбросов от нынешнего уровня, в 21 веке ожидается дальнейшее глобальное потепление на 2,6–4,8 °C (4,7–8,6 °F) дополнительно к уже существующему [рисунок В5]. Прогнозирование того, как эти изменения повлияют на климат в конкретных регионах, является сложной задачей, но оценки становятся более точными благодаря развитию региональных и местных моделей.

Рисунок В5. Ожидаемая величина и скорость глобального потепления в 21 веке зависят от общего объема выбрасываемых человечеством парниковых газов. На графике показаны два сценария: неизменные выбросы (красная линия) и агрессивное сокращение выбросов почти до нулевого уровня в течение 50 лет (синяя линия). Черная линия отображает моделируемую оценку прошлого потепления. Каждая сплошная линия представляет среднее значение результатов различных моделей для одного сценария, а окрашенные области отражают разброс (одно стандартное отклонение) между прогнозами разных моделей. Все данные сравниваются с базовым периодом 1986–2005 годов (определенным как ноль). Источник: на основе IPCC AR6



Если планета в целом потеплела, почему отдельные зимы

Глобальное потепление отражает долгосрочную тенденцию, но не гарантирует, что каждый год будет теплее предыдущего. Привычные колебания погоды продолжают вызывать единичные холодные дни, ночи, зимы и лета, даже на фоне общего потепления.

Изменение климата влияет не только на среднюю глобальную температуру поверхности, но и на атмосферную циркуляцию, природные климатические колебания и погодные условия. Например, явления Ла-Нинья меняют погодные модели, делая некоторые регионы более влажными, при этом влажные лета обычно прохладнее. Более сильные ветры из полярных районов могут вызвать периодическое похолодание зимой. Аналогично, определенные фазы Североатлантической осцилляции способствовали нескольким последним холодным зимам в Европе, на востоке Северной Америки и в северной Азии.

Потепление Земли изменяет атмосферные и океанические циркуляции, влияя на траектории штормов и другие явления погоды. Глобальное потепление увеличивает возможность теплых дней и сезонов и уменьшает возможность прохладных. К примеру, в 1960-х годах в континентальных США ежедневно чаще фиксировали рекордно низкие температуры, тогда как в 2000-х рекордно высоких температур было вдвое больше, чем рекордно низких. Кроме того, в последние десятилетия частота тепловых волн выросла в Европе, Азии, Южной Америке и Австралии, а тепловые волны в океанах также становятся более распространенными.



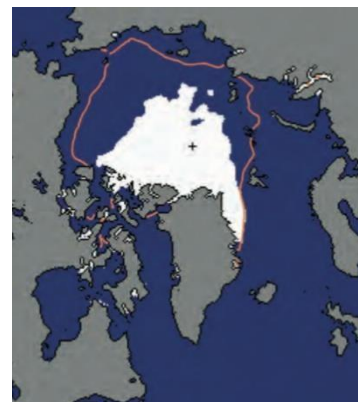
Почему арктический морской лед уменьшается, тогда как антарктический морской лед почти не меняется?

Площадь морского льда определяют ветры, океанские течения и температура. В Северном Ледовитом океане морской лед, частично замкнутый по суше, непосредственно реагирует на потепление. А в Антарктике изменения морского льда в основном обусловлены изменениями ветров и океанских течений, а не прямым нагревом.

Некоторые отличия в сезонной площади морского льда между Арктикой и Антарктикой объясняются их географическим положением и влиянием на атмосферную и океаническую циркуляцию. Арктика – это океанический бассейн, почти полностью окруженный континентами, тогда как Антарктида – континент, окруженный океаном. В Арктике морской лед ограничен сушей, а в Южном океане он может свободно распространяться в окружающие воды, причем его южный предел определяется береговой линией Антарктиды. Поскольку антарктический морской лед формируется на широтах более близких к экватору, летом его остается меньше. Размер морского льда меняется сезонно на обоих полюсах, но долгосрочные тенденции отличаются, отчасти из-за этих географических особенностей.

С конца 1970-х годов арктический морской лед резко сократился, особенно летом и осенью. С момента спутниковых наблюдений с 1978 года ежегодная минимальная площадь арктического льда (в сентябре) уменьшилась примерно на 40 % (рисунок 5). Каждую зиму лед восстанавливается, но становится тоньше. Оценки прошлого объема льда свидетельствуют, что такое сокращение может быть беспрецедентным, по крайней мере, за последние 1450 лет. Поскольку морской лед сильно отражает солнечный свет, его уменьшение усиливает потепление, потому что темная поверхность океана поглощает больше энергии.

РИСУНОК 5. Летняя площадь арктического морского льда в 2012 году (измеренная в сентябре) была рекордно низкой (отмечена белым цветом) по сравнению со средней летней площадью за период 1979-2000 годов (оранжевый контур). В 2013 году площадь морского льда несколько восстановилась, но оставалась шестой по величине за всю историю наблюдений. В 2019 году площадь льда фактически сравнялась со вторым самым низким минимумом по данным спутниковых наблюдений, вместе с 2007 и 2016 годами, уступая лишь 2012, который до сих пор остается рекордным минимумом. Из 13 самых низких показателей площади арктического льда за всю историю спутниковых наблюдений 13 приходится на последние 13 лет. Источник: Национальный центр данных о снеге и ледниковом покрове.



В Антарктике общая площадь морского льда с 1979 по 2014 несколько возросла, хотя на западе Антарктического полуострова наблюдалось сокращение. Краткосрочные изменения могут быть

следствием естественной изменчивости атмосферы, океана и ледовой системы. Изменения в структуре поверхностных ветров и добавление холодной пресной воды от таяния шельфовых ледников также влияло на лед. После 2014 года антарктический морской лед начал сокращаться, достигнув рекордно низкого уровня в 2017 году и оставаясь низким в течение следующих двух лет.

13 Каким образом изменения климата влияют на интенсивность и частоту наводнений, засух, ураганов и торнадо?

Выбросы парниковых газов, вызванные деятельностью человека, делают нижнюю атмосферу Земли более теплой и влажной, что повышает энергию штормов и экстремальных погодных явлений. Как ожидается, явления, тесно связанные с температурой, такие как жаркие волны и чрезвычайно жаркие дни, становятся более вероятными. Кроме того, сильные дожди и снегопады, повышающие риск наводнений, также встречаются чаще.

По мере глобального потепления погодные явления становятся более частыми и интенсивными. Ученые считают погодные явления экстремальными, если они отличаются от 90–95% подобных явлений в том же регионе за предыдущие годы. На каждое экстремальное явление влияет много факторов, в частности естественные колебания климата, например Эль-Ниньо и Ла-Нинья, что затрудняет прямую связь конкретного явления с деятельностью человека. Однако исследования позволяют оценить, сделало ли его потепление климата более вероятным или серьезным.

Повышение температуры способствует усилению жарких волн и увеличивает вероятность жарких дней и ночей. Согретая атмосфера и увеличенное испарение на суше усугубляют засухи, создают более благоприятные условия для лесных пожаров и продлевают их сезон. Потепление также связано с более интенсивными осадками, ведь более теплый воздух может содержать больше влаги. Явления Эль-Ниньо приводят к засухам во многих тропических и субтропических регионах, тогда как Ла-Нинья делает некоторые районы более влажными. Во время глобального потепления эти колебания становятся экстремальнее.

Более теплая атмосфера и океаны повышают вероятность того, что сильнейшие ураганы будут интенсивнее, принесут больше осадков, охватят новые территории и могут быть большими и длительными, что подтверждается наблюдениями в

Северной Атлантике. Повышение уровня моря увеличивает объем воды, что выталкивается на берег во время прибрежных штормов, и вместе с более интенсивными осадками вызывает более разрушительные штормовые приливы и наводнения. Хотя глобальное потепление, вероятно, ураганы сильнее, изменения в их количестве ежегодно остаются неопределенными и являются предметом активных исследований.

С ростом глобальной температуры ожидается усиление некоторых условий, способствующих возникновению сильных гроз, способных порождать торнадо. В то же время остается неопределенность влияния других факторов, в частности изменений в вертикальных и горизонтальных движениях ветра, на образование торнадо.



14

Как быстро поднимается уровень моря?

Долгосрочные наблюдения с помощью приточных датчиков и современные спутниковые измерения показывают, что уровень мирового океана повышается. Самая точная оценка среднего глобального повышения за последнее десятилетие составляет примерно 3,6 мм в год (0,14 дюйма в год). Скорость повышения уровня моря выросла с момента начала космических альтиметрических измерений в 1992 году. Основным фактором повышения среднего глобального уровня моря с 1970 года является глобальное потепление, вызванное деятельностью человека.

Общее наблюдаемое повышение уровня моря с 1902 года. около 16 см (6 дюймов) (рисунок 6).

Повышение уровня моря происходит по нескольким взаимосвязанным причинам: более теплая океанская вода расширяется, горные ледники по всему миру тают, а ледниковые щиты Гренландии и Антарктиды теряют массу. Все эти процессы являются результатом глобального потепления. Уровень моря также колеблется из-за изменения объема воды на

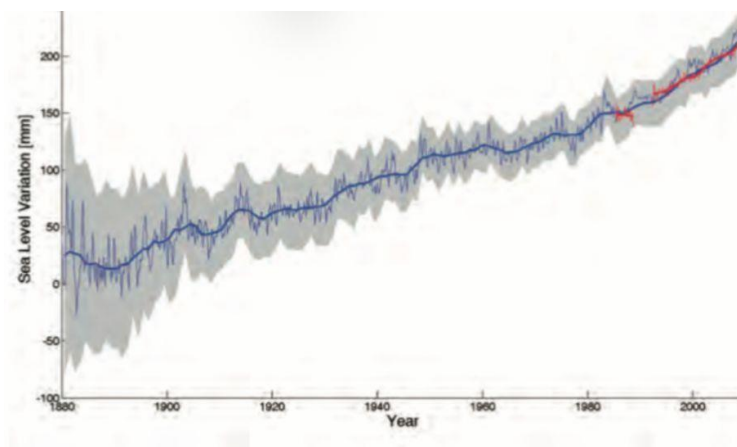
суше, а локальные изменения зависят от геологических процессов (поднятие или опускание суши), а также от того, как ветры и течения перераспределяют океанскую воду у побережья. Наиболее заметные последствия повышения уровня моря проявляются в увеличении частоты и силы штормовых приливов. Если выбросы CO_2 и других парниковых газов продолжат расти нынешними темпами, к 2100 году уровень моря может подняться по меньшей мере на 0,4-0,8 м (1,3-2,6 фута), а последующее

таяние ледниковых щитов может еще больше увеличить этот показатель. Повышение уровня моря не остановится в 2100 году: в следующих столетиях уровень будет продолжать расти из-за нагревания океанов и таяния ледников. Трудно предположить, как именно ледниковые щиты Гренландии и Антарктиды отреагируют на дальнейшее потепление. Ожидается, что Гренландия и, возможно, Западная Антарктида продолжат терять массу, тогда как более холодные регионы Антарктиды могут накапливать больше снега из-за более теплого, влажного воздуха. Для сравнения, в последний межледниковый период около 125 000 лет назад уровень моря, вероятно, был на 5–10 м выше современного, при этом полярные регионы были теплее, чем сегодня. Это свидетельствует о том, что длительные периоды повышенных температур могут привести к значительной потере ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды и существенному повышению уровня моря в течение тысячелетий.

РИСУНОК 6. Наблюдения показывают, что с конца XIX века средний глобальный уровень моря поднялся примерно на 16 см (6 дюймов).

В последние десятилетия скорость повышения выросла: данные приоточных датчиков (синий цвет) и спутников (красный цвет) показывают, что самая точная оценка среднего повышения за последнее десятилетие составляет 3,6 мм в год (0,14 дюйма в год). Затененная область отражает неопределенность измерений уровня моря, которая

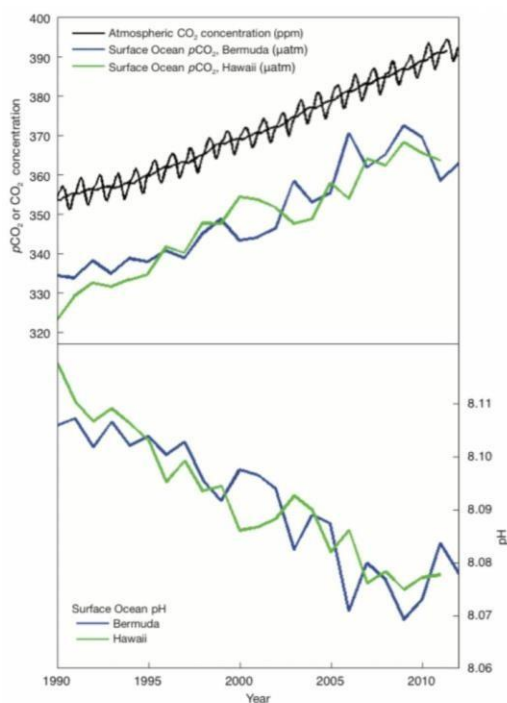
уменьшилось благодаря увеличению количества измерительных станций и точек данных для расчета глобального среднего. Источник: Shum и Kuo (2011).



Прямые наблюдения за химическим составом океана показывают, что вода становится более кислой (pH снижается) (рисунок 7.1). Некоторым морским организмам, таким как кораллы и определенные моллюски, сложно формировать и поддерживать свои карбонатакальные панцири, поскольку они легче растворяются в кислой среде.

CO₂ растворяется в воде, образуя слабую кислоту, и океаны поглотили около трети CO₂, образовавшегося в результате деятельности человека, что привело к постоянному снижению уровня pH океана. С ростом концентрации CO₂ в атмосфере этот химический баланс еще больше изменится в течение следующего столетия. Лабораторные и другие опыты показывают, что при высоком уровне CO₂ и более кислых вод некоторые морские организмы формируют деформированные раковины и имеют пониженные темпы роста, хотя эффект зависит от вида. Подкисление также изменяет циклы питательных веществ и других элементов в океане и, вероятно, повлияет на конкурентные преимущества между видами, что может оказать неопределенное влияние на морские экосистемы и пищевую цепь.

РИСУНОК 7. С ростом содержания CO₂ в атмосфере возросла концентрация CO₂ в поверхностных слоях океана (верхний график) и снизился уровень pH морской воды (нижний график). Источник: адаптирован с Dore et al. (2009) и Bates et al. (2012).



Насколько уверены ученые, что Земля и дальше будет теплеть в течение следующего столетия?

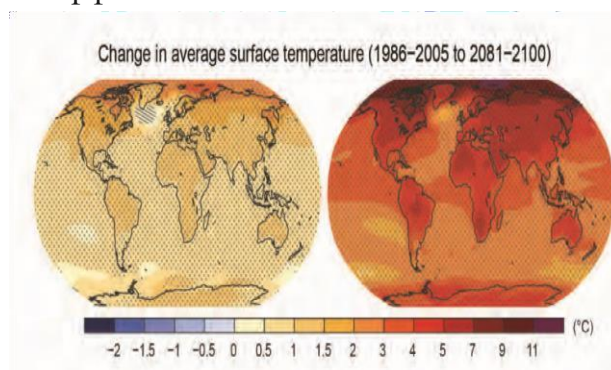
Ученые с большой уверенностью прогнозируют, что если выбросы парниковых газов и дальше будут расти без ограничений, температура на Земле в течение XXI века повысится еще на 2,6–4,8 °C (4,7–8,6 °F) свыше уже зафиксированного потепления (см. рисунок 8).

Потепление, вызванное большими выбросами парниковых газов в атмосферу, объясняется базовыми свойствами этих газов. Это, в свою очередь, запускает изменения в естественных климатических процессах, усиливающих общий эффект потепления. Масштабы повышения температуры зависят от количества накапливающихся в атмосфере парниковых газов, то есть от избранной человечеством траектории выбросов. Если совокупные выбросы с 1875 года останутся ниже 900 гигатонн (900 миллиардов тонн) углерода, существует примерно две трети вероятности, что средняя глобальная температура вырастет менее чем на 2 °C (3,6 °F) по сравнению с доиндустриальным уровнем. Однако уже сейчас более двух третей этого объема выброшены в атмосферу. Чтобы ограничить потепление до 1,5 °C (2,7 °F), нужно еще больше сократить суммарные выбросы с 1875 года.

Только на основе физических свойств CO₂ можно подсчитать, что удвоение его концентрации по сравнению с доиндустриальным уровнем (до ≈560 ppm) приведет к повышению глобальной температуры примерно на 1C (1,8F). Но реальное потепление будет больше из-за обратных связей климатической системы, которые могут как усиливать, так и ослаблять исходный эффект. Самая сильная усиливающая обратная связь связана с водяным паром.

мощным парниковым газом. По мере повышения температуры атмосфера удерживает больше влаги, что дополнительно усиливает нагрев нижних слоев воздуха. Другой важный эффект — таяние арктического льда:

РИСУНОК 8. Если выбросы парниковых газов будут продолжать расти нынешними темпами, без введение технологических или регуляторных мер по их сокращению, то, по самым оптимистичным оценкам, к концу XXI век средняя глобальная температура может возрасти еще на 2,6–4,8 °C (4,7–8,6 °F) (справа). Прогнозируется, что суша будет нагреваться быстрее океанов, а значит, темпы потепления на континентах будут превышать среднемировые характеристики. На рисунке слева показан возможный сценарий потепления при очень агрессивном сокращении выбросов. Цифры отражают средние оценки температуры, полученные по результатам нескольких климатических моделей, в период 2081–2100 годов по сравнению с 1986–2005 годами. Источник: IPCC AR5 (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, Пятый оценочный отчет).



более темная
поверхность
океана и суши
поглощает больше
солнечного тепла,
ускоряя
дальнейшее
таяние.
Наибольшая
неопределенность
касается

облачности, поскольку облака могут как усиливать, так и смягчать потепление в зависимости от их свойств. Другой важная обратная связь связана с углеродным циклом. В настоящее время океаны и сушу поглощают около половины антропогенных выбросов CO₂, но с ростом температуры их способность удерживать углерод уменьшается. Это означает скорее накопление CO₂ в атмосфере и ускорение потепления. Хотя разные климатические модели дают несколько разные прогнозы, все они единодушно указывают, что совокупный эффект обратных связей состоит в усилении глобального потепления.

17

Есть ли изменения климата всего на несколько градусов поводом для беспокойства?

Да. Хотя повышение средней глобальной температуры на несколько градусов может казаться незначительным, во время последнего ледникового периода средняя глобальная температура была на 4–5 °C (7–10 °F) ниже, чем сейчас. Глобальное потепление всего на несколько градусов будет сопровождаться широкомасштабными изменениями региональной и местной температуры, количества осадков, а также увеличение частоты некоторых видов экстремальных погодных явлений. Эти и другие изменения, в частности повышение уровня моря и штормовые приливы, будут оказывать серьезное влияние на человеческие общества и природный мир.)

Как теоретические модели, так и непосредственные наблюдения подтверждают, что глобальное потепление сопровождается более интенсивным повышением температуры на суше, чем в океанах, увлажнением атмосферы, изменениями в региональных моделях осадков, увеличением количества экстремальных погодных явлений, закислением океанов, таянием ледников и подъемом штор и подъемом уровня морских морских путей. приливов. Уже сегодня рекордно высокие температуры встречаются гораздо чаще, чем рекордно низкие; влажные районы становятся еще более влажными, а засушливые — еще более сухими; интенсивность сильных ливней растет, а площадь снежного покрова — важного источника пресной воды для многих регионов — постепенно уменьшается. Ожидается, что эти последствия усилятся с последующим потеплением и будут

представлять угрозу для производства продовольствия, поставки пресной воды,

прибрежной инфраструктуры, а особенно для благосостояния большого количества людей, проживающих в низменных районах. Хотя некоторые регионы могут извлечь определенную локальную выгоду от потепления, в целом его долгосрочные последствия будут разрушительными.

Причиной беспокойства является не только повышение средней глобальной температуры на несколько градусов, но и темпы, с которыми происходит это потепление (см. вопрос 6). Быстрые климатические изменения, вызванные деятельностью человека, оставляют меньше времени для принятия мер адаптации или для того, чтобы экосистемы успели приспособиться, что повышает риски в регионах, уязвимых к более интенсивным экстремальным явлениям погоды и повышению уровня моря.

18

Что делают ученые, чтобы устранить ключевые неопределенности в нашем понимании климатической системы

Наука – это непрерывный процесс наблюдения, анализа, моделирование, тестирование и прогнозирование. Прогноз долгосрочной тенденции глобального потепления в результате роста выбросов парниковых газов является надежным и подтверждается все большим количеством доказательств. Однако понимание некоторых аспектов изменения климата остается неполным. Примерами этого являются естественные климатические колебания в масштабах десятилетий до веков и от региональных до местных пространственных масштабов, а также реакция облаков на изменение климата, являющегося предметом активных исследований.

Сравнение прогнозов моделей с наблюдениями позволяет определить, что хорошо понятно, и одновременно выявить неопределенности или пробелы в нашем понимании. Это помогает установить приоритеты для новых исследований. Поэтому пристальный мониторинг всей климатической системы — атмосферы, океанов, суши и льда — очень важен, поскольку климатическая система может быть полна неожиданностей. Полевые и лабораторные данные, а также теоретические знания используются для совершенствования моделей климатической системы Земли и улучшения отражения в них ключевых процессов, особенно связанных с облаками, аэрозолями и переносом тепла в океаны. Это имеет решающее значение для точного моделирования изменений климата и связанных с ними изменений погодных условий, особенно на региональном и местном уровнях, что

важно для принятия обоснованных политических решений.

Моделирование того, как облака будут изменяться в результате потепления и, в свою очередь, могут влиять на него, остается одним из главных вызовов для глобальных климатических моделей. Частично это связано с тем, что разные типы облаков по-разному влияют на климат, а многие процессы, связанные с облаками, происходят в масштабах меньше тех, которые способны различить большинство современных моделей. Рост вычислительной мощности позволяет отображать некоторые из этих процессов в моделях нового поколения.

Десятки групп и научно-исследовательских институтов работают над климатическими моделями, и ученые в настоящее время имеют возможность анализировать результаты практически всех основных моделей земной системы мира, сравнивая их между собой и наблюдениями. Такие возможности очень полезны для выявления сильных и слабых сторон различных моделей и диагностики причин разногласий между ними, чтобы исследования могли сосредоточиться на соответствующих процессах. Различия между моделями позволяют оценить неопределенность в прогнозах будущих изменений климата.

Кроме того, большие архивы результатов многочисленных моделей помогают ученым определить аспекты прогнозов изменения климата, которые являются надежными и могут быть интерпретированы с точки зрения известных физических механизмов.

Изучение того, как климат реагировал на значительные изменения в прошлом, является еще одним способом проверить, правильно ли мы понимаем работу различных процессов и способны ли модели надежно воспроизводить климат в широком диапазоне условий.

Почему для изучения климатических изменений используются компьютерные модели?

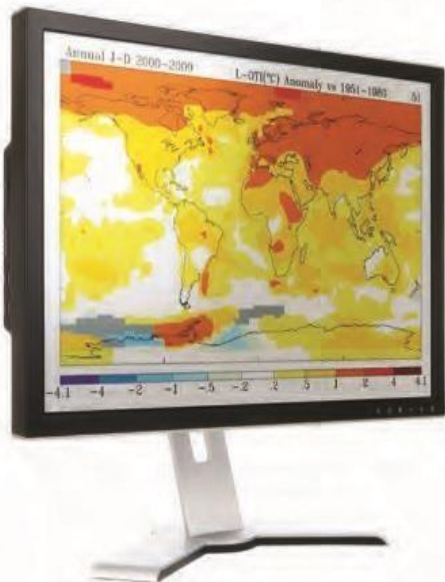
Будущая эволюция климата Земли в ответ на современные быстрые темпы роста содержания CO_2 в атмосфере не имеет точных аналогов в прошлом и не может быть четко понята с помощью лабораторных экспериментов. Поскольку мы также не можем проводить контролируемые эксперименты на Земле, компьютерные модели являются одними из важнейших инструментов для изучения климатической системы. Климатические модели базируются на математических уравнениях, отражающих лучшее понимание основных законов физики, химии и биологии, регулирующих поведение атмосферы, океана, поверхности суши, льда и других компонентов климатической системы, а также взаимодействие между ними.

Наиболее комплексные климатические модели – модели земной системы – предназначены для моделирования климатической системы Земли с максимальной детализацией, позволяющей наше понимание и существующие суперкомпьютеры.

С 1960-х годов возможности климатических моделей постоянно совершенствуются. Используя физические уравнения, модели можно проверять, и они успешно воспроизводят широкий

спектр погодных и климатических явлений, таких как отдельные штормы, меандры струйных течений, явления Эль-Ниньо и климат прошлого века. Их прогнозы относительно основных особенностей долгосрочных изменений климата, вызванных деятельностью человека, остаются надежными, поскольку поколения все более сложных моделей дают подробную информацию об этих изменениях.

Кроме того, компьютерные модели используются для проведения экспериментов с целью выделения конкретных причин изменения климата и исследования последствий различных сценариев будущих выбросов парниковых газов и других воздействий на климат.



19 Являются ли причиной беспокойства катастрофические сценарии, связанные с «точками невозвращения», такие как «отключение Гольфстрима» и выброс метана из Арктики?

Результаты лучших доступных Климатических моделей не предполагают резкого изменения(или разрушений) Атлантической меридиональной циркуляции, включающей Гольфстрим, в ближайшем будущем. Однако это и другие потенциальные резкие изменения с высоким риском, такие как высвобождение метана и углекислого газа из тающей вечной мерзлоты, остаются активными направлениями научных исследований. Некоторые резкие изменения уже происходят, например, уменьшение площади арктического морского льда (см. вопрос 12), а с дальнейшим усилением потепления нельзя исключать возможность возникновения других серьезных резких изменений.

Состав атмосферы изменяется в сторону условий, которые не наблюдались в течение миллионов лет, поэтому мы движемся в неизвестные территории, и неопределенность велика. Климатическая система включает в себя множество конкурирующих процессов, которые могут перевести климат в другое состояние после превышения определенного порога. Известным примером является циркуляция океанических течений юг-север, которая поддерживается погружением холодной соленой воды в Северной Атлантике и обеспечивает перенос дополнительного тепла в Северную Атлантику через Гольфстрим. Во время последнего ледникового периода импульсы пресной воды от таяния ледникового покрова над Северной Америкой привели к замедлению этой циркуляции, что, в свою очередь, повлекло за собой широкомасштабные климатические изменения в Северном полушарии. В настоящее время потепление Северной Атлантики в результате таяния ледникового покрова Гренландии происходит постепенно, поэтому резкие изменения пока не ожидаются. Другая проблема касается Арктики, где значительное потепление может дестабилизировать метан (парниковый газ), содержащийся в океанских отложениях и вечной мерзлоте,



потенциально приводя к быстрому высвобождению большого количества метана. В случае столь быстрого

высвобождения климат претерпевает значительные и стремительные изменения. Хотя такие высокорисковые события

считаются маловероятными в этом столетии, по определению их трудно предсказать. Поэтому ученые продолжают исследовать возможность превышения критических точек, вне которых возникает риск больших и резких изменений.

Кроме резких изменений в самой климатической системе, постепенные климатические изменения могут превысить пороговые значения, что влечет за собой резкие изменения в других системах. К примеру, в человеческих системах инфраструктура обычно проектируется с учетом климатических условий на момент строительства. Постепенные изменения климата могут повлечь за собой резкие изменения в функционировании инфраструктуры, например, когда повышение уровня моря внезапно превышает высоту дамб или когда таяние вечной мерзлоты вызывает разрушение трубопроводов, зданий или дорог. В природных системах, с повышением температуры воздуха и воды, некоторые виды, такие как горная пика и многочисленные океанские кораллы, больше не смогут выживать в своих нынешних средах обитания и будут вынуждены переселяться (если это возможно) или быстро адаптироваться. Остальные виды могут лучше приспособиться к новым условиям, что приведет к резким изменениям в балансе экосистем; например, более теплые температуры позволили большему количеству короедов пережить зиму в некоторых регионах, где их вспышки уничтожили леса.

Если бы выбросы парниковых газов прекратились, вернулся бы климат в условий 200 лет назад?

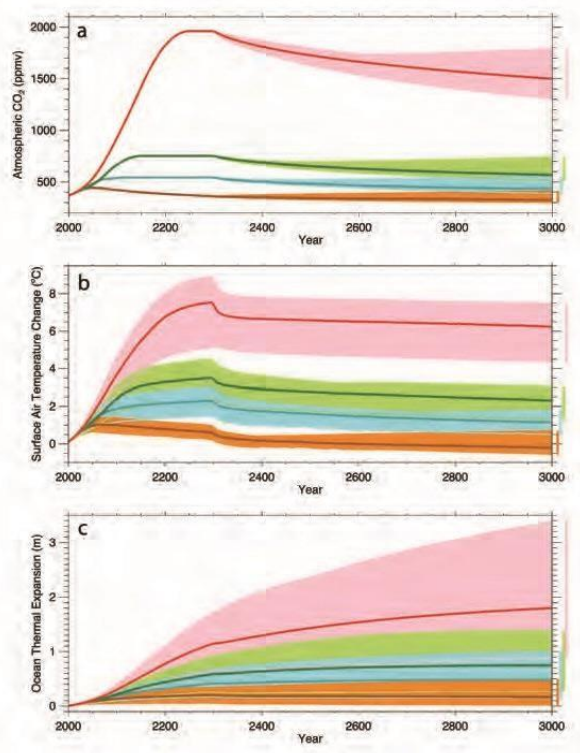
Нет. Даже если выбросы парниковых газов внезапно прекратятся, температура поверхности Земли потребует тысяч лет, чтобы остыть и вернуться к уровню доиндустриальной эпохи.

Если выбросы CO_2 полностью прекратятся, из-за очень медленного переноса в глубины океана и окончательного захоронения в океанических отложениях атмосферном CO_2 понадобится много тысяч лет, чтобы вернуться к «доиндустриальному» уровню. Температура поверхности будет оставаться повышенной не менее тысячи лет, что означает долгосрочное обязательство по потеплению планеты из-за прошлых и текущих выбросов. Уровень моря, вероятно, будет продолжать подниматься на протяжении многих веков даже после того, как температура перестанет расти (рисунок 9).

Для того, чтобы остановить таяние ледников и образовавшихся во время прошлых холодных климатических периодов ледового покрова Гренландии, необходимо значительное охлаждение. Следовательно, текущее потепление Земли, вызванное CO_2 , практически необратимо в человеческих временных масштабах. Величина и скорость дальнейшего потепления будут полностью зависеть от того, сколько CO_2 еще будет выброшено человечеством. Сценарии будущих климатических изменений все чаще подразумевают использование технологий, способных удалять парниковые газы из атмосферы. В таких сценариях

«отрицательных выбросов» предполагается, что в будущем будут приняты широкомасштабные меры с использованием этих технологий для удаления CO_2 из атмосферы и снижения его концентрации, что позволит начать обратный процесс глобального потепления, вызванного CO_2 в более долгосрочной перспективе (до 2200 года). Применение таких технологий в больших масштабах потребует значительного снижения их стоимости. Даже если эти технологические решения станут практичными, все равно будет необходимо существенное сокращение выбросов CO_2 .

РИСУНОК 9. Если глобальные выбросы прекратятся, температура воздуха на поверхности и в океане начнет снижаться только через значительное время, поскольку избыток CO_2 в атмосфере будет оставаться длительный период и продолжать оказывать нагревательный эффект. Модельные прогнозы показывают, как концентрация CO_2 в атмосфере (а), температура воздуха на поверхности (б) и тепловое расширение океана (в) будут реагировать на сценарий прекращения выбросов в обычном режиме до 2300 (красный), сценарий агрессивного сокращения выбросов до нуля в течение 50 лет (оранжевый) и два промежуточных сценария выбросов (зеленый и синий). Незначительное понижение температуры к 2300 году обусловлено ликвидацией выбросов короткоживущих парниковых газов, включая метан. Источник: Zickfeld et al., 2013.



Вывод

В этом документе объясняется, что существуют хорошо известные физические механизмы, посредством которых изменения в количестве парниковых газов влекут за собой изменения климата. Обсуждаются доказательства того, что концентрация этих газов в атмосфере увеличилась и продолжает быстро расти, происходящие изменения климата, и что большинство последних изменений почти наверняка вызваны выбросами парниковых газов, обусловленными деятельностью человека. Последующие изменения климата неизбежны; если выбросы парниковых газов будут продолжаться без изменений, грядущие изменения значительно превысят произошедшие до сих пор. Существует ряд оценок масштабов и регионального проявления будущих изменений, но ожидается усиление экстремальных климатических явлений, которые могут негативно повлиять на природные экосистемы, деятельность человека и инфраструктуру.

Граждане и правительства могут выбрать один из нескольких вариантов (или их комбинацию) в ответ на эту информацию: они могут изменить модель производства и потребления энергии, чтобы ограничить выбросы парниковых газов и, следовательно, масштабы климатических изменений; они могут ожидать изменения и принять потери, убытки и страдания, которые они повлекут; они могут максимально адаптироваться к фактическим и ожидаемым изменениям; или они могут искать еще непроверенные «геоинженерные» решения, чтобы противодействовать некоторым климатическим изменениям, которые иначе произошли бы. Каждый из этих вариантов имеет риски, преимущества и затраты, и то, что фактически будет сделано, может являться сочетанием этих различных вариантов. Разные страны и общины будут отличаться по своей уязвимости и адаптации. Необходимо провести важную дискуссию по выбору среди этих вариантов, чтобы определить, что лучше для каждой группы или нации и, что самое важное, для всего населения Земли в целом. Эти варианты следует обсуждать на глобальном уровне, поскольку во многих случаях наиболее уязвимые сообщества контролируют лишь небольшую часть выбросов, как прошлых, так и будущих. Наш изложение науки об изменении климата, с указанием фактов и неопределенностей, предлагается в качестве основы для информированного ведения этой политической дискуссии.

Авторы

Следующие лица составляли основную команду авторов изданий этого документа 2014 и 2020 годов:

- Эрик Вольф FRS, (руководитель в Великобритании), Кембриджский университет, Кембридж
- Инес Фунг (NAS, руководитель со стороны США), Калифорнийский университет
- Брайан Хоскинс FRS, Институт по изменению климата
- Джон Ф.Б. Митчелл FRS, Британская метеорологическая служба
- Тим Палмер FRS, Оксфордский университет
- Бенджамин Сантер (NAS), Национальная лаборатория Лоуренса Ливермора Национальная лаборатория
- Джон Шеферд, член Королевского общества, Университет Саутгемптона
- Кит Шайн, член Королевского общества, Университет Рединга
- Сьюзан Соломон (NAS), Массачусетский Институт технологий
- Кевин Тренберт, Национальный центр исследования атмосферы
- Джон Уолш, Университет Аляски, Фербенкс
- Дон Вуэбблс, Университет Иллинойса

Поддержку персонала для просмотра в 2020 году оказали Ричард Уокер, Аманда Перселл, Нэнси Хадлстон и Майкл Хадсон. Мы выражаем особую благодарность Ребекке Линди и NOAA Climate.gov за предоставление данных и обновленных цифр

Рецензенты

Следующие лица выступили рецензентами документа 2014 года в соответствии с процедурами, утвержденными Королевским обществом и Национальной академией наук:

- Ричард Элли (NAS), кафедра геонаук, Пенсильванский государственный университет
- Алек Броэрс FRS, бывший президент Королевской инженерной академии
- Гарри Элдерфилд FRS, кафедра наук о Земле, Кембриджский университет
- Джерри Мил, старший научный сотрудник, Национальный центр атмосферных исследований
- Джон Пендри, член Королевского общества, Имперский колледж Лондона
- Джоанна Хейг FRS, профессор физики атмосферы, Имперский колледж Лондона
- Джон Пайл FRS, кафедра химии, Кембриджский университет
- Айзек Хелд (NAS), Лаборатория геофизической гидродинамики NOAA
- Гейвин Шмидт, Космический центр имени Годдарда НАСА
- Эмили Шакберг, Британская антарктическая служба
- Габриель Уокер, журналистка
- Эндрю Уотсон FRS, Университет Восточной Англии

- Джон Куцбах (NAS), Центр климатических исследований, Университет Висконсина

Поддержка

Поддержку издания 2014 оказали фонды NAS Endowment Funds. Мы выражаем искреннюю благодарность фонду Ralph J. and Carol M. Cicerone Endowment for NAS Missions за поддержку в создании этого издания в 2020 году.