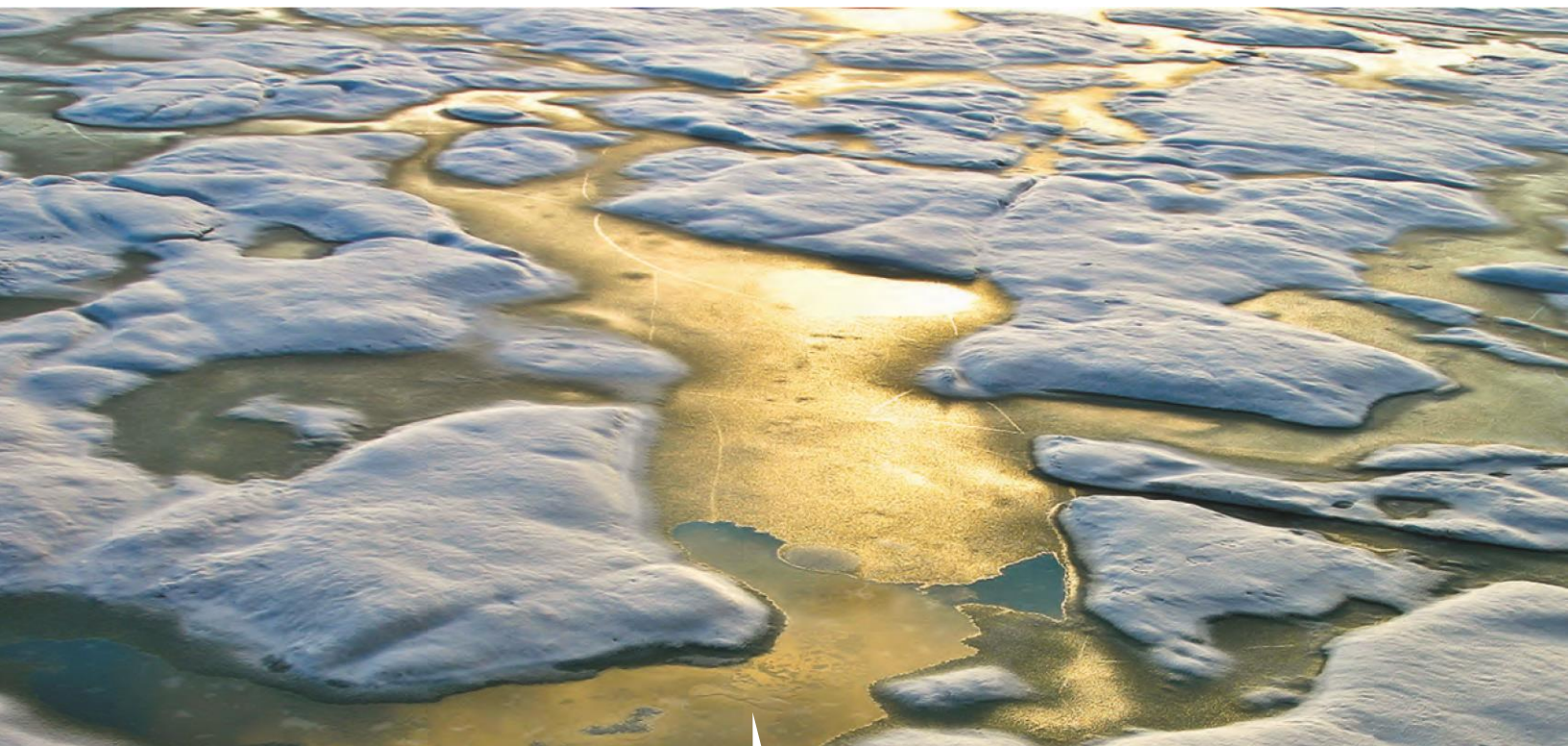


Изменение климата

Обзор Королевского общества и
Национальной академии наук США

доказательства и причины



2020
Обновление



THE
ROYAL
SOCIETY

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА ЯВЛЯЕТСЯ ОДНОЙ ИЗ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОБЛЕМ НАШЕГО ВРЕМЕНИ. Сейчас, как никогда ранее, на основе многочисленных доказательств подтверждается, что именно люди изменяют климат Земли. Атмосфера и океаны нагрелись, что сопровождается повышением уровня моря, значительным сокращением площади арктического морского льда и другими климатическими изменениями. Влияние изменения климата на людей и природу становится всё более очевидным: беспрецедентные наводнения, волны тепла и лесные пожары наносят ущерб на миллиарды долларов. Такие явления возникают в ответ на изменение температуры и режимов осадков, что нарушает природное равновесие планеты.

Королевское общество и Национальная академия наук США, имеющие общую цель — содействовать использованию науки на благо общества и информировать общественность о важных политических вопросах, в 2014 году опубликовали совместную работу «Изменение климата: доказательства и причины». Эта работа была написана и рецензирована ведущими климатологами из Великобритании и США. Новое обновленное издание подготовлено той же командой авторов с учетом самых свежих климатических данных и научных исследований, углубляющих наше понимание изменений климата, вызванных человеческой деятельностью.

Доказательства очевидны. Однако, учитывая природу науки, не каждая деталь является окончательно определенной, и не на все вопросы уже получены ответы. Научные данные продолжают активно собираться по всему миру, что постоянно расширяет наше понимание климатических процессов. Некоторые аспекты стали понятнее, 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, которая ранее имела тенденцию к увеличению, с 2014 года начала сокращаться, достигнув в 2017 году рекордно низкого уровня, который сохраняется и по сей день. Эти и другие недавние наблюдения учтены в обсуждении вопросов, представленных в этой брошюре.

Призывы к действиям становятся всё громче. В исследовании «Глобальные риски 2020 года», опубликованном Всемирным экономическим форумом, изменение климата и связанные с ним экологические проблемы были определены среди пяти самых серьезных рисков, которые могут возникнуть в течение

ближайших десяти лет. Впрочем, международное сообщество всё 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 о путях 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 о современном состоянии знаний об изменении климата.

Мы выражаем благодарность за то, что шесть лет назад, под руководством доктора Ральфа Дж. Сисероне — 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 об изменении климата. Как нынешние президенты этих учреждений, мы рады представить обновленную версию этого ключевого справочного издания, созданную при поддержке семьи Сисероне.

Марсия Макнатт

Президент Национальной академии наук

Венк[а]макришнан

Президент Королевского общества

Для дальнейшего чтения

Более подробное обсуждение тем, рассмотренных в этом документе (включая ссылки на исходные оригинальные исследования), 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* [[\[policy/publications/2010/ climate-change-summary-science\\]\]\(https://www.nap.edu/catalog/12877\)](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>]

Більшість вихідних даних, на яких ґрунтуються наукові висновки, обговорені в цьому документі, є у відкритому доступі за адресою:

- <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/>



NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES

THE
ROYAL
SOCIETY

Национальная академия наук (NAS) Национальный исследовательский совет 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 операционным подразделением Национальной академии наук и Национальной инженерной академии, опубликовал многочисленные отчеты о причинах изменения климата и возможных мерах реагирования на него. Материалы Национального исследовательского совета доступны по адресу: nationalacademies.org/climate.

КОРОЛЕВСКОЕ ОБЩЕСТВО является самоуправляемым сообществом многих самых выдающихся 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, заключается в признании, продвижении и поддержке научных достижений, а также у

поощрении развития и применения науки на благо человечества. Больше информации о деятельности Общества в сфере изменения климата можно найти на сайте: royalsociety.org/policy/climate-change.





THE
ROYAL
SOCIETY

Итог 1

Вопросы и ответы об изменении климата

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

The Basics of Climate Change B1–B8

Climate Change Q&A (continued)

11. Если мир теплеет, почему некоторые зимы и лета всё ещё бывают очень холодными?.....	13
12. Почему площадь морского льда в Арктике уменьшается, тогда как в Антарктике почти не изменилась?	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 продолжит нагреваться в течение следующего столетия?.....	18

17. Является ли изменение климата всего на несколько градусов поводом для беспокойства?.....	19
18. Что делают ученые, чтобы устранить основные неопределенности в нашем понимании климатической системы?	20
19. Существуют ли сценарии катастроф, связанные с критическими точками, например остановка Гольфстрима или высвобождение метана из Арктики, которые являются поводом для беспокойства?.....	21
20. Если прекратить выбросы парниковых газов, вернется ли климат к условиям, которые были 200 лет назад?.....	22

Conclusion	23
-------------------------	----

Acknowledgements	24
-------------------------------	----

ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ Такие газы, как углекислый газ (CO_2), поглощают тепло (инфракрасное излучение), которое излучается с поверхности Земли. Увеличение концентрации этих газов приводит к потеплению планеты, поскольку они задерживают большую часть этого тепла. Деятельность человека, особенно сжигание ископаемого топлива с начала промышленной революции, привела к увеличению концентрации CO_2 в атмосфере более чем на 40%, причем более половины этого роста произошло с 1970 года. С 1900 года средняя глобальная температура поверхности Земли повысилась примерно на 1°C ($1,8^\circ\text{F}$). Это сопровождалось потеплением океанов, повышением уровня моря, значительным сокращением арктического морского льда, повсеместным увеличением частоты и интенсивности волн тепла и многими другими климатическими эффектами. Значительная часть этого потепления произошла в течение последних пяти десятилетий. Детальный анализ показал, что оно является главным образом результатом увеличения концентраций CO_2 и других парниковых газов. Продолжение выбросов этих газов вызовет дальнейшие изменения 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, которые будут длиться десятилетия и дольше, будут продолжаться. Однако долгосрочные изменения климата на протяжении 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.1а]. 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, и других чувствительных к температуре видов) вместе дают неопровержимые доказательства глобального потепления.

Самые очевидные доказательства потепления поверхности происходят из широко распространённых термометрических записей, которые в некоторых местах ведутся с конца XIX века. Сегодня температуру измеряют в тысячах точек как на суше, так и на поверхности океанов. Косвенные оценки изменений температуры из таких источников, как годовичные кольца деревьев или керны льда, помогают поместить современные изменения температуры в исторический контекст. Что касается средней температуры поверхности Земли, эти косвенные оценки показывают, что период с 1989 по 2019 год, наиболее вероятно, 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. Например, нижние слои атмосферы и верхние слои океана также потеплели, снежный и ледяной покров в Северном полушарии уменьшается, ледниковый покров Гренландии сокращается, а уровень моря поднимается [рис.1б]. Эти измерения проводятся с помощью различных наземных, океанических и космических инструментов, что добавляет уверенности в реальности глобального потепления климата Земли.

Годовая глобальная температура поверхности

(1850–2019)

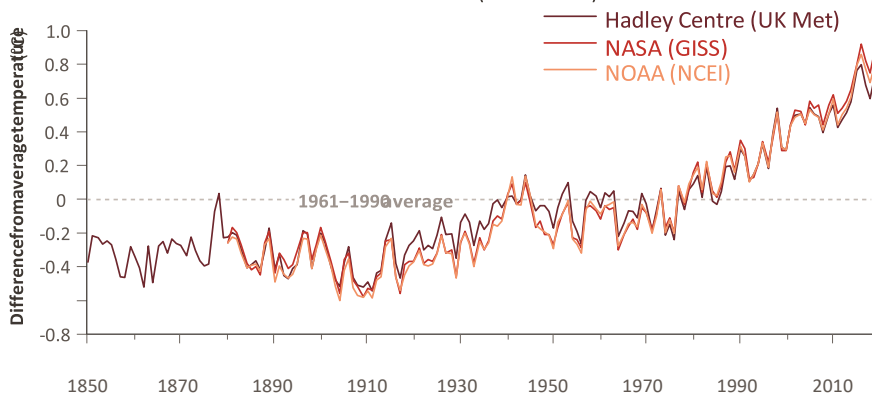
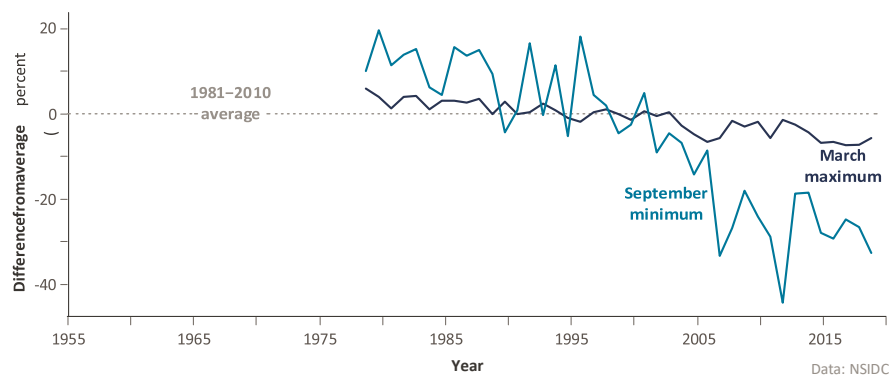


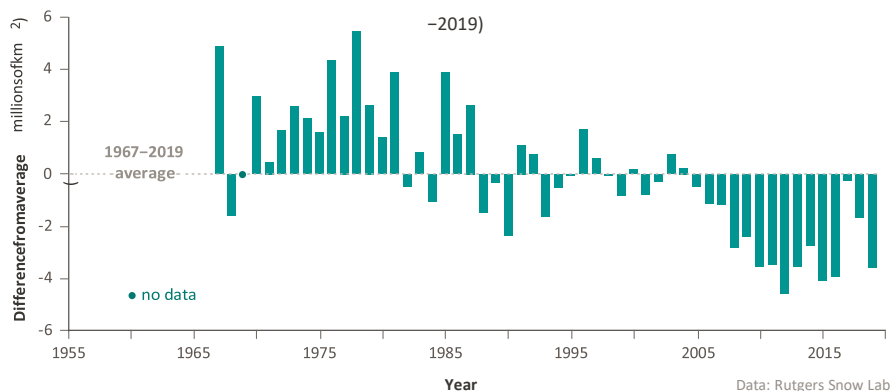
Рисунок 1а. Средняя глобальная температура поверхности Земли. Температура поверхности Земли повысилась, как показано на этом графике, составленном на основе измерений на суше и в океане с 1850 по 2019 год, полученных на основе трех независимых анализов доступных наборов данных. Изменения температуры относительно к средней глобальной температуре поверхности 1961–1990 гг. Источник: NOAA Climate.gov; данные Метеорологической службы Великобритании Hadley (бордовый), Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства — Института космических исследований им. Годдарда (красный) и Национального управления США по исследованию океанов и атмосферы — Национальных центров экологической информации (оранжевый).

Рисунок 1b. Большое количество наблюдательных данных, помимо 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, происходящего 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 1955–2006 гг., а также в повышении уровня мирового океана. Источник: NOAA Climate.gov

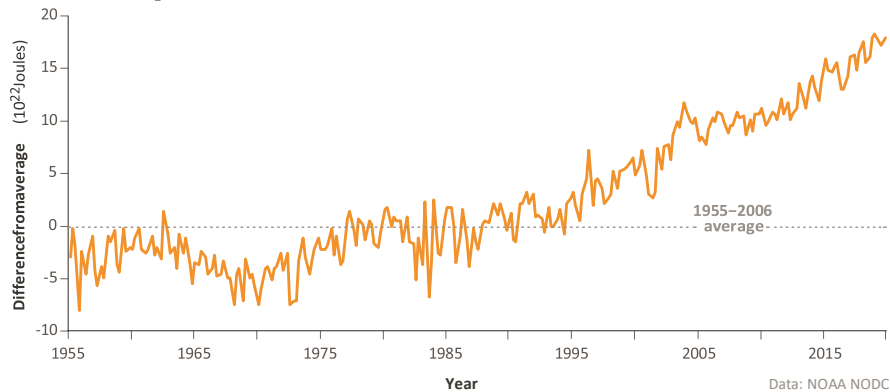
Площадь арктического морского льда зимой и летом (1979–2019)



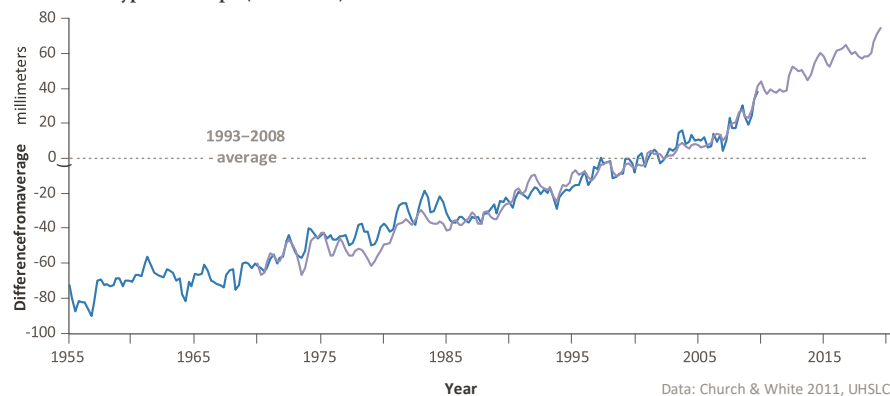
Снежный покров в северном полушарии в июне (1967–2019)



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 вызваны 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, заключенного в ледниках, показывают, что с 1800 по 2019 год содержание CO_2 в атмосфере возросло более чем на 40%. Измерения различных форм углерода (изотопы, см. вопрос 3) свидетельствуют, что это увеличение является следствием деятельности человека. Другие парниковые газы, в частности метан и закись азота, также растут из-за антропогенного влияния. Наблюдаемое повышение глобальной температуры поверхности с 1900 года согласуется с детальными расчетами влияния увеличения 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 поверхности Земли), но также географические и сезонные модели изменений климата. Наблюдаемые модели изменений поверхности, температуры в атмосфере, увеличения теплосодержания океана, повышения атмосферной влажности, повышения уровня моря и усиления 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 на основе климатических моделей показывают, что естественные причины сами по себе не могут объяснить недавние наблюдаемые изменения климата. К естественным причинам относятся изменения в энергоизлучении Солнца и орбите Земли вокруг него, 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 естественные факторы. Эти модели показывают незначительное потепление или даже небольшое похолодание в течение XX века и в начале XXI века. Только когда модели учитывают влияние деятельности человека на состав атмосферы, полученные изменения температуры согласуются с наблюдаемыми данными.

CO₂ УЖЕ ЕСТЕСТВЕННО ПРИСУТСТВУЕТ В АТМОСФЕРЕ, ТАК. ПОЧЕМУ ЖЕ ВЫБРОСЫ ОТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА ИМЕЮТ ТАКОЕ БОЛЬШОЕ ЗНАЧЕНИЕ?

Деятельность человека значительно нарушила естественный цикл углерода: добыча ископаемого топлива и его сжигание для получения энергии приводят к выбросам CO₂ в атмосферу.

В природе CO₂ постоянно обменивается между атмосферой, растениями и животными через фотосинтез, дыхание и разложение, а также между атмосферой и океаном через газообмен. Очень небольшая доля CO₂ (примерно 1% от выбросов от сжигания ископаемого топлива) также выбрасывается во время вулканических извержений. Эти выбросы компенсируются эквивалентным количеством, удаляемым в результате химического выветривания горных пород.

Уровень CO₂ в 2019 году был более чем на 40% выше, чем в XIX веке. Значительная часть этого роста произошла с 1970 года, примерно в то время, когда глобальное потребление энергии резко увеличилось. Снижение доли других форм углерода (изотопов ¹⁴C и ¹³C) и небольшое снижение концентрации кислорода в атмосфере (наблюдения доступны с 1990 года) свидетельствуют, что увеличение CO₂ преимущественно обусловлено сжиганием ископаемого топлива, которое имеет низкое содержание ¹³C и не содержит ¹⁴C. Вырубка лесов и другие изменения в землепользовании также вызвали высвобождение углерода из биосферы, где он обычно хранится в течение десятилетий и столетий. Дополнительный CO₂ 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 CO₂ в атмосферу. В результате значительная часть CO₂, выброшенного человеком, накапливается в атмосфере, где часть его остается не только на протяжении десятилетий или столетий, но и в течение тысяч лет. Сравнение с уровнями CO₂, измеренными в воздухе, заключенном в ледяных кернах, показывает, что нынешние концентрации значительно выше, чем были по крайней мере в течение последних 800 000 лет (см. вопрос 6).



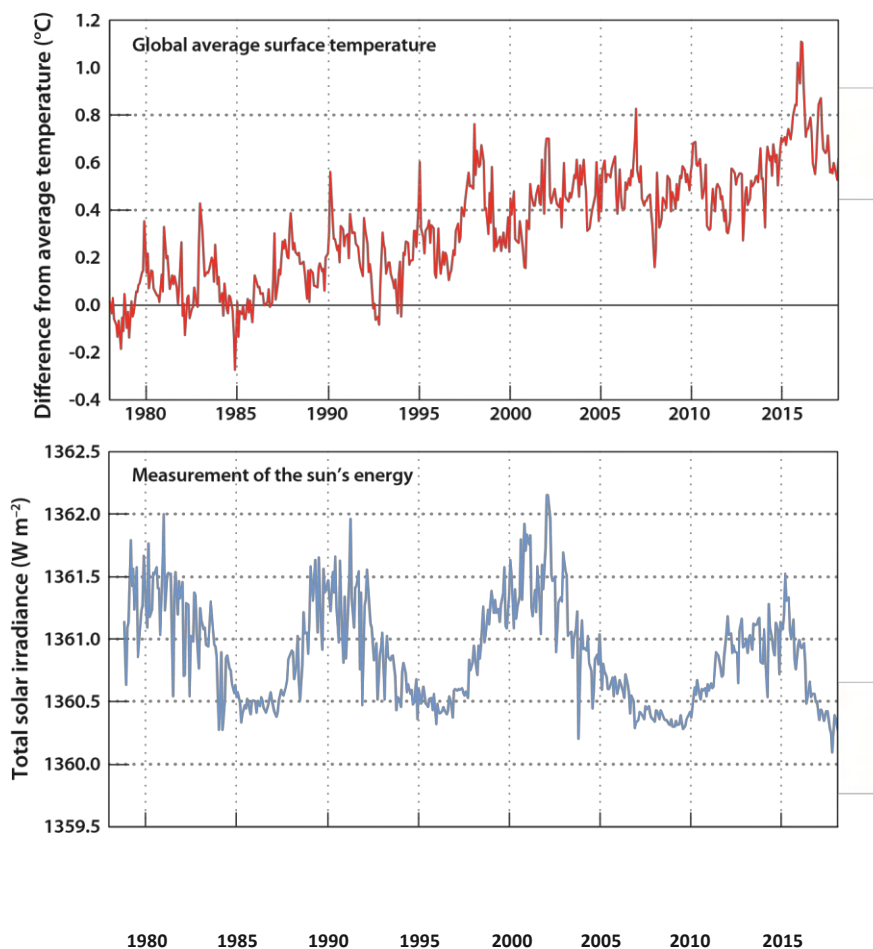
4

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 в течение последних десятилетий. Прямые спутниковые измерения, проведенные с конца 1970-х годов, не обнаруживают чистого увеличения солнечного излучения, тогда 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 энерговыделение 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 времени года). Эти стратосферные изменения могут оказывать незначительное влияние на климат поверхности в течение 11-летнего цикла. Однако имеющиеся данные не указывают на существенные долгосрочные изменения солнечной энергии в течение последнего столетия, на протяжении которого антропогенное повышение концентрации CO_2 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. Измерения энергии Солнца, поступающей на Землю, не показывают чистого увеличения солнечного излучения в течение последних 40 лет, и поэтому это не может быть причиной потепления в этот период. Данные демонстрируют лишь небольшие периодические колебания амплитуды, связанные с 11-летним солнечным циклом. Источники: данные TSI от Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, Швейцария, по новой шкале VIRGO (1978 – середина 2018 года); данные о температуре за тот же период из набора HadCRUT4, Метеорологическая служба Великобритании.



5

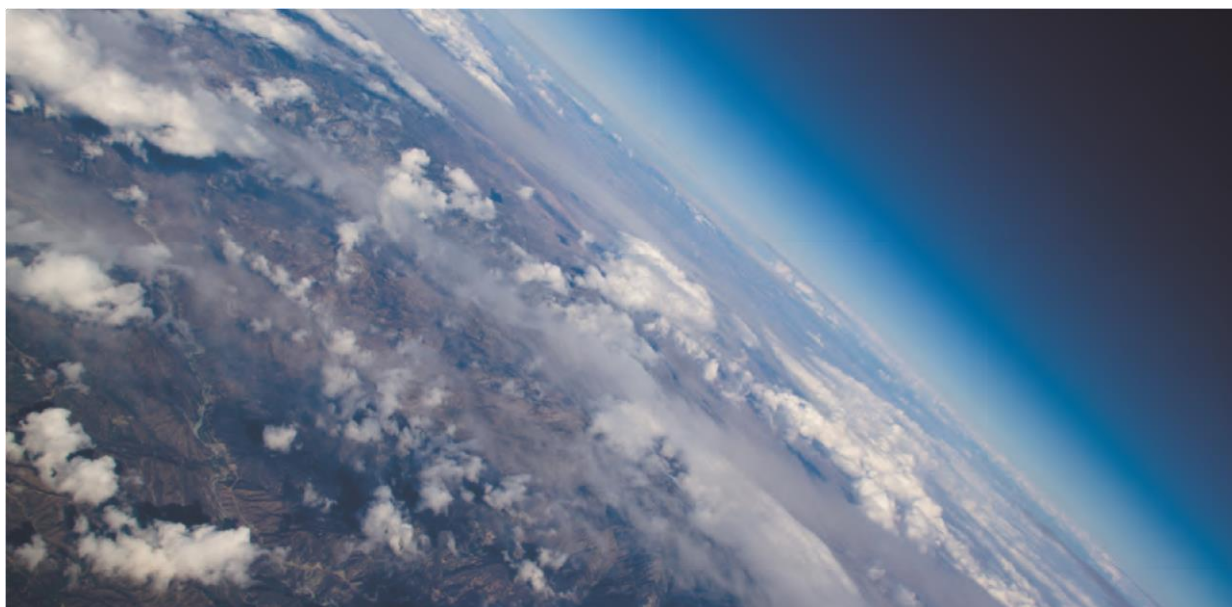
Как изменения в вертикальном профиле температуры атмосферы – от поверхности до стратосферы – свидетельствуют о причинах последних климатических изменений?

Наблюдаемое потепление в нижних слоях атмосферы и одновременное охлаждение верхних слоев дают важную информацию об основных причинах изменения климата и свидетельствуют о том, что естественные 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). В свою очередь, увеличение энергии Солнца вызвало бы потепление как тропосферы, так и стратосферы по всей вертикали. На тот момент данных наблюдений было недостаточно, чтобы проверить это предсказание, однако последующие

Измерения температуры с помощью метеорологических аэростатов и спутников подтвердили эти ранние прогнозы. Сегодня известно, что наблюдаемая на протяжении последних 40 лет тенденция к потеплению тропосферы и охлаждению стратосферы соответствует компьютерным моделям, учитывающим увеличение содержания CO₂ и уменьшение озона в стратосфере, вызванные деятельностью человека. Эта наблюдаемая закономерность не согласуется с чисто природными изменениями, такими как колебания солнечной активности, вулканическая активность или природные климатические колебания, в частности Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Несмотря на общее соответствие между глобальными моделями и наблюдаемыми данными об атмосфере, всё ещё существуют определенные расхождения. Наиболее заметные из них наблюдаются в тропиках, где модели в настоящее время показывают большее потепление тропосферы, чем было зафиксировано, и в Арктике, где наблюдаемое потепление тропосферы превышает прогнозы большинства моделей.



6

КЛИМАТ ПОСТОЯННО МЕНЯЕТСЯ. ПОЧЕМУ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ВЫЗЫВАЮТ БЕСПОКОЙСТВО ИМЕННО СЕЙЧАС?

Все крупные климатические изменения, даже естественные, имеют разрушительные последствия. Климатические изменения в прошлом вызывали вымирание многих видов, миграцию населения и значительные изменения в циркуляции на поверхности Земли и в океанах. Скорость современных климатических изменений превышает темпы большинства событий прошлого, что затрудняет адаптацию как человеческих обществ, так и природной среды.

Наиболее значительными глобальными климатическими изменениями в недавнем геологическом прошлом Земли являются циклы ледниковых периодов (см. инфобокс, с. В4), которые состоят 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 преимущественно обусловлены медленными изменениями орбиты Земли, которые меняют распределение солнечной энергии по широтам и сезонам. Однако эти орбитальные изменения в течение последних нескольких сотен лет являются очень незначительными и сами по себе недостаточны, чтобы вызвать 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 ледяных щитов и содержании CO_2 и других парниковых газов, что, в свою очередь, усиливало первоначальные 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 7 000 лет, начиная с 18 000 лет назад. Содержание CO_2 выросло более чем на 40% только за последние 200 лет, при этом значительная часть этого роста приходится на 1970-е годы. Это вызвало изменения энергетического баланса планеты и привело к потеплению Земли примерно на 1 °C (1,8 °F). Если концентрация CO_2 продолжит 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 самой быстрой известной природной продолжительной сменой глобальной температуры.



Является ли нынешний уровень концентрации CO_2 беспрецедентным в истории Земли?

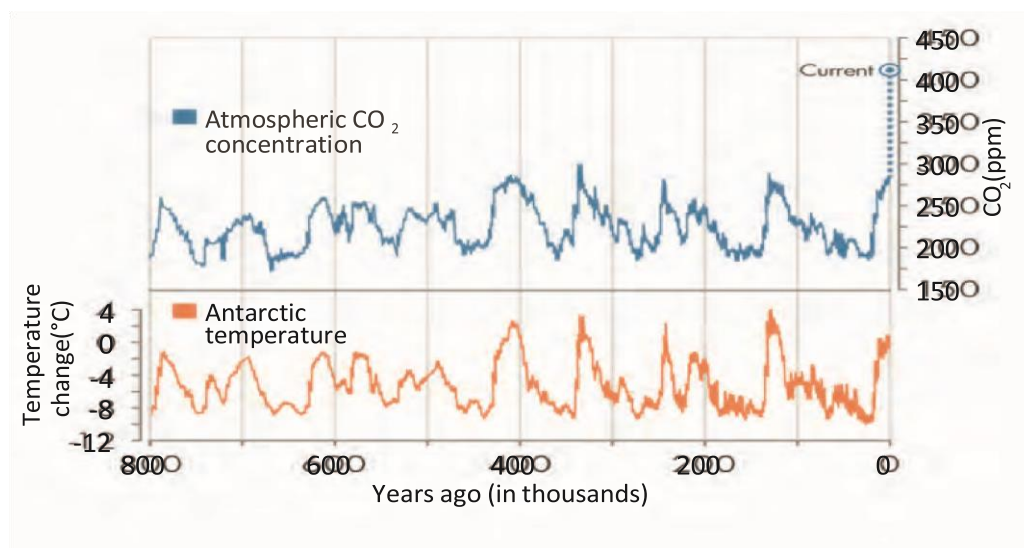
Нынешний уровень концентрации CO_2 в атмосфере почти наверняка является беспрецедентным за последний миллион лет, на протяжении которого эволюционировали современные люди и формировались общества. В то же время концентрация CO_2 в далеком прошлом (много миллионов лет назад) была еще выше, причем палеоклиматические и геологические данные свидетельствуют, что тогда температуры и уровень моря также превышали современные.

Измерения воздуха в ледяных ядрах показывают, что на протяжении последних 800 000 лет до XX века концентрация CO_2 в атмосфере оставалась в пределах от 170 до 300 частей на миллион (ppm), что делает особенно примечательным ее быстрый рост до более чем 400 ppm за последние 200 лет [Рисунок 3]. На протяжении ледниковых циклов последних 800 000 лет CO_2 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 в 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. Примерно 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 как минимум на 60 метров выше современного.

Рисунок 3. Данные ледяных кернов использованы для реконструкции температур в Антарктиде и концентраций CO_2 на протяжении последних 800 000 лет. Температура определена на основе измерений изотопного состава воды в ледовом керне Купола С. Концентрацию CO_2 измеряют в воздухе, сохранившемся во льду, на основе образцов из кернов Купола С и Станции Восток. Текущая концентрация CO_2 (обозначена синей точкой) определена по прямым атмосферным измерениям. Циклические колебания температуры формируют ледниково-межледниковые циклы. Во время этих циклов 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: адаптировано из рисунка Джереми Шакуна; данные из Lüthi et al., 2008 и Jouzel et al., 2007.



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

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

Наше понимание физических процессов, с помощью которых CO₂ влияет на энергетический баланс Земли, подтверждается как лабораторными измерениями, так и детальными спутниковыми и наземными наблюдениями за излучением и поглощением инфракрасной энергии атмосферой. Парниковые газы поглощают часть инфракрасной энергии, которую Земля излучает в определенных диапазонах сильного поглощения — на определенных длинах волн. Разные газы поглощают энергию на разных длинах волн. CO₂ имеет самую мощную полосу удержания тепла, сосредоточенную вблизи длины волны 15 микрометров (миллионных долей метра), с поглощением, которое распространяется на несколько микрометров в обе стороны. Существуют также многочисленные 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 вызывает дальнейший нагрев поверхности и нижних слоев атмосферы.

Меняется ли темп потепления с десятилетия в десятилетие?

Так. Наблюдаемая скорость потепления менялась из года в год, от десятилетия к десятилетию и в разных регионах мира, что согласуется с нашим пониманием климатической системы. Такие краткосрочные колебания в основном обусловлены природными факторами и не противоречат фундаментальному пониманию того, что долгосрочная тенденция к потеплению преимущественно вызвана ростом уровней CO₂ и других парниковых газов в атмосфере.

Несмотря на постоянный рост уровня CO₂ в атмосфере, вызывающий постепенное потепление поверхности Земли, существует множество природных факторов, которые модулируют этот долгосрочный процесс. Крупные извержения вулканов увеличивают количество мелких частиц в стратосфере, которые отражают солнечный свет, вызывая краткосрочное охлаждение поверхности продолжительностью обычно два–три года, после чего наступает постепенное восстановление. Циркуляция и перемешивание океанских вод естественно меняются 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 примерно 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 вызывают значительные региональные и глобальные изменения температуры и режима осадков, что подтверждается наблюдениями.

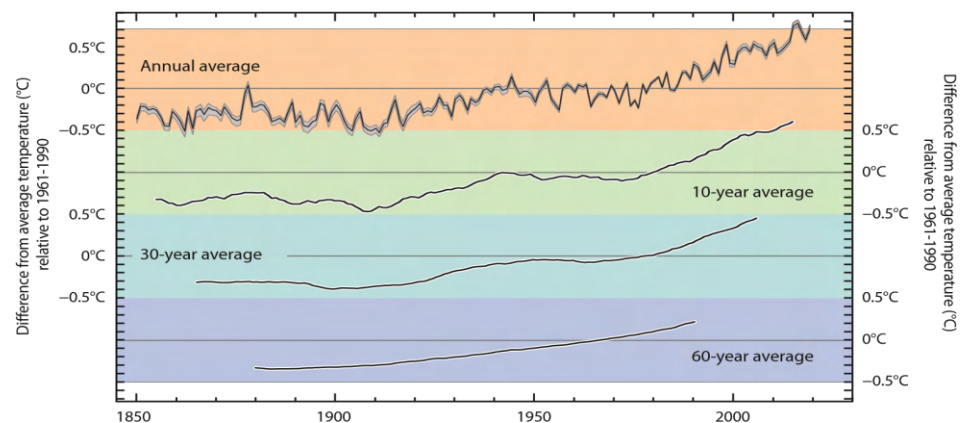
На изменение темпов потепления от десятилетия к десятилетию могут влиять и антропогенные факторы, в частности колебания в выбросах парниковых газов и аэрозолей — мелких частиц в воздухе, которые способны вызывать как потепление, так и охлаждение. Основными источниками таких выбросов являются угольные электростанции и другие виды промышленного загрязнения.

Эти колебания температурных тенденций четко прослеживаются в наблюдаемых температурных данных [Рисунок 4]. Краткосрочные

Природные климатические колебания могут влиять на долгосрочные антропогенные изменения климата — и наоборот, поскольку климатические процессы в разных пространственных и временных масштабах способны взаимодействовать между собой. Именно поэтому прогнозы изменения климата осуществляют с помощью климатических моделей (см. инфобокс, с. 20), которые учитывают различные типы климатических колебаний и их взаимодействие. Надежные выводы об антропогенных изменениях климата можно делать только с учетом долгосрочной перспективы, используя данные, охватывающие многие десятилетия.

Research Unit (Morice et al., 2012).

Рисунок 4. Климатическая система подвержена изменениям из года в год и от десятилетия к десятилетию. Для формирования надежных выводов об антропогенных изменениях климата обычно необходимо использовать многодесятилетние или еще более продолжительные ряды наблюдений. Усреднение данных за такие длительные временные периоды позволяет четче 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 демонстрирует 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



Свидетельствует ли замедление потепления в 2000-х — начале 2010-х годов 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 теплее, чем любой предыдущий год за всю историю инструментальных наблюдений. Такое краткосрочное замедление не опровергает научного понимания долговременного антропогенного потепления, вызванного ростом концентрации парниковых газов.

Десятилетия с замедленным или, наоборот, ускоренным потеплением являются 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 удерживает сравнительно немного тепла, температура поверхности может меняться довольно быстро под влиянием перераспределения тепловой энергии в других компонентах климатической системы (например, в океане) и под действием внешних факторов, таких как извержения вулканов, выбрасывающие 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 быстрее погружается в океанские глубины, это временно замедляет повышение температуры на поверхности Земли и в атмосфере, однако не меняет общей долгосрочной тенденции потепления, обусловленной накоплением CO₂. Например, 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 на протяжении десятилетий и даже столетий. 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.

Даже в периоды замедления роста средней температуры поверхности Земли долгосрочная тенденция к потеплению продолжалась (см. рисунок 4). Так, 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 четырех десятилетий было теплее любого предыдущего десятилетия с момента начала систематических

термометрических наблюдений в 1850-х годах. Долгосрочные последствия глобального потепления проявляются в росте теплосодержания океанов, повышении уровня моря, а также в устойчивом таянии арктического морского льда, ледников и ледяного покрова Гренландии.

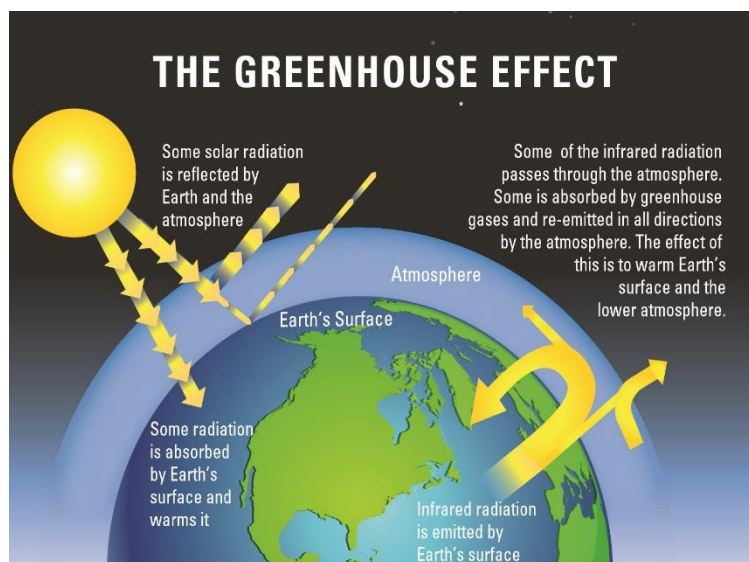
Основы изменения климата

Парниковые газы влияют на энергетический баланс и климат Земли.

Солнце является главным источником энергии для климатической системы Земли. Часть солнечного света отражается обратно в космос, особенно от светлых поверхностей, таких как лед и облака, а остальная поглощается 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 уходит в космос. Любое нарушение этого баланса поступающей и исходящей энергии влияет на климат. Например, даже небольшие изменения в солнечном излучении напрямую влияют на этот энергетический баланс.

Если бы вся тепловая энергия, излучаемая с поверхности Земли, сразу уходила 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 во всех направлениях, включая вниз, поддерживая тепло на поверхности и в нижних слоях атмосферы [Рисунок Б1]. Без этого парникового эффекта жизнь, какой мы ее знаем, не могла бы существовать на нашей планете. Увеличение количества парниковых газов делает атмосферу еще более эффективной в удержании 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 её во всех направлениях, включая вниз, поддерживая тепло на поверхности Земли и в нижних слоях атмосферы. Увеличение концентрации парниковых газов усиливает этот эффект, делая поверхность и нижнюю атмосферу ещё теплее. Изображение создано на основе рисунка Агентства по охране окружающей среды США.



Парниковые газы, выбрасываемые в результате деятельности человека, изменяют энергетический баланс Земли и, соответственно, её климат. Люди также влияют на климат, изменяя характер поверхности земли (например, вырубая леса для сельского хозяйства) и через 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 вносит увеличение выбросов CO₂.

Человеческая деятельность привела к росту концентрации парниковых газов в атмосфере.

Концентрация углекислого газа, метана и закиси азота в атмосфере значительно выросла с начала промышленной революции. Так, средняя концентрация CO₂, измеренная в обсерватории Мауна-Лоа на Гавайях, поднялась с 316 частей на миллион (ppm) в 1959 году (первый полный год имеющихся данных) до более чем 411 ppm в 2019 году [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 чем на 150 %, а оксида азота — примерно на 20 %. Более половины прироста CO₂ произошло после 1970 года. Рост концентрации всех трех газов способствует глобальному потеплению, причем наибольший вклад в него вносит CO₂. Подробнее об антропогенных источниках парниковых газов см. на странице В3.

Ученые исследовали парниковые газы в контексте прошлого. Анализ воздуха, накапливавшегося со временем в Антарктиде, показывает, что концентрация CO_2 начала резко расти в 19 веке [Рисунок В3], после того как на протяжении предыдущих 10 000 лет она держалась в пределах 260–280 ppm. Данные ледяных кернов, охватывающие последние 800 000 лет, свидетельствуют, что в течение этого периода концентрация CO_2 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 CO_2 с 1958 года, выполненные в обсерватории Мауна-Лоа (Гавайи, черная линия) и на Южном полюсе (красная линия), демонстрируют стабильный ежегодный рост CO_2 . Измерения проводятся в удаленных 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 CO_2 растениями. Источник: Программа Скриппса по изучению CO_2 .

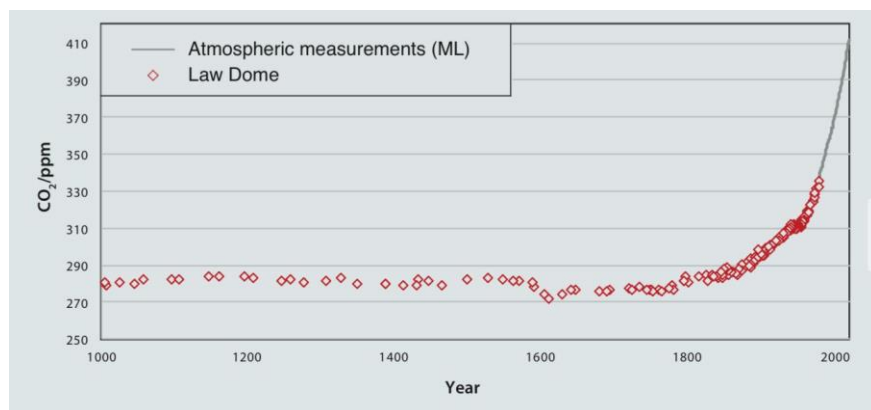
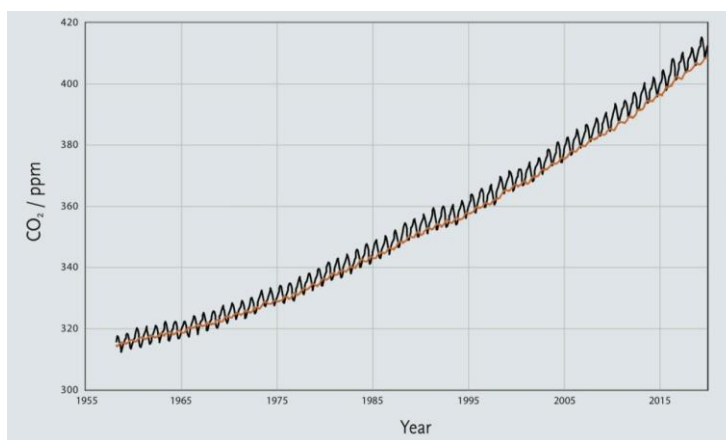


Рисунок В3. Изменения концентрации CO_2 в течение последних 1000 лет, определенные по анализу воздуха, заключенного в ледяном керне из Антарктиды (красные квадраты), показывают резкий рост атмосферного CO_2 , начиная с конца 19 века. Современные атмосферные измерения из обсерватории Мауна-Лоа наложены серым цветом для сравнения. Источник: рисунок Эрика Вольфа, данные Etheridge et al., 1996; Макфарлинг Мюр и др., 2006; Программа Скриппса по изучению CO_2 .

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 других изменений в землепользовании. Увеличение выбросов CO_2 является главным фактором глобального потепления.
- Метан (CH_4) поступает как из природных, так и из антропогенных источников, и его концентрация значительно выросла с доиндустриальных времен из-за деятельности человека, такой как животноводство, выращивание риса, заполнение свалок и использование природного газа (часть которого может высвобождаться при добыче, транспортировке и потреблении).
- Концентрация закиси азота (N_2O) выросла в первую очередь из-за сельскохозяйственной деятельности, в частности использования азотных удобрений, а также из-за изменений в землепользовании.
- Галогенуглероды, включая хлорфторуглероды (ХФУ), используются в качестве хладагентов и огнезащитных веществ. Они являются мощными парниковыми газами и разрушают озоновый слой. Хотя производство большинства ХФУ в настоящее время запрещено и их воздействие начинает снижаться, многие заменители ХФУ также являются сильными парниковыми газами, и их концентрация, наряду 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, 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 огромное количество 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 года 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 с момента начала инструментальных наблюдений в 1850 году.

Узнайте о ледниковых периодах:

Детальный анализ океанических отложений, ледяных кернов и других данных показывает, что по крайней мере на протяжении последних 2,6 миллиона лет Земля переживала продолжительные холодные периоды, когда большие территории Северного полушария были покрыты толстыми слоями льда. Эти длительные ледниковые циклы, продолжавшиеся 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, достигающей 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. Средняя глобальная



колебания температуры во время ледникового цикла оцениваются примерно в $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($9^{\circ}\text{F} \pm 2^{\circ}\text{F}$).

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

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

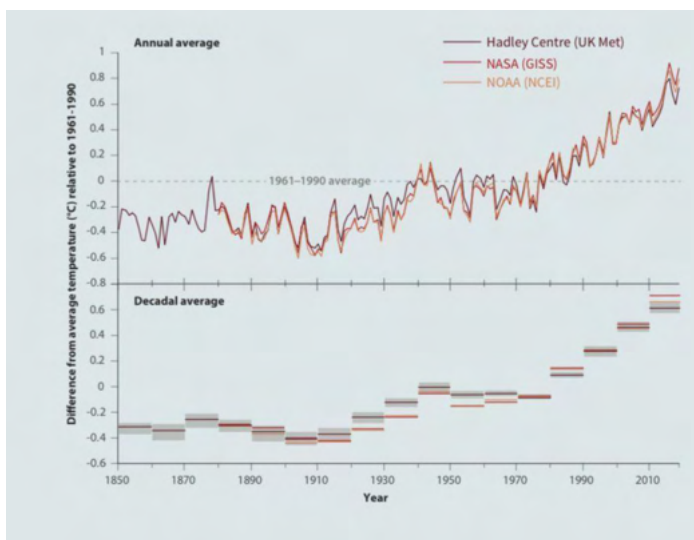


Рисунок В4. Средняя глобальная температура поверхности Земли неуклонно растет, что видно на графике, демонстрирующем объединенные измерения температуры на суше и океане с 1850 по 2019 год. Данные получены на основе трех независимых анализов имеющихся наборов наблюдений. На верхней панели представлены среднегодовые значения температуры из каждого анализа, а на нижней панели — среднее десятилетние значения, где также показан диапазон неопределенности (серые полосы) для набора данных HadCRUT4. Все изменения температуры представлены относительно среднего глобального значения за базовый период 1961–1990 годов. Источник: NOAA Climate.gov, на основе данных IPCC AR5, 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 процессов.

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

Важнейшие обратные связи в климатической системе связаны с водой. Более теплая атмосфера удерживает больше водяного пара, который является мощным парниковым газом и вызывает дополнительное потепление. Из-за короткого срока существования водяного пара в атмосфере его концентрация в основном реагирует на потепление, поэтому она усиливает, а не инициирует климатические изменения. В полярных регионах повышение температур вызывает таяние морского льда и уменьшение снежного покрова, обнажая более темную поверхность океана и суши, которая поглощает больше тепла и дополнительно повышает температуру. Еще одна важная, но менее изученная 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 изменения 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 на всю глубину трудно, и скорость передачи тепла в более глубокие слои является медленной. Она меняется от года к году и от десятилетия к десятилетию и в значительной степени определяет темпы потепления на поверхности. До 1970 года наблюдения за подводными слоями были ограниченными, но с того времени 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 положения, в частности широты и положения на континентах. На средние значения температуры, осадков и их экстремальные проявления (которые обычно сильнее всего влияют на природные системы и инфраструктуру) также сильно влияют местные ветровые условия.

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

Деятельность человека изменяет климат.

Тщательный анализ всех имеющихся данных и доказательств 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 природные колебания, которые влияют 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, вызывающее 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, вызывая краткосрочное охлаждение поверхности в течение примерно двух-трех лет. На протяжении сотен тысяч лет медленные повторяющиеся изменения орбиты Земли вокруг Солнца, меняющие распределение солнечной энергии на планете, были достаточными для возникновения циклов ледниковых периодов в течение последних 800 000 лет. «Отпечатки пальцев» — это мощный метод исследования причин изменения климата. Разные 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, вызывает совершенно иные пространственные и вертикальные закономерности изменения температуры по сравнению с теми, что вызваны ростом концентрации CO₂.

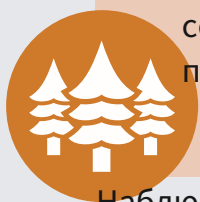
Узнайте больше об антропогенных причинах изменения климата:

Кроме влияния на тепловое излучение с поверхности Земли и отражение 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 частицы, взвешенные в атмосфере. 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 к 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. Преобразование лесов, сельскохозяйственных угодий или городов меняет отражательную способность поверхности, что может вызывать как локальное потепление, так и охлаждение.



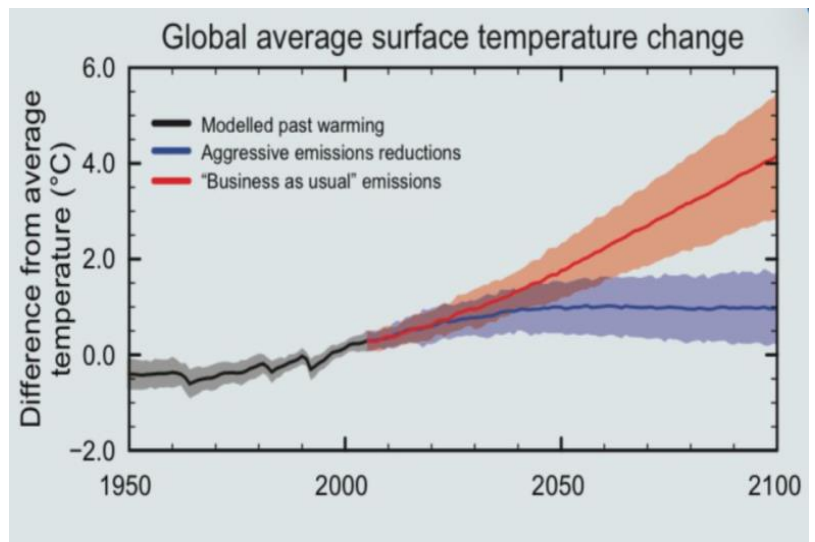
Наблюдаемые изменения температуры атмосферы имеют характер, который значительно ближе к долгосрочному повышению уровня CO_2 , чем к колебаниям, вызванным исключительно солнечной активностью. Ученые регулярно проверяют, могут ли исключительно природные факторы — изменения солнечной активности, вулканическая деятельность или внутренняя изменчивость климата — правдоподобно объяснить наблюдаемые закономерности в различных аспектах климатической системы. Результаты этих исследований показывают, что климатические изменения последних нескольких 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 им более уверенно прогнозировать будущие изменения климата. Однако несколько факторов затрудняют 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 CO_2 . В-третьих, естественная изменчивость климата на протяжении десятилетий может модулировать эффекты основной тенденции

изменения температуры. В целом, все климатические модели сходятся на том, что Земля продолжит существенно нагреваться в ближайшие десятилетия и столетия. Если не будет осуществлено технологических или политических изменений для уменьшения выбросов от их нынешнего уровня, в 21 веке ожидается дальнейшее глобальное потепление на 2,6–4,8 °C (4,7–8,6 °F) дополнительно к уже имеющемуся [РИСУНОК В5]. Прогнозирование того, как эти изменения повлияют на климат в конкретных регионах, является сложной задачей, но оценки становятся точнее благодаря развитию региональных и местных моделей.

РИСУНОК В5. Ожидаемая величина и скорость глобального потепления в 21 веке зависят от общего объема парниковых газов, выбрасываемых человечеством. На графике показаны два сценария: неизменные выбросы (красная линия) и агрессивное сокращение выбросов до почти нулевого уровня в течение 50 лет (синяя линия). Черная линия отображает модельную оценку прошлого потепления. Каждая сплошная линия представляет среднее значение результатов различных моделей для одного сценария, а закрашенные 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 или лета всё ещё бывают очень холодными?

Глобальное потепление отражает долгосрочную тенденцию, но не гарантирует, что каждый год будет теплее предыдущего. Привычные колебания погоды по-прежнему могут вызывать отдельные 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, естественные климатические колебания и локальные погодные условия. Например, явления Ла-Нинья изменяют погодные модели, делая некоторые регионы более влажными, при этом влажные лета обычно прохладнее. Более сильные ветры из полярных районов могут вызывать периодические похолодания зимой. Аналогично, определенные фазы Северо-Атлантической 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 погодные явления. Глобальное потепление повышает вероятность теплых дней и сезонов и уменьшает вероятность холодных. Например, 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, за последние десятилетия частота тепловых волн возросла в Европе, Азии, Южной Америке и Австралии, а тепловые волны в океанах также становятся более распространенными.



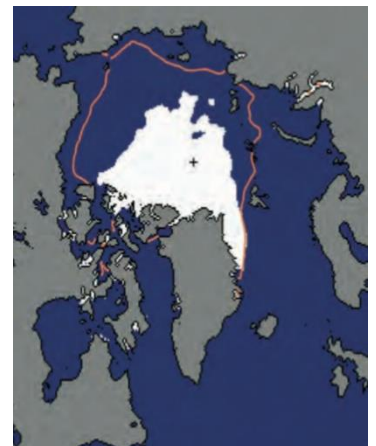
Почему арктический морской лёд уменьшается, тогда как антарктический морской лёд почти не меняется?

Площадь морского льда определяется ветрами, океанскими течениями и температурой. В Северном Ледовитом океане морской лёд, частично ограниченный сушей, напрямую реагирует на потепление. В Антарктике же изменения морского льда по большей части обусловлены изменениями ветров и океанских течений, а не прямым нагреванием.

Некоторые различия 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 лёд ограничен сушей, а в Южном океане он может свободно распространяться в окружающие воды, причём его южная граница определяется береговой линией Антарктиды. Поскольку антарктический морской лёд формируется на широтах, более близких к экватору, летом его остаётся меньше. Размер морского льда меняется сезонно на обоих полюсах, но долгосрочные тенденции различаются, отчасти из-за этих географических особенностей. С конца 1970-х годов арктический морской лёд резко сократился, особенно летом и осенью. Со времени спутниковых наблюдений с 1978 года ежегодная минимальная площадь арктического льда (в сентябре) уменьшилась примерно на 40 % (РИСУНОК 5). Каждой зимой лёд восстанавливается, но становится тоньше. Оценки прошлого объёма льда свидетельствуют, что такое сокращение может быть беспрецедентным по крайней мере за последние 1450 лет. Поскольку морской лёд сильно отражает солнечный свет, его уменьшение усиливает потепление, так как тёмная поверхность океана поглощает больше энергии.

РИСУНОК 5. Летняя площадь арктического морского льда в 2012 году (измеренная в сентябре) была рекордно низкой (обозначена 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 году, который до сих пор остаётся 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 по снегу и ледовому покрову.

В Антарктике общая площадь морского льда с 1979 по 2014 год несколько увеличилась, 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 лёд. После 2014 года антарктический морской лёд начал сокращаться, достигнув рекордно низкого уровня в 2017 году и оставаясь низким в течение следующих двух лет.

13 Каким образом изменение климата влияет 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 некоторых экстремальных погодных явлений. Как ожидается, явления, тесно связанные с температурой — такие как волны тепла и чрезвычайно жаркие дни — становятся более вероятными. Кроме того, сильные дожди и снегопады, повышающие риск наводнений, также случаются 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 множество факторов, включая природные колебания климата, такие как Эль-Ниньо и Ла-Нинья, что затрудняет прямую связь конкретного явления с деятельностью человека. Однако исследования позволяют оценить, сделало ли потепление климата его более вероятным или серьезным.

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

Более теплая атмосфера и океаны повышают вероятность того, что сильнейшие ураганы будут интенсивнее, принесут больше осадков, охватят новые территории и могут быть больше и продолжительнее, что подтверждается наблюдениями в Северной Атлантике. Повышение уровня моря увеличивает объем воды, выбрасываемой на берег во время прибрежных штормов, и вместе с

с более интенсивными осадками вызывает более разрушительные штормовые нагоны и наводнения. Хотя глобальное потепление, вероятно, делает ураганы сильнее, изменения в их количестве каждый год 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 сохраняется неопределенность относительно влияния других факторов, включая изменения в вертикальных и горизонтальных движениях ветра, на образование торнадо.



14

Как быстро поднимается уровень моря?

Долгосрочные наблюдения с помощью приливных датчиков и современные спутниковые измерения показывают, что уровень Мирового океана повышается. Наиболее точная оценка среднего глобального повышения за последнее десятилетие составляет примерно 3,6 мм в год (0,14 дюйма в год). Скорость повышения уровня моря возросла 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 составляет около 16 см (6 дюймов) (РИСУНОК 6).

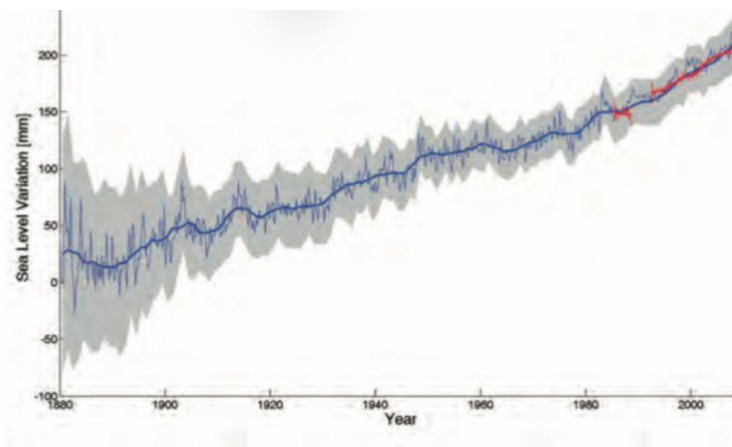
Повышение уровня моря происходит по нескольким взаимосвязанным причинам: более теплая океанская вода расширяется, горные ледники по всему миру тают, а ледниковые щиты Гренландии и Антарктиды теряют массу. Все эти процессы являются следствием глобального потепления. Уровень моря также колеблется из-за изменений объема воды на суше, а локальные изменения зависят от геологических процессов (поднятия или опускания 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 нагонов.

Если выбросы CO₂ и других парниковых газов продолжат расти нынешними темпами, к 2100 году уровень моря может подняться как минимум на 0,4–0,8 м (1,3–2,6 фута), а дальнейшее

таяние ледниковых щитов может еще больше увеличить этот показатель. Повышение уровня моря не остановится в 2100 году: в последующие столетия уровень продолжит расти из-за нагревания океанов и таяния ледников.

Сложно точно предсказать, 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, во время последнего межледникового периода 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, что длительные периоды повышенных температур могут привести к значительной потере ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды и существенному повышению уровня моря на протяжении 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 возросла: данные приливных датчиков (синий цвет) и спутников (красный цвет) показывают, что наиболее 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 уменьшилась благодаря увеличению количества измерительных станций и точек данных для расчета глобального среднего. Источник: Shum и Kuo (2011).



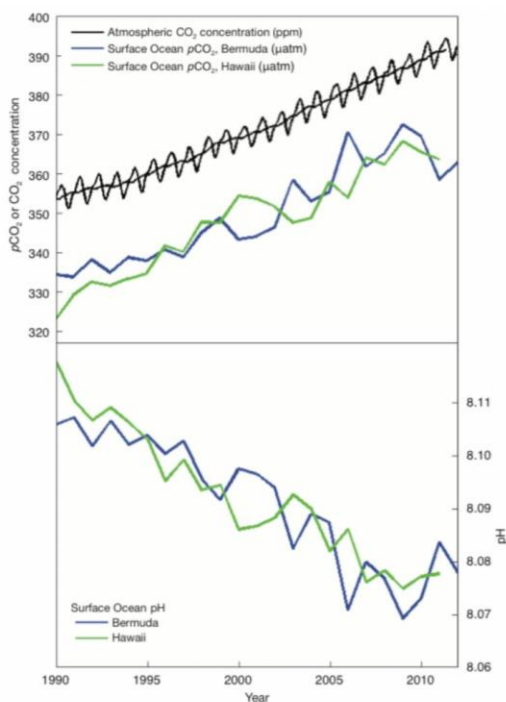
Что такое окисление океана и почему это так важно?

Прямые наблюдения за химическим составом океана показывают, что вода становится более кислой (pH понижается) (РИСУНОК 7.1).

Некоторым морским организмам, таким как кораллы и определенные моллюски, сложно формировать и поддерживать свои карбонатно-кальциевые раковины, 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 водах некоторые морские организмы формируют деформированные раковины и имеют сниженные 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 иметь неопределенное влияние на морские экосистемы и пищевую цепь.

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



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

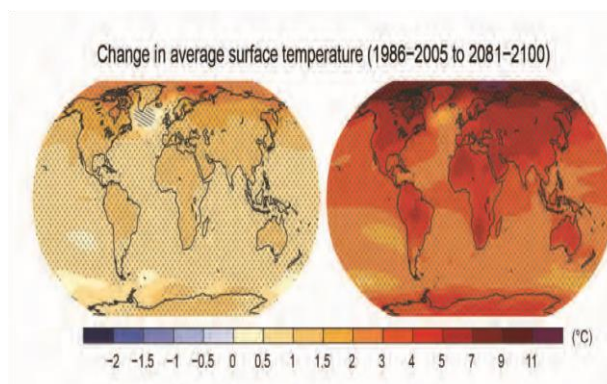
Ученые с высокой степенью уверенности прогнозируют, что если выбросы парниковых газов будут и дальше расти без ограничений, температура на Земле в течение XXI века повысится еще на 2,6–4,8 °C (4,7–8,6 °F) сверх уже зафиксированного потепления (см.

Рисунок 8).

Потепление, вызванное большими выбросами парниковых газов в атмосферу, объясняется базовыми свойствами самих этих газов. Это, в свою очередь, запускает изменения в природных климатических процессах, которые усиливают общий эффект потепления. Масштабы повышения температуры зависят от количества парниковых газов, накапливающихся в атмосфере, то есть от выбранной человечеством траектории выбросов. Если совокупные выбросы с 1875 года останутся ниже 900 гигатонн (900 миллиардов тонн) углерода, то 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 выброшено в атмосферу. Чтобы ограничить потепление до 1,5 °C (2,7 °F), требуется 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 1 °C (1,8 °F). Но реальное потепление будет больше из-за обратных связей климатической системы, которые могут как усиливать, так и ослаблять первоначальный эффект. Самый сильный усиливающий обратный связан с водяным паром —

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

РИСУНОК 8. Если выбросы парниковых газов продолжат расти нынешними темпами, без внедрения технологических или регуляторных мер для их сокращения, то, по самым оптимистичным оценкам, к концу XXI века средняя глобальная температура может вырасти еще на 2,6–4,8 °C (4,7–8,6 °F) (справа). Прогнозируется, что суша будет нагреваться быстрее, чем океаны, а следовательно, темпы потепления на континентах будут превышать среднемировые показатели. На рисунке слева показан возможный сценарий потепления в случае очень агрессивного сокращения выбросов. Цифры отражают средние оценки температуры, полученные по результатам нескольких климатических моделей, для периода 2081–2100 годов по сравнению с 1986–2005 годами. Источник: IPCC AR5 (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, Пятый оценочный доклад).



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. Другая важная обратная связь связана с углеродным циклом. В настоящее время океаны и суша поглощают около половины антропогенных выбросов CO₂, но с ростом температуры их способность удерживать углерод уменьшается. Это означает более быстрое накопление CO₂ в атмосфере и дальнейшее ускорение потепления. Хотя разные климатические модели дают несколько различные прогнозы, все они единогласно указывают, что совокупный эффект обратных связей заключается в усилении глобального потепления.

17

Является ли изменение климата всего на несколько градусов поводом для беспокойства?

Так. Хотя повышение средней глобальной температуры на несколько градусов может казаться незначительным, во время последнего ледникового периода средняя глобальная температура была всего на 4–5 °C (7–10 °F) ниже, чем сейчас. Глобальное потепление всего на несколько градусов будет сопровождаться масштабными изменениями региональной и местной температуры, количества осадков, а также увеличением частоты некоторых видов экстремальных погодных явлений. Эти и другие изменения, в частности повышение уровня моря и штормовые приливы, окажут 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 режимах выпадения осадков, увеличением количества экстремальных погодных явлений, закислением океанов, таянием ледников и повышением уровня моря, что усиливает риск затопления прибрежных территорий и штормовых нагонов. Уже сегодня рекордно высокие температуры случаются значительно чаще, чем рекордно низкие; влажные регионы становятся еще влажнее, а засушливые — еще суше; интенсивность сильных ливней возрастает, а площадь снежного покрова — важного источника пресной воды для многих регионов — постепенно сокращается.

Ожидается, что эти последствия усилятся с дальнейшим потеплением и будут представлять угрозу для производства продовольствия, снабжения пресной водой, прибрежной инфраструктуры, а особенно для благополучия большого количества людей, которые в настоящее время проживают в низинных районах. Хотя некоторые регионы могут получить определенную локальную выгоду от потепления, в целом его долгосрочные последствия будут разрушительными.

Причиной для 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 по адаптации или для того, чтобы экосистемы успели приспособиться, что повышает риски в регионах, уязвимых к более интенсивным экстремальным погодным явлениям и повышению уровня моря.

18

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

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

Сравнение прогнозов моделей с наблюдениями позволяет определить, что хорошо изучено, и одновременно выявить неопределенности или пробелы в нашем понимании. Это помогает установить приоритеты для новых исследований. Поэтому тщательный мониторинг всей климатической системы — атмосферы, океанов, суши и льда — является чрезвычайно важным, поскольку климатическая система может быть полна неожиданностей.

Полевые и лабораторные данные, а также теоретические знания используются для совершенствования моделей климатической системы Земли и улучшения отображения в них ключевых процессов, особенно тех, что связаны 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 меняться вследствие 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, меньших тех, которые способны различить большинство современных моделей. Рост вычислительной мощности уже позволяет отображать некоторые из этих процессов в моделях нового поколения.

Десятки групп и научно-исследовательских институтов работают над климатическими моделями, и ученые сейчас имеют возможность анализировать результаты практически всех основных моделей земной системы мира, сравнивая их между собой и с наблюдениями. Такие возможности чрезвычайно полезны для выявления сильных и слабых сторон различных моделей и диагностики причин расхождений 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.

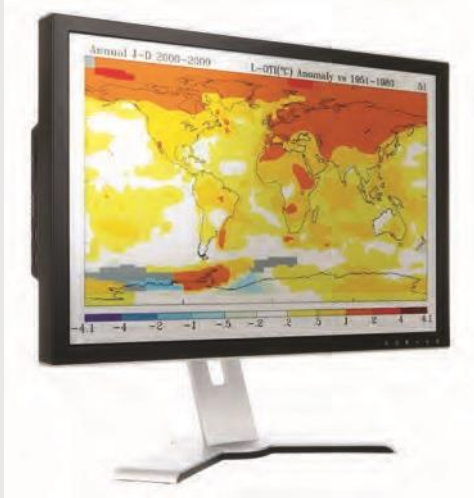
Изучение того, как климат реагировал на значительные изменения в прошлом, является еще одним способом проверить, правильно ли мы понимаем работу различных процессов и способны ли модели надежно воспроизводить климат в широком диапазоне условий.

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 должным образом изучена с помощью лабораторных экспериментов. Поскольку мы также не можем проводить контролируемые эксперименты на самой Земле, компьютерные модели являются одними из важнейших инструментов для изучения климатической системы. Климатические модели базируются на математических уравнениях, которые отражают наилучшее 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, которую позволяют наше понимание и имеющиеся 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 столетия. Их прогнозы относительно основных особенностей долгосрочных изменений климата, вызванных деятельностью человека, остаются надежными, поскольку поколения все более сложных моделей дают всё более детальную 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 для беспокойства катастрофические сценарии, связанные с «точками невозврата», такие как «остановка Гольфстрима» и выброс метана из Арктики?

Результаты лучших доступных климатических моделей не предсказывают резкого изменения (или разрушения) Атлантической меридиональной циркуляции, включающей Гольфстрим, в ближайшем будущем. Однако эта 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), и с дальнейшим усилением потепления нельзя исключать возможность возникновения других серьезных резких изменений. Остав атмосферы меняется в сторону условий, которые не наблюдались в течение миллионов лет, поэтому мы движемся в неизведанные территории, и неопределенность велика. Климатическая система включает 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, вызвало широкомасштабные климатические изменения в Северном полушарии. В настоящее время потепление Северной Атлантики вследствие таяния ледникового покрова Гренландии происходит постепенно, поэтому резких изменений пока не ожидается.

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 такого быстрого высвобождения климат подвергнется значительным и стремительным изменениям. Хотя такие высокорисковые события



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

Помимо резких изменений в самой климатической системе, постепенные климатические изменения могут превысить пороговые значения, вызывающие резкие изменения в других системах. Например, в человеческих системах инфраструктура обычно проектируется с учетом климатических условий на момент строительства. Постепенные изменения климата могут вызвать 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 пищуха и многочисленные океанские кораллы, больше не смогут выживать в своих нынешних местах обитания и будут вынуждены переселяться (если это возможно) или быстро адаптироваться. Другие 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.

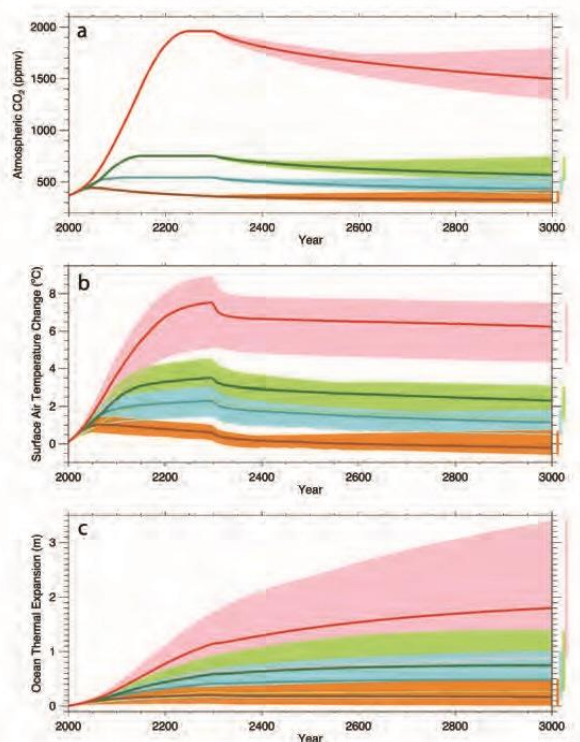
Если бы выбросы парниковых газов прекратились, вернулся бы климат к условиям 200-летней давности?

Нет. Даже если выбросы парниковых газов внезапно прекратятся, температура поверхности Земли будет требовать тысячи 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 атмосферному CO_2 потребуются многие тысячи лет, чтобы вернуться к «доиндустриальному» уровню. Температура поверхности останется повышенной как минимум в течение тысячи лет, что означает долгосрочное обязательство по потеплению планеты из-за прошлых и текущих выбросов. Уровень моря, вероятно, продолжит подниматься на протяжении многих столетий даже после того, как температура перестанет расти (РИСУНОК 9). Для того чтобы остановить таяние ледников и ледового покрова Гренландии, сформировавшихся во время прошлых холодных климатических периодов, необходимо значительное охлаждение. Следовательно, текущее потепление Земли, вызванное CO_2 , практически необратимо в человеческих временных масштабах. Величина и скорость дальнейшего потепления почти полностью будут зависеть от того, сколько CO_2 еще будет выброшено человечеством.

Сценарии будущих климатических изменений все чаще предусматривают использование технологий, способных удалять парниковые газы из атмосферы. В таких сценариях «отрицательных выбросов» предполагается, что в будущем будут предприняты 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, всё равно будет необходимым существенное сокращение выбросов CO_2 .

РИСУНОК 9. Если глобальные выбросы внезапно 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 продолжит 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 к 2300 году (красный), сценарий агрессивного сокращения выбросов до нуля в течение 50 лет (оранжевый) и два промежуточных сценария выбросов (зеленый и синий). Незначительное снижение температуры к 2300 году обусловлено ликвидацией выбросов короткоживущих парниковых газов, включая метан. Источник: Zickfeld et al., 2013.



В этом документе объясняется, что существуют хорошо известные физические механизмы, с помощью которых изменения в количестве парниковых газов вызывают изменения климата. Обсуждаются доказательства того, что концентрация этих газов в атмосфере увеличилась и продолжает быстро расти, что происходят изменения климата, и что большинство последних изменений почти наверняка вызваны выбросами парниковых газов, обусловленными деятельностью человека. Дальнейшие изменения климата неизбежны; если выбросы парниковых газов будут продолжаться без изменений, будущие изменения значительно превысят те, что произошли до сих пор. Существует ряд оценок относительно 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 ждать изменений 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 быть сочетанием этих различных вариантов. Разные страны и сообщества будут отличаться по своей уязвимости и способности к адаптации. Необходимо провести важную дискуссию относительно выбора среди этих вариантов, чтобы определить, что является лучшим для каждой группы или нации и, что наиболее важно, 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. Наше изложение науки об изменении климата, с указанием фактов и неопределенностей, предлагается как основа для информированного ведения этой политической дискуссии.

Авторы

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

- Эрик Вольф FRS (руководитель в Великобритании), Кембриджский университет, Кембридж
- Джон Шеперд, член Королевского общества, Университет Саутгемптона
- Инес Фунг (NAS, руководитель со стороны США), Калифорнийский университет
- Кит Шайн, член Королевского общества, Университет Рединга. Сьюзан Соломон (NAS),
- Брайан Хоскинс FRS, Институт по вопросам изменения климата
- Сьюзан Соломон (NAS), Массачусетский технологический институт
- Джон Ф.Б. Митчелл FRS, Британская метеорологическая служба
- Кевин Тренберт, Национальный центр исследования атмосферы
- Тим Палмер FRS, Оксфордский университет
- Дон Вуэбблс, Университет Иллинойса
- Бенджамин Сантер (NAS), Національна лабораторія Лоуренса Лівермора Національна лабораторія
- Джон Уолш, Университет Аляски, Фэрбанкс

Поддержку персонала для пересмотра 2020 года предоставили Ричард Уокер, Аманда Перселл, Нэнси Хадлстон и Майкл Хадсон. Мы выражаем особую благодарность Ребеке 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 наук о Земле, Пенсильванский государственный университет
- Джерри Мил, старший научный сотрудник, Национальный центр атмосферных исследований
- Алек Броерс FRS, бывший президент Королевской инженерной академии
- Джон Пендри, член Королевского общества, Имперский колледж Лондона
- Гарри Элдерфилд FRS, кафедра наук о Земле, Кембриджский университет

Поддержка

Поддержку издания 2014 года предоставили 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 2020 года.