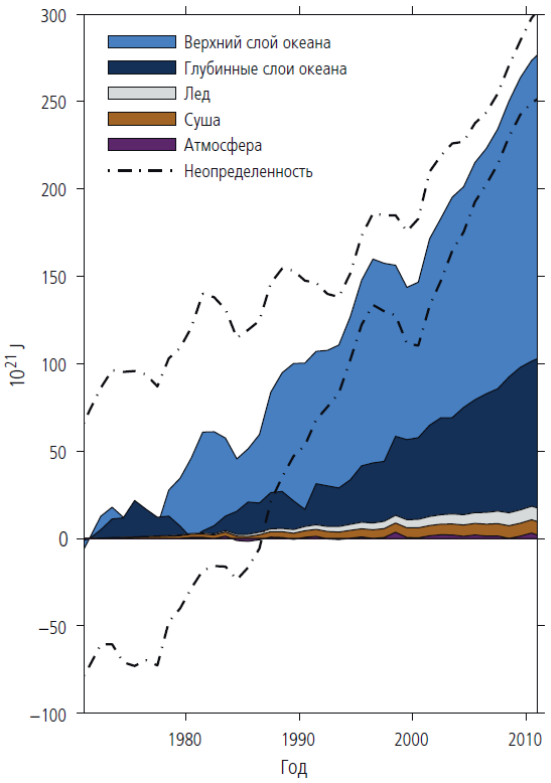
Обоснование вывода о сильном антропогенном влиянии на изменение климата за последние 50 лет и в XXI веке в целом

Глобальное потепление последних десятилетий

Климатическая система Земли состоит из пяти взаимодействующих друг с другом компонентов – атмосферы, гидросферы, криосферы, деятельного слоя суши и биосферы. При этом именно в водах океана находится львиная доля тепловой и кинетической энергии всей климатической системы. С 1970-х годов, когда начались массовые исследования и измерения температуры различных слоев воды во всех частях Мирового океана, получены неопровержимые доказательства роста теплосодержания – аккумуляции энергии в климатической системе Земли. Это вполне точная информация (диапазон неопределенности эффекта гораздо меньше его величины). Главную роль играет потепление верхних слоев океана (до 700 м), меньший вклад вносят более глубокие слои. Таяние льда и прогрев континентов вносят гораздо меньшие вклады. Еще меньший вклад вносит потепление атмосферы. Информация о возможном временном снижении температуры воздуха не может служить аргументом против глобального потепления.



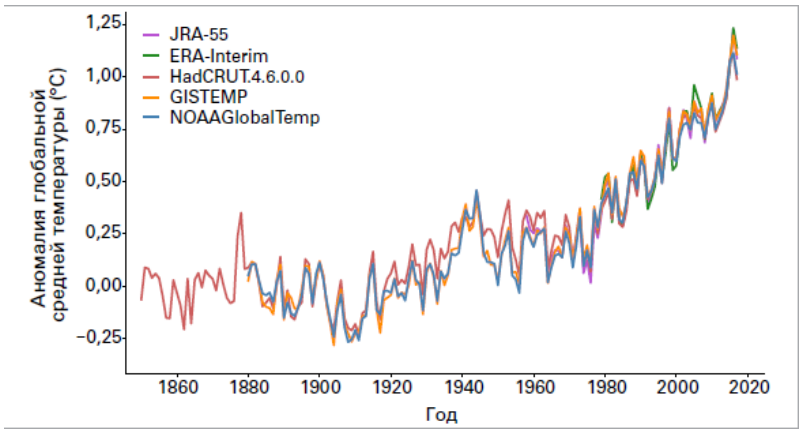
Увеличение количества энергии, аккумулированной в климатической системе Земли

Верхний слой океана (700 м), глубинные слои океана, включая оценки для слоя ниже 2000 м с 1992г.), таяние льда (для ледников и ледяных шапок в горах, ледяных щитов Гренландии и Антарктики с 1992г., для льда в Арктике – с 1978 г.), прогрев континентов (суши) и потепление атмосферы (с 1979 г.). Неопределенность оценивается как 90-процентные доверительные интервалы суммарной ошибки всех пяти компонентов.

Источник: МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария, стр. 44.

Температура поверхностного слоя океана (верхние 75 м) с начала 1970-х годов выросла более, чем на 0,5^{0}С; в более глубоких слоях рост

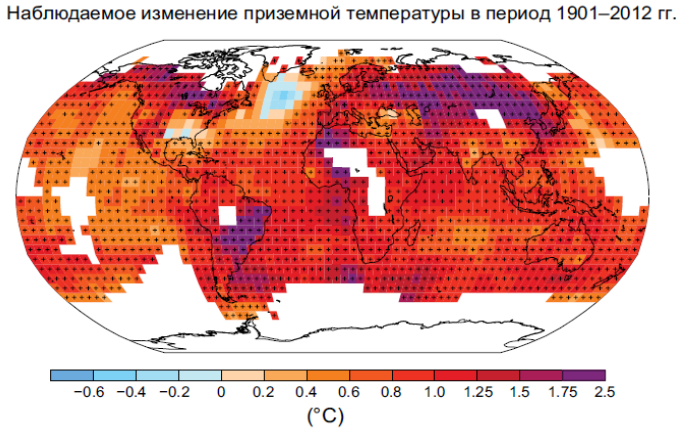
температуры меньше, он экспериментально обнаруживается до 2000 м, но не глубже[1]. При этом температура приповерхностного слоя атмосферы на всей планете к 2017 году выросла на 1,0^{0}С, над сушей примерно на 0,2^{0}С больше, а над океаном на столько же меньше. Это подтверждается всеми долгосрочными рядами глобальных данных различных стран, которые хорошо согласуются между собой[2]. Выводы о таких изменениях не могут быть поставлены под сомнение из-за тех или иных методических проблем, меньшего числа измерений в океане или в отдельных странах.



Изменение температуры в приповерхностном слое воздуха в мире в целом

Аномалия – отклонение от среднего уровня 1850-1900 гг.

Данные 1850-2017 гг. по наборам данных ведущих метеорологических центров.



Региональное распределение изменения температуры с 1901 по 2012 г. Изменения на территории России в 1,5 раза больше, чем в среднем

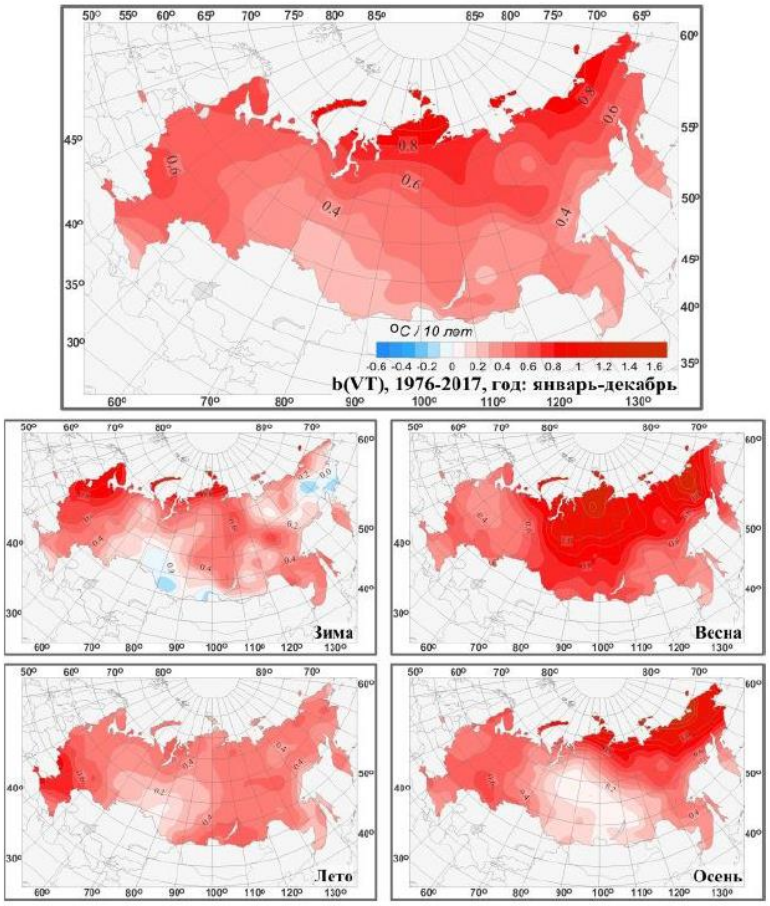
Источник: Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 году. Всемирная метеорологическая организация, 2018, 40 с. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4457

Выше на карте, составленной Всемирной метеорологической организацией, белым цветом обозначены части планеты, где данных относительно мало, но они есть. Наблюдения ведутся в удаленных районах Мирового океана, на станциях в Арктике и в Антарктиде, и с судов в Южном океане. Данные Росгидромета охватывают всю Российскую Арктику и демонстрируют сильный рост температур во все сезоны (исключение представляют собой зимние температуры в южной части

[1] IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. SPM, резюме на русском языке, стр. 6 www.ipcc.ch

[2] Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 году. Всемирная метеорологическая организация, 2018, 40 с. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4457

Чукотки) [3]. При этом скорость роста среднегодовой температуры за последние 40 лет исключительная для мира в целом – 0,5-0,9^{0}С за 10 лет, что в 5-10 раз выше чем в среднем по миру.



Изменение температуры в приповерхностном слое воздуха в России

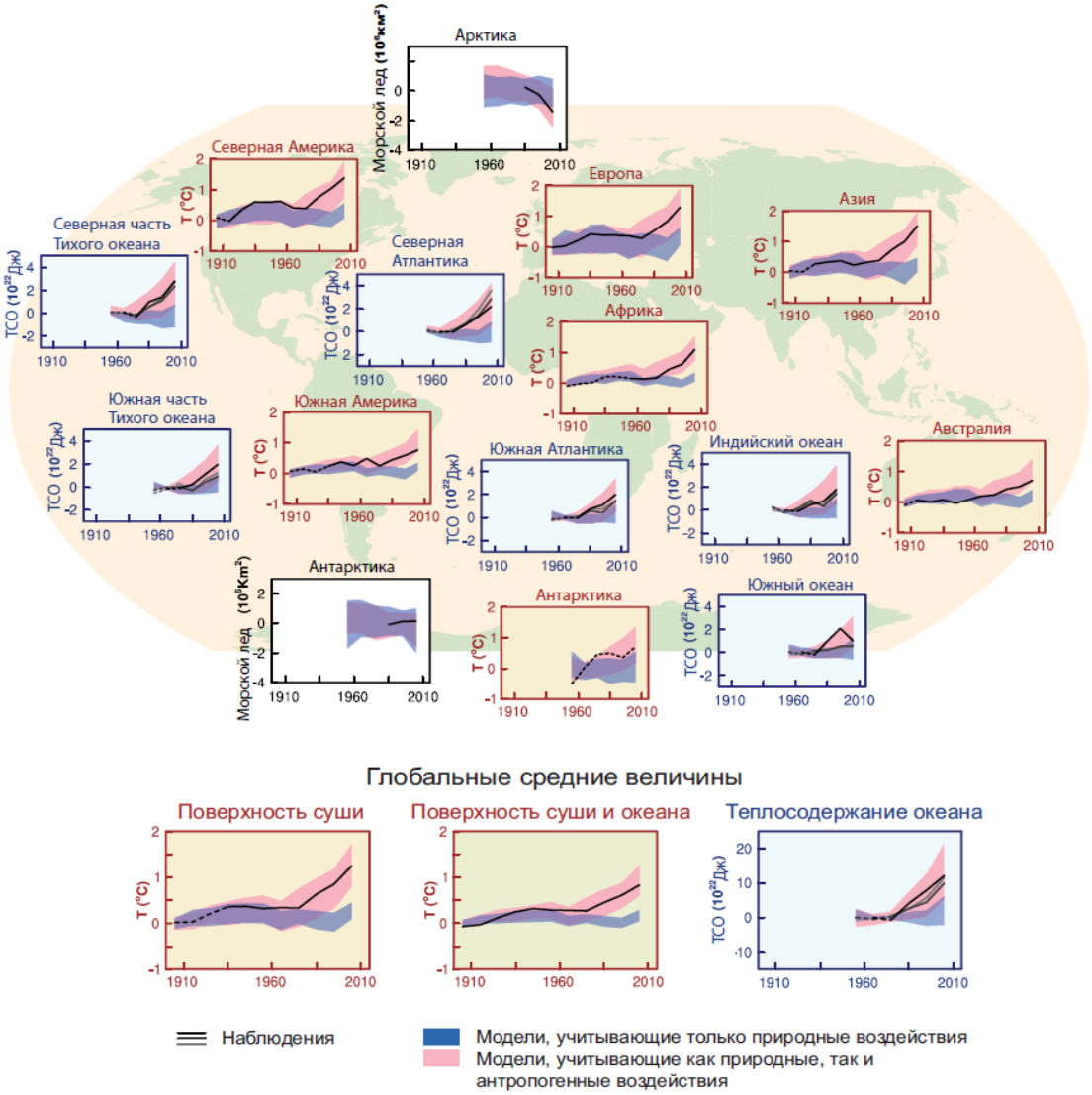
Рост среднегодовой температуры приземного слоя воздуха за 1976-2017 гг., ^{0}С/10 лет (коэффициент линейного тренда)

Рост средних сезонных температур приземного слоя воздуха за 1976-2017 гг., ^{0}С/10 лет. (коэффициент линейного тренда)

Источник: Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 год. – Москва: Росгидромет, - 2018. 69 стр. http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru

Очень важно, что идут одновременные изменения во всех частях климатической системы Земли, которые по физике атмосферных и океанских процессов увязываются воедино. Они не могут быть объяснены естественными причинами (этот вопрос более подробно рассматривается ниже), но качественно и количественно воспроизводятся моделями, когда в них вводится антропогенное воздействие – усиление парникового эффекта и загрязнение атмосферы аэрозольными частицами.

[3] Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 год. – Москва: Росгидромет, - 2018. 69 стр. http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru



Одновременные изменения температуры воздуха, теплосодержания вод и площади морского льда: сравнение наблюдаемых и расчетных трендов.

Приземные температуры воздуха на континентах (желтые прямоугольники), площади морского льда в сентябре (белые прямоугольники), теплосодержания верхних слоев океана (голубые прямоугольники). Отклонения приземных температур приведены относительно 1880-1919 гг., теплосодержания океана – 1960-1980 гг., морского льда – 1979-1999 гг. Все временные ряды усреднены по десятилетиям и отнесены к середине десятилетия. Если доля площади региона, охваченная наблюдениями за температурой, составляет менее 50%, то данные показаны пунктиром. Для теплосодержания океана и морского льда сплошные линии показывают периоды с хорошим охватом более качественными данными, прерывистые линии – периоды, когда охват данными был только достаточным, но неопределенности были более значительными. Модельные результаты приведены в виде диапазонов значений, полученных при расчетах по многим моделям (мультимодельному ансамблю CMIP5), затененные полосы показывают доверительные интервалы от 5 до 95 %.

Источник: IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. SPM, резюме на русском языке, стр. 16 www.ipcc.ch

Физическими факторами, влияющими на изменение климата, являются природные и антропогенные вещества и процессы, которые

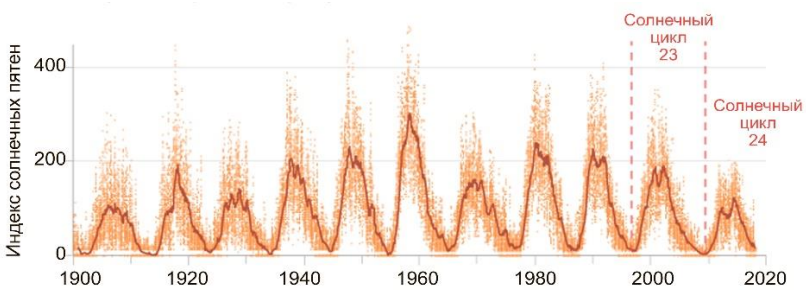
изменяют энергетический баланс Земли. Кроме этого, имеется значительная внутренняя вариабельность климатической системы. Ниже сначала более подробно рассматривается влияние естественных факторов на климат последних 100 лет, затем дается ретроспектива изменений за тысячи и миллионы лет. После этого показывается, как сейчас на эти процессы накладывается антропогенное воздействие.

Естественная изменчивость климата за последние 100 лет

К *естественным* внешним воздействиям относятся колебания орбитальных параметров Земли, вулканическая деятельность и солнечная активность. Солнце является энергетическим источником климатической системы Земли, поступление тепла из недр планеты или от сжигания топлива человеком очень мало. Поэтому не удивительно, что его вариации, прежде всего, стали рассматриваться как фактор изменений климата.

Хорошо известный 11-летний геомагнитный цикл Солнца приводит к очень небольшим изменениям количества энергии, приходящей на верхнюю границу атмосферы, всего на 0,1%. Этого достаточно, чтобы нагреть или охладить поверхность Земли максимум на ±0,1^{0}С. Есть более долгосрочные изменения: в частности, в первой половине XX века отмечался рост пиков активности Солнца. За последние 20 лет Солнце не могло оказать значительного влияния на температуру Земли, которая за это время сильно возросла.

Изменение активности Солнца с 1900 года



Небольшое снижение солнечной активности в начале XX века могло немного замедлить потепление поверхности Земли.

Источник: Данные NOAA Climate.gov на основе базы данных WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium. См.: Lindsey Rebecca. Did global warming stop in 1998? September 4, 2018 https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/did-global-warming-stop-1998

В начале 2000-х годов, перед спадом 23-го цикла Солнца, некоторыми астрономами высказывалось предположение о близком глобальном похолодании длительностью в несколько десятилетий, вызванном снижением солнечной активности, что не оправдалось. Тем не менее, принципиальная возможность такого явления не исключена. Этот вопрос был специально рассмотрен в Оценочном докладе Росгидромета[4], где были сделаны численные оценки (астрономы давали прогноз без величин в ^{0}С).

[4] Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2008, т. 1, 230 с.: http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/index00.htm

Было показано, что если, например, в 2030-2040 годах будет солнечный минимум, то из-за данного фактора глобальная температура понизится не более чем на 0,25^{0}С, а затем в той же мере увеличится – вернется на прежнюю траекторию роста, обусловленную другими причинами.

Извержения вулканов могут приводить к существенному, но кратковременному снижению температуры приземного слоя воздуха на всей планете. При этом принципиально важна геометрия извержения. Если это направленный вверх факел, когда большое количество окислов серы достигает стратосферы, то образующиеся там аэрозольные частицы задерживаются надолго, отражают солнечное излучение и затеняют Землю. Если этого нет, то даже очень сильные извержения оказывают лишь незначительный эффект. Большой эффект – снижение температуры на 0,2-0,3^{0}С (в редких случаях – 0,5^{0}С), как правило, длится лишь несколько лет, а в остальные годы извержения могут создавать повышенные концентрации аэрозольных частиц в стратосфере, немного охлаждая Землю[5].

Изменения вулканического стратосферного аэрозоля.

Повышение вулканической активности в начале XXI века могло немного замедлить потепление поверхности Земли.

Источник: Данные NOAA Climate.gov на основе баз данных SAGE< GOMOS, CALIPSO. См.: Lindsey Rebecca. Did global warming stop in 1998? September 4, 2018 https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/did-global-warming-stop-1998

Иногда влияние вулканов представляется как «плюс» температуры. Однако их воздействие как источников тепла или парниковых газов очень мало (по выбросам CO_2 роль вулканов не более 1% от антропогенных выбросов)[6]. Дело в том, что все эффекты принято отсчитывать от того или иного базового периода. Поэтому если, например, в базовый период 1880-1910 гг. извержений было больше, чем в 2000-2010 гг., то нынешний эффект вулканов в сравнении с базовым представляется как «плюс»[7].

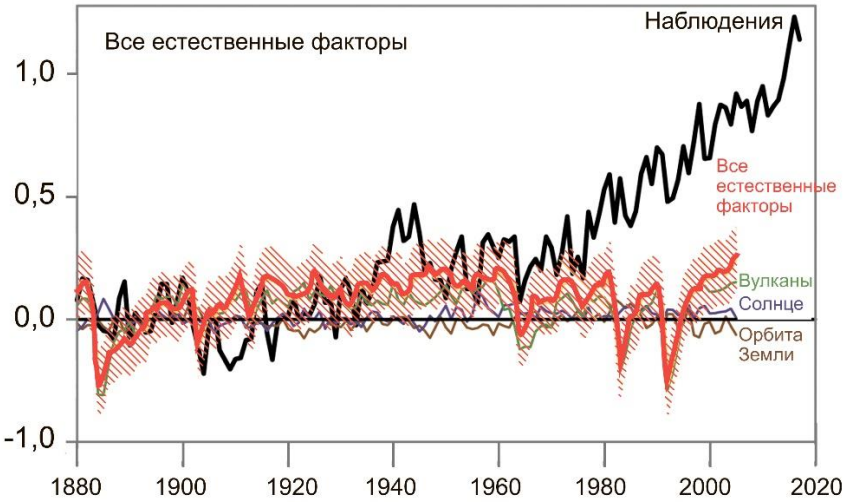
---

[5] IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, www.ipcc.ch

[6] IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, www.ipcc.ch См.: также : USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., doi: 10.7930/J0J964J6. https://science2017.globalchange.gov/ стр. 74, 79 и стр 119.

[7] USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., doi: 10.7930/J0J964J6. Appendix 5, page 12, figure A5.5.

В международных трудах МГЭИК[8] и в национальных научных докладах, в частности России[9] и США,[10] также не были забыты другие внешние естественные факторы: вариации орбитальных параметров Земли, космических лучей, внутреннего тепла Земли, магнитного поля планеты[11] и др. Однако для XX века не было обнаружено никаких значительных воздействий. На представленном ниже сводном графике, кроме Солнца и вулканов, показано очень небольшое влияние орбитальных параметров Земли. Это вызвано тем, что в прошлые десятки и сотни тысяч лет огромное значение имели ледниковые периоды, инициируемые орбитальными вариациями, более того, если не анализировать весь спектр информации, то можно прийти к ложному выводу о значительном влиянии параметров орбиты на климат XX века[12].



Наблюдаемый рост среднегодовой температуры (^{0}C) и действие внешних естественных факторов

Красная кривая – суммарное действие всех естественных внешних факторов, заштрихованная область – диапазон неопределенности.

Источник: USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., doi: 10.7930/J0J964J6. Appendix 5, page 12, figure A5.5. https://science2017.globalchange.gov/

На представленном выше рисунке можно заметить, что внешними естественными факторами нельзя объяснить более низкие температуры воздуха в 1910-е и более высокие в 1940-е годы. Причины этого во внутренней изменчивости климатической системы, которая общий энергетический баланс Земли не меняет, но перераспределяет энергию между атмосферой и океаном, а также между различными частями Мирового океана (вариации течений и т.п.).

Собственная изменчивость климатической системы обусловлена нелинейными взаимодействиями между ее компонентами, имеющими

[8] IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, www.ipcc.ch

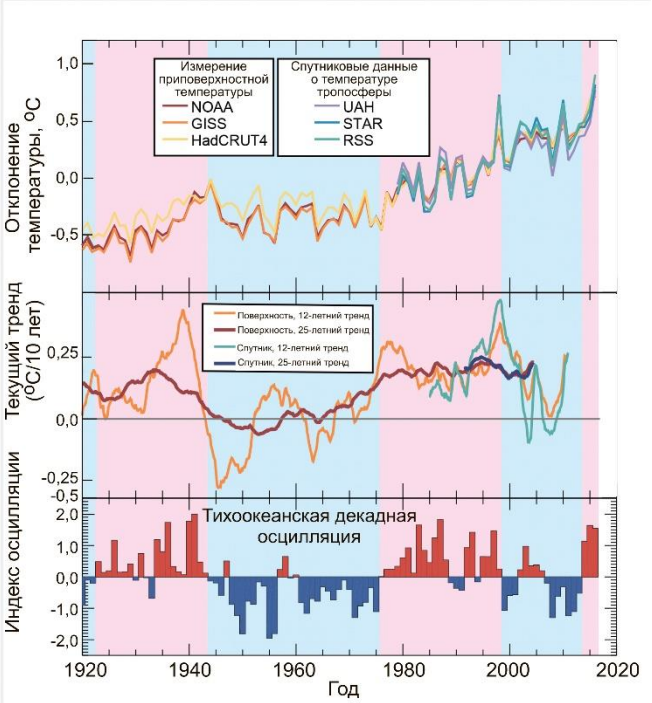
[9] Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2008, т. 1, 230 с., т. 2, 291 с.: Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с.:

[10] USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., doi: 10.7930/J0J964J6.

[11] Магнитное поле зависит от процессов в глубине Земли вне деятельного слоя суши и может считаться внешним по отношению к климатической системе.

[12] Валерий Федоров: Солнечная радиация и климат Земли. Издательство: Физматлит, 2018 г. 232 стр. https://www.labirint.ru/books/626361/

разные времена отклика на внешние воздействия. Она оказывает большое влияние на межгодовую изменчивость климата, а в отдельные периоды на изменчивость в течение нескольких десятилетий, что не раз случалось в прошлом. В данном контексте важнейшая роль принадлежит процессам в океане. Например, на климатическую изменчивость северной части Тихого океана и даже всей планеты немалое влияние оказывает тихоокеанская декадная осцилляция (Pacific Decadal Oscillation, PDO), разные фазы которой длятся от 15 до 30 лет. Меньший рост глобальной температуры приповерхностного слоя воздуха в 1945-1970 и 2000-2010 гг. совпадает с отрицательной фазой PDO, когда из океана в атмосферу поступало меньше тепла[13].



Наблюдаемый рост температуры и фазы Тихоокеанской декадной осцилляции

Температура тропосферы (синие кривые) и температура приземного слоя воздуха (красная и желтые кривые), отклонение от средних значений за 1901-1960 гг.

Осредненные за 12 и 25 лет тренды изменения температур.

Фазы Тихоокеанской декадной осцилляции

Источник: USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, page 43, figure 1.5. https://science2017.globalchange.gov/

Имеется Атлантическое долгопериодное колебание (вариации с периодом 50-70 лет), которое, вероятно, было основной причиной потепления в Северной Европе и Арктике в конце 1930-х годов. Однако на интервале времени от 60 лет и более его вклад уже незначим[14], а нынешнее потепление в Арктике не может объяснено этим эффектом[15]. Другой

[13] USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., стр. 43. рис.1.5 https://science2017.globalchange.gov/

[14] На коротких промежутках (15-30 лет) вклад данного колебания оказался сопоставим по абсолютной величине с вкладом парниковых газов и даже мог его превышать, а на интервалах около 60 лет и более – уже незначим. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Оценка вклада атлантической мельтидекадной осцилляции и изменений атмосферного содержания парниковых газов в тренды приповерхностной температуры по данным наблюдений // *Доклады Академии наук*, 2018, том 480, №1 стр. 97-102. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мельтидекадной осцилляции в тренды приповерхностной температуры // *Метеорология и гидрология*, 2018, №9 стр. 5-13.

[15] Второй оценочный доклад, Росгидромет, 2014, стр. 62-69, 281-281. Semenov, V.A., Latif, M., Dommenget, D., Keenlyside, N.S., Strehz, A., Martin, T., Park, W., 2010: The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. J. Climate 23, 5668-5677.

пример – характерной чертой 2015-2016 годов было сильное Эль-Ниньо (естественное колебание течений на огромной территории южной части Тихого океана) с «выбросом» огромного количества тепла из океана в атмосферу. Оно привело к сильному, но краткосрочному росту температуры воздуха в мире в целом. В 2017 году все вернулось на «круги своя», а Всемирная метеорологическая организация стала отдельно рассматривать этот пик глобальной температуры воздуха как обусловленный Эль-Ниньо[16].

За последние 100 лет произошли немалые изменения наземных экосистем. На региональном и местном уровне были явления, изменяющие количество водяного пара, в том числе вызванные вырубкой лесов и деградацией наземных экосистем, строительством водохранилищ ГЭС и т.п., но по величине потоков пара они несопоставимы с океанскими явлениями. Над океанами образуются гигантские атмосферные «реки» влаги[17], которые гораздо больше «сухопутных» эффектов, а по расходу воды в 10-20 раз больше самой полноводной реки в мире – Амазонки. По мере глобального потепления они могут наблюдаться чаще и усиливаться.

Как бы не были сильны *естественные внешние и внутренние вариации* климатической системы, они не могли привести к такому росту температуры, который наблюдается в последние 40 лет. Это однозначный вывод трудов МГЭИК[18], а также национальных научных докладов, в частности, России[19] и США[20], где детально анализируются круговороты воды и углерода, потоки водяного пара, CO_2, метана и других веществ, оказывающих влияние на климатическую систему Земли. В последние десятилетия не было глобальных природных явлений, существенно увеличивающих концентрацию в атмосфере водяного пара, CO_2 или метана. В последние полвека не было сильных воздействий Солнца, вулканов, вариаций орбиты Земли, способных так изменить температуру океана, атмосферы и криосферы. Однако они были в прошлом, поэтому ниже кратко рассматривается ретроспектива изменений климата Земли за тысячи и миллионы лет, которая одновременно может служить сверхдолгосрочным прогнозом будущего.

---

[16] Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 году. Всемирная метеорологическая организация, 2018, 40 с.
[17] Espinoza, V., Waliser, D. E., Guan, B., Lavers, D. A., & Ralph, F. M. 2018: Global Analysis of Climate Change Projection Effects on Atmospheric Rivers. *Geophysical Research Letters*. Vol. 45. https://doi.org/10.1029/2017GL076968
[18] IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, www.ipcc.ch
[19] Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2008, т. 1, 230 с., т. 2, 291 с.: Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с.:
[20] USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., doi: 10.7930/J0J964J6.

Ретроспектива изменений климата Земли за тысячи и миллионы лет

В геологическом масштабе времени десятков и сотен миллионов лет важнейшей причиной изменения климата являются внутренние тектонические процессы – движение континентов. Когда на полюсах суша, большое белое пятно отражает солнечное излучение и на Земле холодно. Когда на полюсах суши нет – намного теплее. Именно так было в последние сотни миллионов лет, когда на Земле в основном было гораздо теплее, в отдельные периоды даже на 10^0С, жили динозавры и образовывались уголь, нефть и газ. Концентрация CO_2 в атмосфере достигала 1000 частей на миллион, а парниковый эффект был гораздо сильнее, чем сейчас[21].

Примерно 40 миллионов лет назад Антарктида заняла свое нынешнее место, и температура начала снижаться. Около 10 миллионов лет назад покрылась льдом Гренландия и северная полярная область, после чего климат Земли стал близок к типичному для последнего миллиона лет. Конечно, движение континентов идет и сейчас, но очень медленно (несколько сантиметров в год), не влияя на отражение солнечного излучения.

История последнего миллиона лет – чередование ледниковых и межледниковых периодов, вызванное изменениями орбитальных параметров Земли. Ось вращения планеты находится в постоянном движении, ее наклон, положение тропиков и полярных кругов тоже в движении, а эллипс орбиты то ближе, то дальше от круга. Когда положение Земли относительно Солнца дает полюсам минимум тепла, создаются условия для роста ледника. Его белая поверхность отражает солнечное излучение, что еще понижает температуру, а ледник постепенно идет на юг. Когда орбитальные параметры меняются в обратную сторону, начинается обратный процесс.

Керны льда, полученные, в частности, на станции «Восток» в Антарктиде, показывают, что примерно каждые 100 тысяч лет был межледниковый период длительностью 15-30 лет, когда температура была близкой к наблюдавшейся в XX веке. Однако в среднем последний миллион лет был примерно на 2^0С холоднее[22].

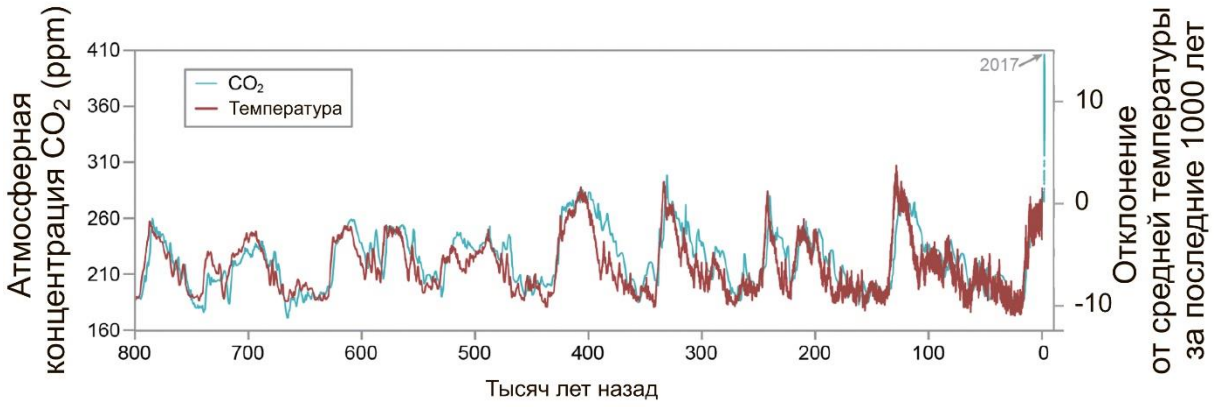
Сейчас Земля тоже находится в межледниковом периоде. Однако никаких оснований для быстрого «свала» в ледниковый период нет. Пока нельзя точно сказать, через сколько тысяч лет начнется сильное похолодание, вызванное изменением орбитальных параметров, но

---

[21] Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 году. Всемирная метеорологическая организация, 2018, 40 с. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4457

[22] IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, page 400, www.ipcc.ch

абсолютно точно, что не в нынешнем тысячелетии[23]. Возможно, что при сохранении более высоких концентраций CO_2 Земля вообще пропустит очередной ледниковый период.[24]



Изменения температуры и концентрации CO_2 в атмосфере за 800 тыс. лет, ^{0}C

Изменение температуры приземного слоя воздуха (красная кривая, отклонение от среднего значения за последнюю 1000 лет) и концентрации CO_2 в атмосфере (голубая кривая, частей на млн, ppm).

Источник: USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, Appendix 5, page 11, figure A5.4. https://science2017.globalchange.gov/

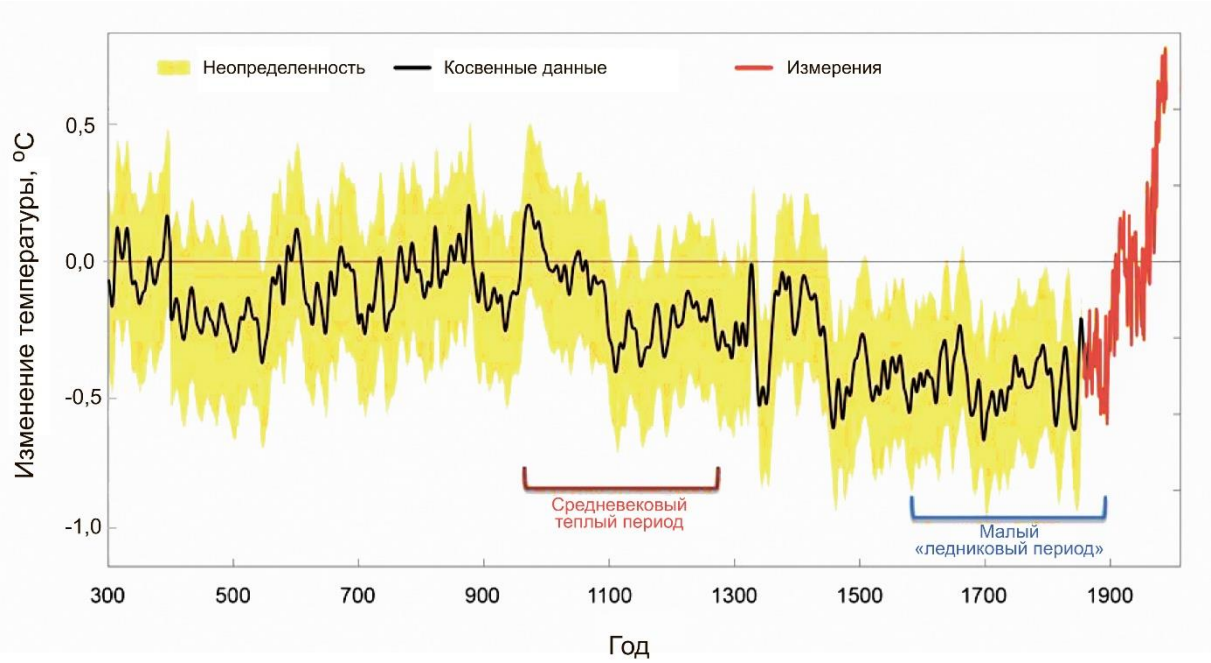
История последних тысяч лет говорит о большом числе региональных и глобальных значительных изменений температуры и осадков, вызванных теми или иными рассмотренными выше естественными причинами. Длительные засухи нередко приводили к драматическим последствиям, даже к гибели местных цивилизаций.

Наиболее известные и крупномасштабные явления прошлых веков: средневековый теплый период (950-1250 гг., когда климат содействовал развитию человечества); последующие резкие климатические колебания, которые, вероятно, стали одной из причин страшных эпидемий чумы; «малый ледниковый период» 1600-1900 гг. Конечно, никаких ледников, аналогичных настоящему ледниковому периоду, тогда не было, но температура была значительно ниже, чем в первом тысячелетии нашей эры или в первой половине XX века.

В Европе во второй половине XVII и первой половине XVIII века температура снизилась примерно в 2 раза сильнее, чем во всем Северном полушарии, что было очень заметно. Однако в те же годы в Азии, в Китае, похолодания не отмечалось или оно было совсем небольшим[25]. Это говорит о том, что, возможно, европейское похолодание было сочетанием

[23] IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, page 400, www.ipcc.ch
[24] USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. https://science2017.globalchange.gov/
[25] IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, page 78 and 409, www.ipcc.ch

солнечного эффекта (Маундеровский солнечный минимум) и изменчивости океанских течений в Северной Атлантике.



Изменения температуры Северного полушария за последние 1700 лет, ^{0}C

Реконструкция изменений температуры приземного слоя воздуха, полученная по кольцам роста деревьев, ледниковым кернам, донным осадкам морей и озер, данным о состоянии магнитного поля и т.п. – черная кривая (отклонение от среднего значения за 1961-1990 гг.), серая полоса – диапазон неопределенности. Данные измерений – красная кривая.

Источник: USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, Chapter 1, page 54. https://science2017.globalchange.gov/

В широкой аудитории нередко обсуждается информация о наступлении или приближении нового «малого ледникового периода». В свете этого было целесообразно оценить, насколько уменьшение потока солнечной радиации, аналогичное минимуму Маундера (примерно на 0,25% по сравнению с современной величиной), может повлиять на изменение температуры в середине XXI века. Модельное исследование дало снижение приземной глобальной температуры воздуха на 0,24 – 0,26^{0}C, что гипотетически может лишь задержать современный рост температуры не более чем на 15 лет.[26] Кроме того, при увеличении потока солнечной радиации до первоначальной величины потепление восстановится и будет таким же, как без солнечного минимума.

Завершая рассмотрение ретроспективы изменений климата, нужно отметить, что почти все наблюдаемые сейчас эффекты когда-то уже были в прошлом. На месте тайги и арктической тундры росли теплолюбивые растения, увеличивалась температура, повышалась концентрация CO_2,

[26] Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014. Общее резюме, стр. 22. http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/

ледники отступали, таяли многолетнемерзлые породы и т. п. Однако совпадение некоторых (далеко не всех) внешних проявлений совершенно не означает одинаковости их причин. Для выяснения причин нужен детальный анализ физики и химии процессов, идущих в атмосфере и океане, увязка их в единую картину, что требует очень сложного математического аппарата. Непрофессиональный взгляд на проблему может приводить к неверным выводам. Поэтому и в международных трудах МГЭИК[27] и в национальных климатических докладах, в частности, России[28] и США[29], имеются специальные разделы, прямо поясняющие роль естественных и антропогенных факторов в современном изменении климата. В докладах детально рассматривается, как в XX веке на естественную климатическую изменчивость стало накладываться усиливающееся антропогенное воздействие.

Антропогенные изменения климата и их сочетание с естественной изменчивостью

К *антропогенным* воздействиям относятся изменения газового и аэрозольного состава атмосферы в результате хозяйственной деятельности человека (сжигание угля, газа и нефтепродуктов, производство цемента, металлургия, животноводство и др.), а также изменения характера землепользования (вырубка лесов, осушение болот, рост городов и т.п.).

Изучение этих воздействий имеет богатую историю. Теория парникового эффекта была сформулирована почти 200 лет назад, а в конце XIX века были получены первые численные оценки парникового эффекта (наличие в атмосфере Земли водяного пара, CO_2, метана и некоторых других газов увеличивает среднюю глобальную температуру приземного слоя воздуха с -19^{0}C до +14^{0}C).[30]

В середине 1970-х годов ученые получили первые оценки будущих климатических изменений. Модели были примитивны, но уже давали прогнозы глобального потепления в ближайшие десятилетия, сейчас

---

[27] IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, page 78 and 409, www.ipcc.ch

[28] Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2008, т. 1, 230 с.: http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/index00.htm Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с.: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/

[29] USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. https://science2017.globalchange.gov/

[30] Главная роль принадлежит водяному пару, примерно треть эффекта, 12^{0}C, обусловлена CO_2 (при изменении его концентрации от 0 до 280 частей на млн). Парниковый эффект – сложное спектральное и нелинейное явление, в частности, рост концентрации CO_2 на треть – с 280 до 400 частей на млн – приводит к увеличению темпратуры на 0,8^{0}C. См. работы Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН: *Семенов С. М., И. О. Попов* радиационно-равновесный профиль температуры в атмосфере Земли. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, том. XXIII, Москва, ИГКЭ, 2010 г. стр. 67-91.

оправдавшиеся[31]. Также были получены оценки, базирующиеся на данных о прошлых состояниях климатической системы. Советские ученые, прежде всего, академик М. И. Будыко, внесли выдающийся вклад в эти исследования. В 1979 г. известный ученый, полярник и руководитель Гидрометслужбы Е. К. Федоров прямо предупреждал мировое сообщество о грядущих антропогенных изменениях климата.[32]

За последние десятилетия наука значительно продвинулась вперед[33]:

- получены детальные и длительные ряды наблюдений за температурой воздуха по всему земному шару, не только на суше, но и в океане, почти вся планета покрыта репрезентативными данными, см. рисунок на стр. 2;
- получены детальные данные о вертикальном профиле температуры; выяснилось, что приповерхностный слой атмосферы и вся нижняя атмосфера (тропосфера) прогревается, а верхняя атмосфера (стратосфера) охлаждается, что было бы невозможно, если бы причиной изменений было Солнце;
- были получены данные о теплосодержании всех океанов, однозначно говорящие о глобальном потеплении, см. рисунки на стр. 1 и 3;
- получены данные о значительном повышении кислотности верхнего слоя океанских вод из-за растворения в них CO_2;
- получены данные о росте уровня Мирового океана, вызванном таянием льдов и тепловым расширением воды;
- очень наглядно пошло сокращение льдов Северной полярной области;
- гораздо лучше стали знания естественных факторов изменения климата;
- гораздо лучше стали знания причин и масштабов изменения климата в прошлых столетиях, тысячелетиях и миллионах лет.

Все это произошло на фоне резкого роста концентрации CO_2 в атмосфере (на 43% за последние 100 лет, до уровня более 400 частей на

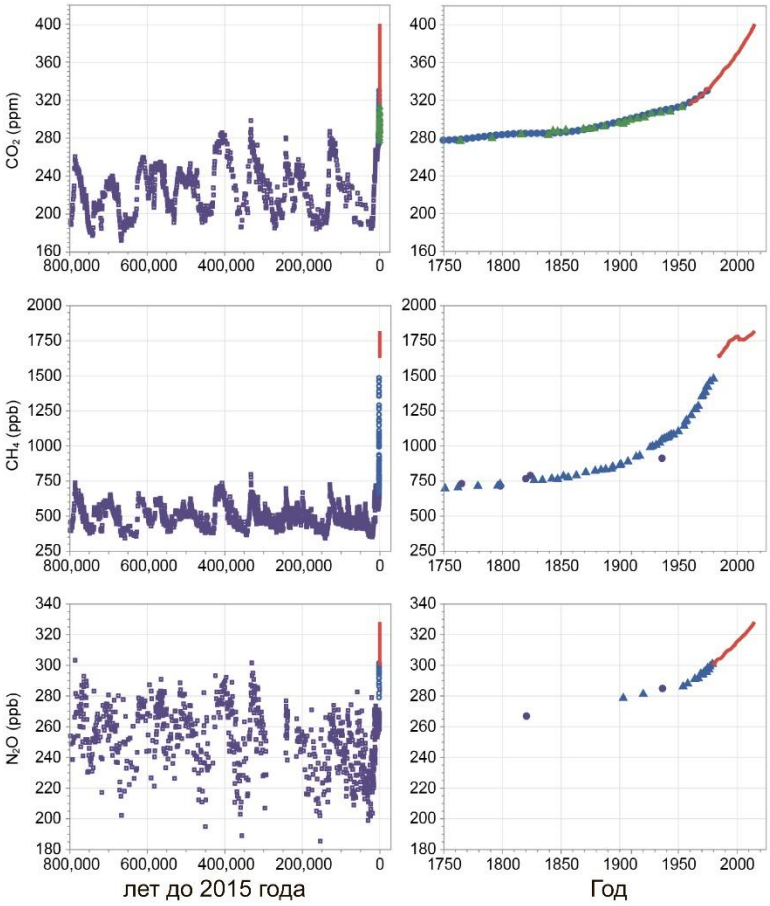
---

[31] Будыко М. И., 1972. Влияние человека на климат. Л.: Гидрометеоиздат, 47 с. Антропогенные изменения климата, Будыко М. И., Израэль Ю. А. (ред.), 1987, Л.: Гидрометеоиздат, 406 с. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В.М., Семенов С.М., ред.), Росгидромет, 2014, стр. 236-245: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/

[32] В ходе Первой всемирной конференции по климату, организованной Всемирной метеорологической организацией в 1979 г. в Женеве, Е. К. Федоров, выступивший с вводным докладом на этой конференции, в частности отметил: «*Изменения климата в будущем неизбежны. Они станут заметными и, может быть, необратимыми в ближайшие несколько десятилетий... В связи с этим очевидно, что необходимо было бы выработать некоторую стратегию, т. е. систему заранее спланированных действий, которые обеспечили бы для человечества избежание негативных последствий возможных изменений климата...*». В трудах М. И. Будыко рассматривался экспоненциальный рост индустриализации, который, по его расчетам, приводил к сильному глобальному потеплению. Поэтому в речи Е. К. Федорова имелось в виду не только увеличение концентрации CO_2, но и будущее воздействие на климат мировой энергетики. Будыко М. И., 1972. Влияние человека на климат. Л.: Гидрометеоиздат, 47 с.

[33] IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с. USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA.

миллион), роста концентрации метана в 2,5 раза (его вклад в глобальное потепление растет) и роста концентрации N_2O на 20%.[34]



Изменение концентраций парниковых газов за последние 800 тыс. лет и в 1750-2016 гг.

CO_2 (частей на миллион)

Синие и зеленые точки – измерения в кернах льда
Красные кривые – прямые измерения в атмосфере

Метан (частей на миллиард)

Оксид азота (1), частей на миллиард

Источник: USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., doi: 10.7930/J0J964J6. Page 80. Figure 2.4 https://science2017.globalchange.gov/

При этом были получены неопровержимые доказательства того, что основная часть этого CO_2 поступила от сжигания ископаемого топлива.[35] Это важно, так как потоки CO_2 между атмосферой и подстилающей поверхностью (сушей и океаном) в сумме примерно в 10 раз больше антропогенных выбросов, а известны эти потоки с неопределенностью порядка 30%.[36] Поэтому раньше иногда предполагали, что рост CO_2 может быть вызван естественным разбалансом газообмена, например, вызванным какими-либо сдвигами в экосистемах суши, но сейчас сомнений в ведущей роли сжигания ископаемого топлива нет. В последние десятилетия

[34] Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 году. Всемирная метеорологическая организация, 2018, 40 с. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4457

[35] Изотопный, а также корреляционный анализ доказывают происхождение «лишнего» CO_2 преимущественно от сжигания ископаемого топлива. В атмосфере снижается содержание изотопа C^{13}, поступающего из естественных источников, в угле, нефти и газе его концентрация намного меньше. Fahey, D.W., S. Doherty, K.A. Hibbard, A. Romanou, and P.C. Taylor, 2017: Physical drivers of climate change. *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 73-113. http://dx.doi.org/10.7930/J0513WCR

[36] IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

парниковый эффект был детально изучен, что развеяло все сомнения в главной роли CO_2 в его усилении в последние полвека.[37]

В 2017 году выбросы мировой экономики составили 37 млрд т CO_2, из них 32,6 млрд т пришлось на сжигание ископаемого топлива, а около 4 млрд т дало производство цемента и другие промышленные процессы, связанные с эмиссией CO_2 в атмосферу. По видам топлива на первом месте уголь – 14,5 млрд т, затем нефтепродукты – 11,3 и газ – 6,8 млрд т CO_2.[38] Использование газа вместо угля дает большое снижение выбросов CO_2, даже без учета эффективности энергоблоков, сам процесс горения метана, а не угля снижает выбросы на 36%. Рубки лесов тоже приводят к поступлению CO_2 в атмосферу, но гораздо меньшему, чем от сжигания ископаемого топлива. В 2017 году изменения в землепользовании в мире в целом привели к эмиссии 4 млрд т CO_2. Кроме CO_2 еще около 9 млрд т CO_2-эквивалента составили эмиссии метана[39] (животноводство, рисовые поля, утечки газа при операциях с нефтью и газом), а 4 млрд т CO_2-экв. – эмиссии N_2O и других парниковых газов (применение азотных удобрений, утечки хладагентов, выплавка алюминия и др.). Суммарная антропогенная эмиссия всех парниковых газов – 54 млрд т CO_2-экв.[40]

Сейчас активно исследуются потоки CO_2 и метана из тундры (многолетнемерзлых пород), а также от метангидратов, находящихся на мелководном шельфе арктических морей. По мере развития глобального потепления они будут нарастать[41], однако пока эти источники CO_2 и метана не существенны для усиления парникового эффекта по сравнению с вкладом выбросов мировой энергетики и промышленности, поэтому они не учитываются при оценке усилий мирового сообщества по противодействию изменениям климата в XXI веке.[42]

---

[37] Известны полосы поглощения инфракрасного излучения Земли водяным паром, CO_2, метаном др., где и насколько сильно «работают» добавочные молекулы CO_2 и других газов, а полосы поглощения водяного пара почти полностью заполнены. У водяного пара рост концентрации ограничен сверху (относительная влажность не может быть более 1, а у других газов такого ограничения нет. Семенов С. М., И. О. Попов радиационно-равновесный профиль температуры в атмосфере Земли. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, том. XXIII, Москва, ИГКЭ, 2010 г. стр. 67-91.

[38] Имеется в виду снижение в пересчете на 1 тонну условного топлива. Данные по видам топлива см.: International Energy Agency World Energy Outlook 2018, www.iea.org

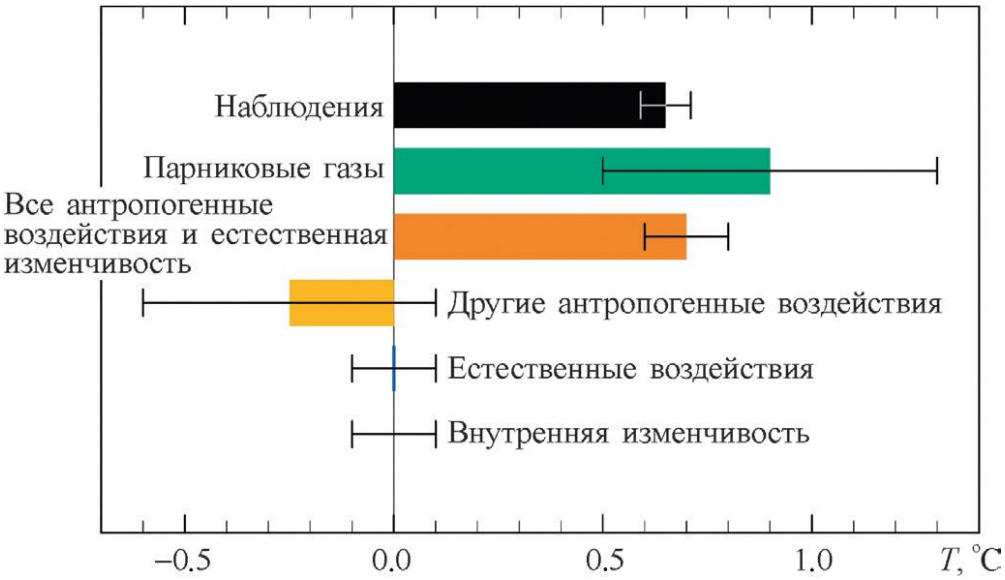
[39] Все парниковые газы имеют пересчетные коэффициенты, показывающие насколько 1 тонна газа по результирующему парниковому эффекты сильнее 1 тонны CO_2 за тот или иной период времени, обычно берется 100 лет. См.: IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, page 78 and 409, www.ipcc.ch

[40] Последние оценки, включающие 2017 год и все парниковые газы. UNEP (2018). The Emissions Gap Report 2018. United Nations Environment Programme, Nairobi. www.unep.org по данным базы EDGAR v5.0/v4.3.2. Иногда оценки того или иного источника включают всю цепочку продукции. В частности, тогда эмиссия метана от крупного рогатого скота, дающая 5-8%, объединяется с затратами топлива и энергии на переработку, транспортировку и продажу мясомолочной продукции, что в сумме дает в 2-3 раза больший эффект.

[41] USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. https://science2017.globalchange.gov/

[42] UNEP (2018). The Emissions Gap Report 2018. United Nations Environment Programme, Nairobi. www.unep.org

Есть и другие антропогенные воздействия, но меньшие, чем усиление парникового эффекта. Прежде всего, аэрозоли – поступление пыли от городов, промышленных объектов, с полей и других вырубленных участков, ранее бывших лесом, приводит к затенению Земли от Солнца и к понижению температуры. Существенно увеличение отражающей способности поверхности (альбедо) при вырубке лесов и других изменениях в землепользовании. Немаловажно образование озона в приземном слое атмосферы в результате загрязнения воздуха. Также отмечается поступление в атмосферу «черного углерода» – сажевых частиц, прежде всего, от лесных пожаров, сжигания биомассы и неполного сгорания топлива (эти частицы не отражают, а поглощают солнечное излучение, прогревая воздух или поверхность, на которой находятся, особенно покрытую снегом).[43]



Вклад различных факторов в рост температуры приповерхностного слоя воздуха в 1951-2010 гг.

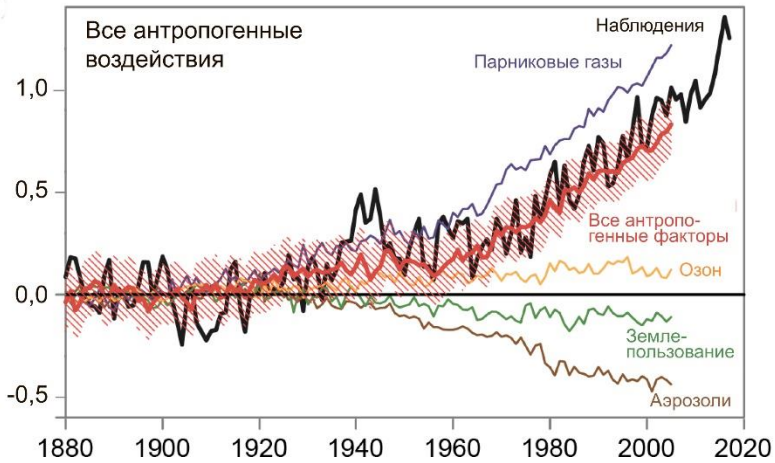
Вероятностные границы (горизонтальные интервалы) и средние значения (цветные прямоугольники) оценок установленного вклада разных факторов в линейный тренд наблюдавшегося потепления в 1951-2010 гг. Величина тренда по данным архива HadCRUT4 показана черным цветом вместе с 5-95%-ным доверительным интервалом, учитывающим неопределенности в этом архиве.

Источник: Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В.М., Семенов С.М., ред.), Росгидромет, 2014. Общее резюме, стр. 21, по данным IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis.

Весь комплекс эффектов нынешнего изменения климата невозможно объяснить естественными вариациями, ни внутренними, ни внешними. В то

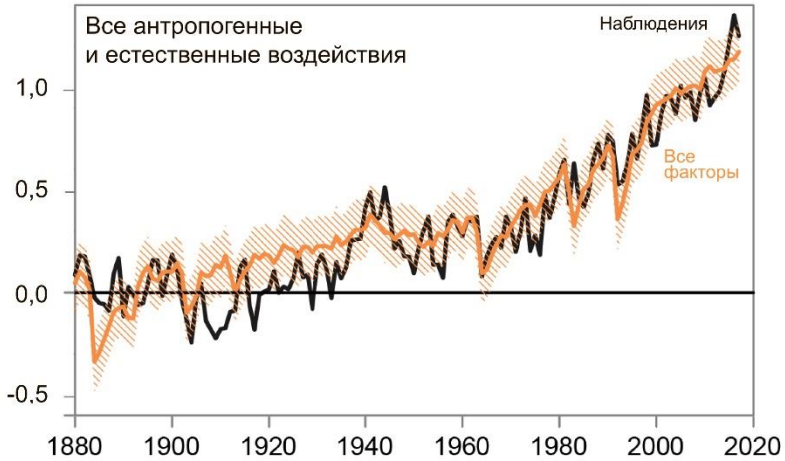
[43] Глобально эффект от выпадения сажевых частиц на снег очень невелик, даже по максимальной оценке он в 40 раз меньше усиления парникового эффекта, оцениваемого как 0,9^{0}C (по росту температуры в 1951-2010 гг.). USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. Стр. 78

же время, изменения температуры, полученные в расчетах с ансамблем современных климатических моделей (CMIP5) *с учетом антропогенных и естественных внешних воздействий*, достаточно хорошо, в том числе и пространственно, согласуются с данными наблюдений, если при сравнении учитывается естественная изменчивость климатической системы Земли.[44] Это результат получения гораздо больших данных, чем ранее, лучшего понимания физических процессов в атмосфере и океане и, что также очень важно, развитию математического аппарата их описания – математического моделирования.



Наблюдаемый рост среднегодовой температуры (^{0}C) и рассчитанное по моделям действие антропогенных факторов

Синяя кривая – эмиссии парниковых газов, в т. ч. от сведения лесов, желтая кривая – образование озона в загрязненном приземном слое воздуха, зеленая кривая – увеличение отражающей способности поверхности при изменениях в землепользовании (вырубке лесов) красная кривая – суммарное действие всех факторов, заштрихованная область – диапазон неопределенности.



Наблюдаемый рост среднегодовой температуры (^{0}C) и рассчитанное по моделям действие всех факторов

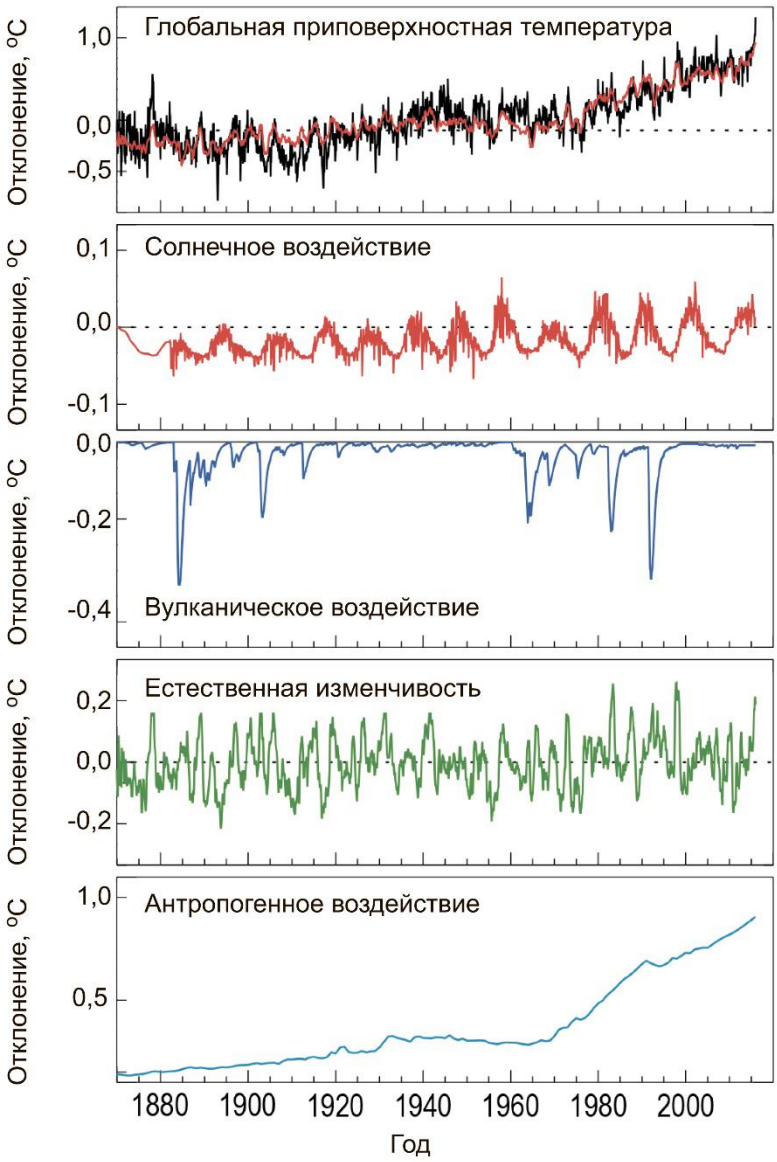
Желтая кривая – действие всех факторов, антропогенных и естественных, заштрихованная область – диапазон неопределенности.

Источник: USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA Appendix 5, page 12, figure A5.5. https://science2017.globalchange.gov/

Во Втором оценочном докладе Росгидромета подчеркивается, что для территории России основной вклад в наблюдаемое повышение температуры во второй половине XX в. – начале XXI в. вносит влияние изменений глобальной концентрации парниковых газов. Однако и естественные внешние воздействия значимо проявляются в межгодовых колебаниях температуры. Эти воздействия особенно хорошо различимы летом, когда

[44] Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В.М., Семенов С.М., ред.), Росгидромет, 2014: Общее резюме, стр. 19

влияние аэрозолей на поток приходящей на поверхность солнечной радиации достигает годового максимума, а собственная (не связанная с внешними воздействиями) межгодовая изменчивость температуры сравнительно мала[45].



Наблюдаемое изменение температуры (^{0}C) и его сопоставление с действием различных факторов

Наблюдаемая приповерхностная температура воздуха на земном шаре, ^{0}F Средний тренд (отклонения от средней за 1901-1960 гг.) и межгодовые вариации, **рост на 0,8-0,9^{0}C за последние 50 лет**

Внешние естественные факторы

Воздействие Солнца – вариации в пределах ±0,1^{0}C

Воздействие вулканов – отдельные пики похолодания до -0,3^{0}C (в редких случаях до -0,5^{0}C)

Внутренняя естественная изменчивость – вариации в пределах ±0,2^{0}C (в т.ч. Эль-Ниньо)

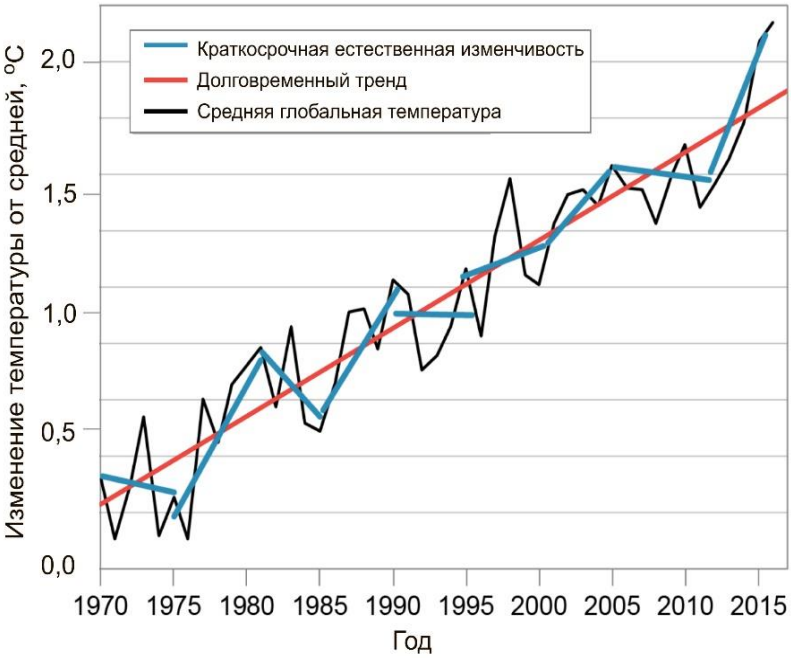
Антропогенное воздействие (от 1870 г., усиление парникового эффекта и воздействие аэрозолей), **рост на 0,6-0,7^{0}C за последние 50 лет**

Источник: USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, page 119, figure 3.3. https://science2017.globalchange.gov/

Вопрос о соотношении антропогенных и естественных факторов изменения климата сильно зависит от временного промежутка и пространственного масштаба рассмотрения. Внутренняя естественная изменчивость климата в отдельных регионах может быть в несколько раз сильнее, чем в мире в целом. Наглядным примером этого было сильное Эль Ниньо 2015-2016 гг., когда локальные среднегодовые температуры могли меняться в 10 раз сильнее, чем глобальная температура. Если брать

[45] Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В.М., Семенов С.М., ред.), Росгидромет, 2014: Общее резюме, стр. 19

короткие промежутки времени, например, 5-летние периоды, то под воздействием естественных факторов температура приповерхностного слоя воздуха в мире в целом будет резко меняться в виде нерегулярного чередования похолоданий и потеплений, которое за более длительный период времени будет отвечать долгосрочному тренду глобального потепления.



Наблюдаемый рост среднегодовой температуры (^{0}C) как сочетание краткосрочных и долгосрочных трендов

Черная кривая – данные измерений, отклонения от среднего значения в 1901-1960 гг.

Синяя линия – краткосрочные тренды, обусловленные естественной изменчивостью, наложенной на долгосрочное антропогенное воздействие.

Красная линия – линейный тренд за 45 лет.

Источник: USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA Appendix 5, page 32, figure A5.18. https://science2017.globalchange.gov/

Оценки изменений климата в XXI веке

В XXI веке определенно ожидается продолжение текущих тенденций изменения климата. Влияние человека будет нарастать, в то же время воздействие естественных факторов в целом будет таким же или несколько большим из-за их усиления антропогенными эффектами:[46]

- влияние 11-летних циклов Солнца будет в пределах ±0,1^{0}C. Моделирование теоретически возможного нового Маундеровского минимума показывает, что снижение температуры приземного слоя воздуха в мире в целом составит около 0,25^{0}C, это явление сможет затормозить глобальное потепление, но не более чем на 15 лет, после чего будет возврат в прежний тренд (см. выше, где дается описание естественных изменений климата);

[46] IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с. USGCRP, 2017*: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA.

- извержения вулканов на несколько лет смогут снижать температуру, но не более чем на 0,3^{0}С (в редких случаях до 0,5^{0}С), после чего их влияние будет очень небольшим (см. выше, где дается описание естественных изменений климата). Прогнозов значительного роста вулканической активности в XXI веке, которые бы вносили коррективы в сценарии изменений климата, нет. Опасения извержения «супервулкана» пока находятся на уровне гипотез;
- изменение орбитальных параметров будет вносить очень небольшой вклад в естественную изменчивость климата (см. выше, где дается описание естественных изменений климата);
- естественная внутренняя изменчивость климата, как правило, будет в прежних пределах изменения среднегодовой температуры приповерхностного слоя воздуха в мире в целом на ±0,2^{0}С (см. выше, где дается описание естественных изменений климата). Вероятны различные изменения океанских процессов, которые в те или иные десятилетия могут оказать очень существенное влияние на региональный климат. Однако их влияние на всю климатическую систему сможет приводить лишь к небольшим замедлениям глобального потепления (см. выше, где дается описание естественных изменений климата). Высока вероятность того, что в течение XXI в. Атлантическая меридиональная циркуляция (включая Северо-Атлантическое течение) будет ослабевать, однако ее резкие изменения или остановка крайне маловероятны. Возможен рост частоты сильных Эль Ниньо, вызванный глобальным потеплением, что будет уже не чисто естественным эффектом, который существенно, но не кардинально увеличит изменчивость климата;
- итоговый рост приповерхностной температуры воздуха в мире в целом на конец XXI века зависит преимущественно от влияния человека. Это примерно 2^{0}С за XXI век, что гораздо больше даже гипотетического суммарного действия всех естественных причин.

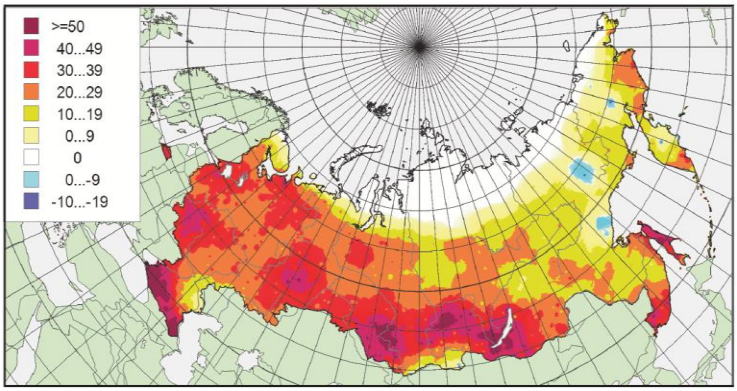
Ситуация во второй половине и в конце XXI века сильно зависит от динамики глобальных антропогенных выбросов парниковых газов (вариантов, используемых в моделях и называемых RCP). До середины века различия не существенны, но затем быстро нарастают. Ученые моделируют разные ситуации вплоть до глобального потепления к концу XXI века примерно на 5^{0}С от уровня второй половины XIX века (RCP8.5).

Рост приповерхностной температуры воздуха на 2^{0}С за XXI век ориентировочно соответствует траектории глобальных выбросов, когда они находятся на стабильном уровне до 2040 года, а затем к 2100 году снижаются примерно на 80% (траектория, лежащая между проекциями RCP4.5 и RCP6.0). Тогда к 2100 году общий рост температуры от уровня

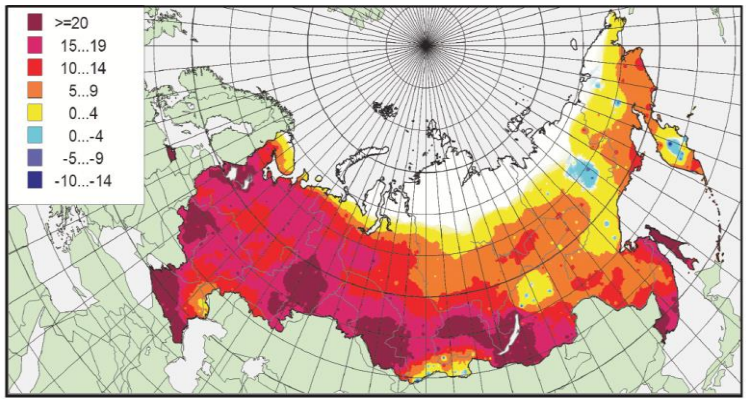
второй половины XIX века будет около 3^0C (на 1^0C потепление уже произошло)[47]. Нынешние национальные цели стран по выбросам парниковых газов на период до 2030 года, будучи объединены, демонстрируют именно такую динамику[48].

Это развитие событий гораздо лучше худших прогнозов (RCP8.5), но не соответствует долгосрочным целям Парижского соглашения Рамочной конвенции ООН об изменении климата, призывающего ограничить глобальное потепление на уровне существенно ниже 2^0C от доиндустриального уровня (RCP2.6) и стремиться не превысить уровень $1{,}5^0$C. Однако, учитывая, что соглашение лишь закладывает принципы международного сотрудничества, но не предъявляет конкретных требований по выбросам к конкретным странам, на практике цели соглашения могут быть выполнены не полностью.

Для России зависимость от глобальных антропогенных выбросов парниковых газов (проекций RCP) можно проиллюстрировать на примере перспективной оценки изменения среднего числа пожароопасных суток. В случае сценария RCP8.5, к концу века на больших лесных территориях страны рост составит 20-30 и даже 30-40 дней. В случае более благоприятного сценария RCP4.5 – 10-15 и 15-20 дней, соответственно.



а)



б)

Перспективная оценка изменения среднего числа пожароопасных суток

(а) - в условиях сценария RCP8.5

Число пожароопасных дней (с индексом Нестерова $G > 1000$) в мае–сентябре в 2080-2099 гг. по сравнению с 1981-2000 гг.

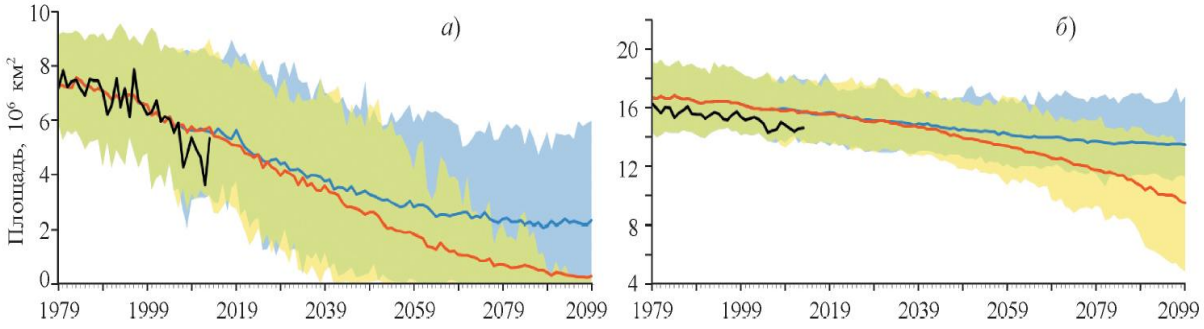
(б) - в условиях сценария RCP4.5.

Источник: Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, Глава 6. Рис. 6.8.10 и 6.8.11.

[47] Global Carbon Budget http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/17/infographics.htm; IPCC AR5, 2013: AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. www.ipcc.ch

[48] UNEP (2018). The Emissions Gap Report 2018. United Nations Environment Programme, Nairobi. www.unep.org

Другим интересным для России примером может быть динамика морского льда в Арктике. Несмотря на неопределенности расчетов, в одном случае можно говорить о полностью свободной в конце лета от льда Арктике (RCP8.5), а в другом случае это очень маловероятно (RCP4.5).



Эволюция площади морского льда в 1979-2099 гг. в Арктике

Площадь морского льда в Арктике в сентябре (*а*) и феврале (*б*) по данным 30 моделей CMIP5 для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 (голубая и красная сплошные линии, соответственно); межмодельный разброс в пределах 10-й и 90-й процентилей (голубая и желтая штриховка, соответственно). Для периода 1979-2005 гг. в каждом ансамбле сценарному расчету предшествует ретроспективный расчет. Для периода 1979-2013 гг. приводится площадь льда по данным наблюдений NSIDC (National Snow and Ice Data Center: Национальный центр данных о снеге и льде, США) (черная кривая).

Источник: Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с. Общее резюме, рис. ОР3.8.

Важно отметить, что изменение средней глобальной температуры приповерхностного слоя воздуха – лишь некий индикатор состояния климатической системы Земли. Ущерб от последствий изменения климата для большей части планеты и для России в частности зависит от роста числа и силы опасных метеорологических явлений[49]. К ним относятся сильная жара и сильный мороз, сильные ветры, метели, смерчи, гололедные явления и другие – все, кроме извержений вулканов, землетрясений и цунами, имеющих совершенно иное, не климатическое, происхождение.

В России число опасных метеорологических явлений за последние 15-20 лет увеличилось примерно в 2 раза[50]. В целом понятно, что налицо сочетание, а в ряде случаев, возможно, и взаимное усиление естественных и антропогенных эффектов.

В последнем заявлении Всемирной метеорологической организации используется термин «доля присваиваемого риска» – вероятность того, что конкретное явление стало результатом антропогенного воздействия на

[49] Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. – Климатический центр Росгидромета. Санкт-Петербург. 2017. – 106 с. http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/riski.pdf

[50] Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 год. – Москва: Росгидромет, – 2018. 69 стр. http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru

климат, а не естественной изменчивости. Наибольшая доля характерна для роста экстремально высоких температур и уменьшения низких температур. Это особенно верно применительно к явлениям, которые рассматриваются в больших пространственных масштабах и за продолжительные периоды времени, такие как сезон или год. Было обнаружено, что побившие рекорды глобальные средние температурные значения в 2016 году были бы практически невозможны в отсутствие деятельности человека[51].

Подробно прогностические оценки развития событий на территории России в XXI веке (как изменений климата как таковых, так и их последствий для человека, природы и экономики нашей страны) изложены во Втором оценочном докладе Росгидромета (2014 г.)[52]. Их детальный анализ, выполненный с учетом новых данных, полученных за последние 3 года, сделан в специально подготовленном Докладе о климатических рисках на территории Российской Федерации (2017) г.[53]

Заключение

Во Втором оценочном докладе Росгидромета делается следующий итоговый вывод: согласованность наблюдаемых и расчетных изменений во всей климатической системе, включая глобальные и региональные значения температуры, температуру тропосферы и стратосферы, глобальный влагооборот, глобальный баланс энергии, изменения в криосфере и Мировом океане, указывает на то, что *наблюдаемые изменения климата вызваны в первую очередь увеличением концентраций атмосферных парниковых газов вследствие хозяйственной деятельности человека*. При этом амплитуда и пространственная структура наблюдаемого потепления в разных компонентах хорошо согласуются с ожидаемым по модельным расчетам откликом климатической системы на антропогенные и естественные внешние воздействия[54].

Для нашей страны там же говорится: основной вклад в наблюдаемое повышение температуры на территории России начиная со второй половины XX в. вносят изменения концентрации парниковых газов. Однако и естественные внешние воздействия значимо проявляются в межгодовых колебаниях температуры. Для значительной части территории России выявлено антропогенное влияние в изменениях сезонных и суточных

[51] Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 году. Всемирная метеорологическая организация, 2018, 40 с. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4457

[52] Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с.

[53] Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. - Климатический центр Росгидромета. Санкт-Петербург. 2017. – 106 с. http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/riski.pdf

[54] Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с. Общее резюме, стр. 19. http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_ob.pdf

экстремальных значений температуры, которые в целом согласуются с наблюдаемым глобальным потеплением. Анализ экстремальных явлений погоды, в частности, жаркого лета на ЕЧР в 2010 г., показал, что, хотя подобные экстремальные условия в основном генерируются собственной изменчивостью климатической системы, общее потепление, вызванное антропогенным воздействием, значительно увеличивает вероятность их возникновения. Изменение климата не сводится лишь к повышению средней температуры воздуха у поверхности Земли, но проявляется во всех компонентах климатической системы, в том числе в изменениях гидрологического режима, ледяного покрова российских морей, экстремальности климата.[55]

Для XXI века в целом ожидается аналогичная картина сочетания естественной изменчивости климата и растущего антропогенного воздействия. Согласно оценкам, полученным с помощью современных климатических моделей, в течение всего XXI в. Россия останется регионом мира, где потепление климата существенно превышает среднее глобальное потепление. Ожидаются значительные изменения других климатических характеристик, причем в разных регионах России эти изменения могут существенно различаться.[56]

В СМИ «традиционно» говорится о разногласиях между учеными, что является искажением информации. Либо ученые и СМИ говорят о разных вещах, одни о прошлом, а другие переносят выводы на сегодняшний день. Например, гляциологи описывают то, как естественные процессы в прошлом приводили к отступлению и таянию ледников, а СМИ подают эту информацию как объяснение *нынешнего* глобального потепления естественными причинами. Либо СМИ не делают различий между учеными разных специальностей. Мнения экономистов или политологов о причинах изменениях климата журналисты иногда выдают за другую точку зрения на идущие в атмосфере и океане процессы.

За последние полвека климатология из описательного предмета превратилась в развитую физико-математическую дисциплину – физику атмосферы и океана, где есть масса нелинейных зависимостей, обратных связей, нюансов и особенностей, требующих сложного математического модельного аппарата, способного соединить все процессы воедино.

В этом случае непрофессиональное – умозрительное – рассмотрение проблемы часто приводит к ошибкам. Этим «грешат» немало ученых, не

---

[55] Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с. Общее резюме, Заключение стр. 56. http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_ob.pdf

[56] Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, Росгидромет, 2014, 1009 с. Общее резюме, Заключение стр. 56. http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_ob.pdf

являющихся специалистами по физике атмосферы и океана: экономистов, инженеров, даже географов и геологов. Они нередко смотрят на проблему со «своей колокольни»: геологи – в геологическом масштабе времени, где антропогенный вклад не существенен, экономисты – с точки зрения выгоды для бизнеса и экономики, политологи – как фактор соперничества стран. Это не удивительно, ведь каждое научное открытие один бизнес стремится «открыть побольше» как что-то выгодное, а другой бизнес – «закрыть» его как что-то невыгодное. Все это не имеет отношения к физической сути явлений, где теперь на естественную изменчивость климата стало накладываться и даже доминировать антропогенное воздействие.

Можно совершенно определенно сказать, что:

- глобальное потепление есть, проявляется во всех компонентах климатической системы Земли и усиливается;
- изменение климата в последние полвека не может быть объяснено только естественными причинами;
- оно успешно объясняется учетом антропогенных воздействий на фоне действия естественных факторов. Главный антропогенный эффект – усиление парникового эффекта выбросами в атмосферу CO_2, поступающими от сжигания угля, газа и нефтепродуктов;
- в XXI веке антропогенное воздействие продолжится и усилится. Действие естественных факторов будет в целом определять изменчивость климата в отдельные годы и десятилетия с малым вкладом в температурные тренды для периодов около полувека и более.

Настоящий обзор подготовлен по инициативе Деловой России при участии руководителей и специалистов ведущих российских научных институтов, имеющих многолетний опыт работы по проблеме изменения климата: ГГО – В. М. Катцова, А. А. Киселева и П. В. Спорышева; ИГКЭ – С.М. Семенова и А.А. Романовской; ИФА РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова – И.И. Мохова. Общая редакция материала осуществлялась директором программы «Климат и энергетика» Всемирного фонда природы А.О. Кокориным.

Деловая Россия выражает глубокую благодарность указанным экспертам за подготовку настоящего обзора.