

Кен Кальдейра

Великий климатический эксперимент

Каково будущее нашей планеты?



В деловых кругах, правительстве, технических службах прогнозы обычно составляются на пять-десять лет, самое большое — на 50. Климатологи в своих дискуссиях говорят о конце столетия. В действительности, двуокись углерода, выброшенная сегодня в атмосферу, будет неблагоприятно сказываться на жизни Земли сотни тысяч лет.

Как парниковые газы изменят далекое будущее? Никто с определенностью не может сказать, как ответит Земля, но климатологи, используя математические модели, построенные на базе знаний о климатических системах прошлого, а также сложных процессах, влияющих на климат, и основываясь на физических и химических законах, могут предсказать, как будет выглядеть наша планета.

Уже сегодня мы стали свидетелями того, как будущее, очерченное на многих из данных моделей, приобретает реальные очертания. По прогнозам, потепление идет более ощутимо над сушей, чем над поверхностью океанов, больше вблизи полюсов, чем у экватора, сильнее зимой, чем летом, и ночью, чем днем. Долгие проливные дожди стали более распространенным явлением. В Арктике сократился снежно-ледниковый покров, а постоянно

мерзлые грунты с высоким содержанием метана начали таять. Погода становится все более непредсказуемой, ураганной, приносящей дополнительное тепло.

Где пределы изменений, которые мы вызываем? Лучшим историческим примером может служить климат мелового периода, установившийся 100 млн лет назад, когда влажный горячий воздух окутывал динозавров, похожие на крокодилов существа плавали в водах Арктики, пышная растительность расцветала в насыщенном углекислым газом воздухе. Формирующийся ныне парниковый эффект даст последствия, которые будут длиться сотни тысяч лет или более. Но прежде всего он глубоко отразится на большей части всего живого на планете, особенно на нас.

Пустыня в Италии

В климатических прогнозах больше всего вопросов вызывает количество CO_2 , которое в итоге попадет в атмосферу. В этой статье я исхожу из того, что в промышленном развитии будет продолжена практика последних 200 лет, а именно нарастание скорости сжигания ископаемого топлива до тех пор, пока мы больше не сможем добывать его из земных недр.



Ближайшее будущее.

Техногенная цивилизация такова, что с каждым годом будет выбрасываться все больше парниковых газов, и к концу столетия это приведет к повышению температуры воздуха, подкислению океанических вод и аномальным проявлениям погоды

ОБ АВТОРЕ

Кен Кальдейра (Ken Caldeira) — климатолог, работает на факультете глобальной экологии Института науки Карнеги в Стэнфордском университете, занимается вопросами, связанными с климатом, углеродом и энергетическими системами. Его основные разработки — модели климата и круговорота углерода, он проводит также полевые исследования в области закисления вод океанов.



Так сколько же углекислого газа мы могли бы выбросить в атмосферу? В общей сложности около квадриллиона тонн (10^{21} г) органического углерода, заключенного в той или иной форме в осадочных породах Земли. До сих пор мы сожгли только одну двадцатую часть одного процента этого углерода, выбросив в воздух примерно 2 тыс. млрд т CO_2 .

Если учитывать все запасы углерода земной коры, то мы никогда не исчерпаем органическое топливо. Сегодня мы извлекаем нефть из битуминозных песков, а природный газ из трещиноватых сланцев, а ведь ранее оба ресурса считались технически и экономически недоступными. Никто суверенностью не может сказать, как далеко способна завести наша изобретательность. Правда, в конечном счете стоимость добычи и переработки нефти станет столь высока, что ископаемое топливо окажется дороже альтернативных энергоносителей. По сценарию, рассматриваемому здесь, мы в перспективе сожжем около 1% имеющегося органического углерода в течение нескольких последующих столетий. Это в пределах наиболее вероятной добычи, технологически осуществимой в обозримом будущем. Далее предположим, что в будущем человечество научится извлекать нетрадиционные виды ископаемого топлива, но будет сжигать его с меньшей скоростью.

Если наши привычки не изменятся, Земля может потеплеть на $5^\circ C$ к 2100 г., хотя реальное потепление может быть наполовину меньше или в два раза больше, прежде всего в зависимости от состояния облачности. Это изменение можно представить как разницу между

климатом Бостона, штат Массачусетс, и Хантсвилла, штат Алабама.

В умеренных широтах северного полушария между 30° и 60° северной широты, где расположены США, Европа, Китай, большая часть Канады и России, падение среднегодовой температуры составляет две третьих градуса Цельсия на каждый градус увеличения широты. При потеплении на $5^\circ C$ в сто лет это означает смещение данной полосы температурного режима в среднем более чем на 800 км к северу за тот же период, или более 20 м каждый день. Белки могут справиться с таким темпом, но дубы и дождевые черви будут испытывать затруднения со столь быстрым передвижением.

Затем пойдет дожди. Земля — планетарный тепловой двигатель. На экваторе жаркое солнце подогревает воздух, который затем поднимается и остывает. При охлаждении водяной пар конденсируется в атмосфере, и вода возвращается на Землю в виде дождя; так образуется пояс проливных дождей вблизи экватора.

Кроме того, при конденсации водяного пара окружающий воздух нагревается и поднимается еще быстрее. Этот сухой горячий воздух достигает высоты полетов реактивных самолетов и затем оттекает в сторону полюсов. На высоте горячий воздух излучает тепло в космическое пространство и таким образом становится прохладным, что приводит к тому, что он опускается на поверхность Земли. Солнечные лучи проходят сквозь сухую безоблачную атмосферу, принося зной в аридные зоны. Сегодня такое опускание сухого воздуха происходит у 30-й параллели к югу и северу от экватора, где и образовались пояса великих пустынь, окружающие земной шар.

В условиях потепления, вызванного парниковым эффектом, поднимающийся воздух стал горячее. Следовательно, требуется больше времени для охлаждения этого воздуха и возвращения его на Землю. В результате пояс пустынь сдвинулся в сторону полюсов.

Климат пустыни Сахары может продвинуться к северу. Уже сегодня в Южной Европе наблюдаются более сильные засухи, несмотря на общее увеличение осадков во всем мире, и средиземноморский климат, который долго почитался как один из лучших в мире, может быть утерян. Следующие поколения, возможно, скажут то же самое о скандинавском климате.

На севере в средних широтах вегетационный период становится длиннее. Весна приходит раньше, расцветают растения, тает лед на озерах, а перелетные птицы возвращаются быстрее, чем это было в историческом прошлом.

Это принесет пользу не только в смысле урожая в Канаде и Сибири. Растения превращаются в продовольствие, используя солнечную энергию для соединения углекислого газа и воды. По большей части растения поглощают CO_2 через маленькие поры в листьях, называемые устьицами. Когда устьица широко раскрыты, растения могут получить двуокись углерода в изобилии, но через эти зияющие отверстия испаряется много влаги. Более высокая концентрация CO_2 в атмосфере означает, что растение, чтобы получить необходимое его количество, должно слегка приоткрыть свои устьица или даже построить меньше устьиц в листьях. В мире с большим содержанием углекислого газа растения могут сильнее

прибавлять в росте, потребляя то же самое количество воды. (Уменьшение испарения растениями также приводит к последующему сокращению выпадения осадков, а поскольку испарение вызывает охлаждение, то его уменьшение приводит к дальнейшему потеплению.)

Подобные приросты будут ощутимы не везде. В тропиках высокие температуры уже подвергают риску многие культуры, а такая тепловая нагрузка скорее всего только усугубит положение в процессе глобального потепления. Перспектива повышенной продуктивности, вполне

вероятно, откроется повсеместно, при этом увеличение на севере будет превышать сокращение вблизи экватора. Глобальное потепление, возможно, сократит продовольственное обеспечение не везде, однако оно может дать больше богатым и меньше бедным.

Изменения в океанах

Огромные океаны сопротивляются изменению, но оно непременно происходит. Никогда в историческом прошлом Земли, за возможным исключением событий массового исчезновения видов, химический состав

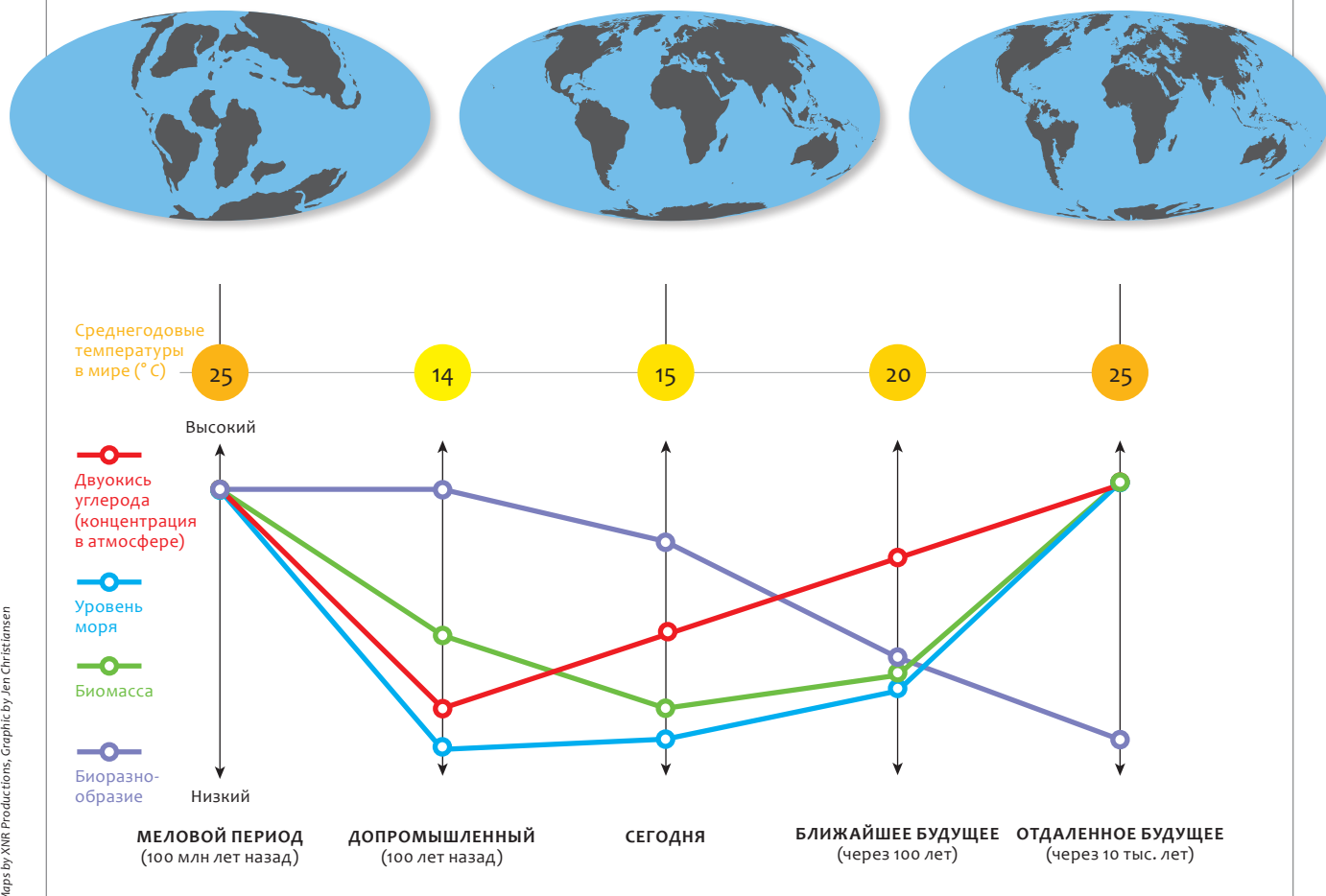
океанов не изменялся так сильно и так быстро, как это, по предположениям ученых, произойдет в предстоящие десятилетия. Когда CO_2 попадает в океаны, он вступает в реакцию с морской водой с образованием угольной кислоты. При достаточно больших концентрациях угольная кислота может растворить раковины и костные системы многих морских организмов, особенно те, что состоят из растворимой формы карбоната кальция, называемой арагоном. Ученые подсчитали, что более четверти всех морских организмов проводят часть своей жизни

Стремительное развитие

КЛИМАТ: ПРОШЛОЕ В БУДУЩЕМ

Предположим, что мы продолжим бездумно сжигать ископаемое топливо, неослабно выбрасывая в атмосферу парниковые газы, такие как, например, двуокись углерода, и наша планета подвергнется изменениям. Уже сегодня средние температуры во всем мире поднялись примерно на $1^\circ C$, а в Арктике — в два раза больше. Впоследствии средние температуры могут подняться на $10^\circ C$, чего достаточно,

чтобы растопить значительную часть ледников Гренландии и Антарктиды и поднять уровень моря на 120 м. Содержание двуокиси углерода в атмосфере достигнет концентраций мелового периода, когда по Земле бродили динозавры, Северная Америка была разделена на две части огромным внутренним морем, а похотие на крокодилов существа обитали на полюсах.



на коралловых рифах. Остов кораллов состоит из арагонита. Даже если химическая среда не ухудшится до состояния, когда раковины растворятся, закисление может затруднить их построение организмами. Буквально через несколько десятилетий в океане не найдется места, где еще останутся химические реакции, так долго поддерживавшие рост коралловых рифов в геологическом прошлом. Сколько видов, жизненно связанных с кораллами, исчезнут вместе с ними, нам не известно.

Прежде всего, химические превращения непосредственно нарушат жизнь рифов, но всем нам надо быть в курсе дела и физических изменений. В сущности, вода ведет себя как ртуть в термометре: добавь тепла и наблюдай, как она поднимается. Океан также подпитывается за счет воды, удерживаемой в ледниках.

В древние времена в условиях высокого содержания CO_2 Земля была достаточно согрета, чтобы крокодилообразные животные могли обитать за полярным кругом. Примерно

100 млн лет назад среднегодовые температуры на полюсах доходили до $14^\circ C$, а летом они превышали $25^\circ C$. Температур такой величины хватило бы, чтобы в течение нескольких тысяч лет растопить огромные ледниковые щиты Гренландии и Антарктиды. Полное таяние ледниковых щитов поднимет уровень моря на 120 м, и будут затоплены обширные территории. Под весом водных масс равнины и низменности вдавятся глубже в мантию, и волны заплещутся даже еще выше.

Как ожидается, на полюсах потепление пройдет в 2,5 раза быстрее, чем на Земле в целом. Уже сейчас Арктика теплеет быстрее, чем любое место в мире, на $2^\circ C$ по сравнению с общемировым потеплением на $0,8^\circ C$. В конце последнего оледенения, когда климат потеплел приблизительно на $5^\circ C$ в течение тысяч лет, ледниковый покров таял со скоростью, давшей поднятие уровня моря на 1 м в столетие. Мы надеемся и полагаем, что в наши дни ледники не станут таять быстрее, но не можем быть в этом уверены.

Догоняя Венеру

На протяжении последних нескольких миллионов лет колебания климата Земли вызывали прирост и убывание великих ледниковых щитов. Эмиссия парниковых газов в наши дни как молотом ударяет по этой сложной системе. Я представил сценарий, по которому наш климат развивается относительно мягко, но скачки и рывки, которые могли бы потрясти биологические, социальные и политические системы с силой, выходящей за грань их устойчивости к внешним воздействиям, также возможны.

Представим, что в результате потепления в Арктике сотни миллиардов метрических тонн метана быстро поднимутся со дна океанов и поверхности суши и забульют в атмосфере. Метан в 37 раз лучше улавливает тепло, чем двуокись углерода. Освободись этот газ внезапно, как это могло случиться 55 млн лет назад во время потепления, известного как палеоцен-эоценовый термальский максимум, мы могли бы испытать действительно катастрофическое потепление. Однако, по мнению большинства ученых, подобная опасность очень далека.

Но некоторые считают, что такие последствия, как таяние вечной мерзлоты, могут вызвать неуправляемое развитие парникового эффекта, когда нагрев океанов будет столь велик, что они испарятся. Поскольку водяной пар сам представляет собой парниковый газ, то столь сильный кругооборот воды мог бы так разогреть Землю, что водяной пар остался бы в атмосфере и никогда не пролился дождем. В этом случае двуокись углерода в атмосфере вулканического происхождения и из других источников будет продолжать накапливаться. На большой высоте космические лучи будут расщеплять молекулы водяного пара, а в результате появившийся водород улетучится в космическое пространство. И тогда на Земле установится климат, напоминающий окружение ее соседки — планеты Венеры.

К счастью, испарение океанов не представляет даже отдаленной угрозы при существующей эмиссии



Далекое будущее. Если эмиссия парниковых газов при сжигании ископаемого топлива не снизится, то уровень моря может подняться на 120 м и приполярные области станут намного теплее. Любая человеческая цивилизация, сохранившаяся до того времени, должна будет приспосабливаться к этим условиям.

парниковых газов. Попросту говоря, существует ограничение на количество CO_2 , которое может нагреть нашу планету. Как только концентрация углекислого газа и водяного пара поднимется достаточно высоко, их молекулы начнут усиленно рассеивать поступающую солнечную радиацию, создавая защиту от нагрева.

Если мы продолжим сжигать ископаемое топливо, то концентрация парниковых газов в атмосфере достигнет уровня, который последний раз был в меловом периоде. В те времена внутренние моря занимали огромные пространства суши на жаркой и влажной Земле. Гигантские рептилии плавали в океанах. На суше динозавры щипали пышную растительность. Если мы сожжем только 1% органического углерода из запасов земной коры в течение нескольких будущих столетий, то человечество будет вдыхать воздух с таким же содержанием CO_2 , как и динозавры, и ощущать аналогичные температуры.

В сравнении с постепенным потеплением во времена прошлого климата с парниковым эффектом, в настоящее время время промышленного развития его изменение происходит в ускоренном темпе. В геологическом прошлом переход от низких к высоким концентрациям CO_2 в атмосфере обычно происходил при скорости изменения менее 0,00001 градуса в год. Сегодня мы воссоздаем мир динозавров в 5 тыс. раз быстрее.

Кто будет процветать в этом парнике? Некоторые организмы, такие как, например, крысы и тараканы — универсальные захватчики, которые могут использовать преимущества разоренной среды. Другие организмы, такие как кораллы и разные виды тропических лесных растений, развивались так, чтобы жить в строго определенных условиях. Инвазивные виды, вероятно, преобразуют экосистемы, измененные в результате глобального потепления. Изменение климата может спровоцировать повсеместное распространение сорняков.

Человечество также стоит на краю пропасти. Рассмотрим историю народа майя. Еще до того как пришли

европейцы, эта цивилизация уже начала угасать из-за относительно малых климатических перемен. Культура майя была еще недостаточно жизнестойкой, чтобы выдержать небольшие природные сокращения дождей осадков. Майя — не единственный пример поражения цивилизации в процессе адаптации к климатическим изменениям.

Есть основания полагать, что кризисы, вызванные изменением климата, имеют региональную выраженность. Если богатые становятся богаче, а бедные — беднее, может ли последовать массовая миграция населения, угрожающая политической и экономической стабильности? Отдельные страны, которые, скорее всего, могут пострадать от изменений, спровоцированных глобальным потеплением, также гордятся тем, что в их арсенале есть ядерное оружие. Может ли изменение климата усилить существующее напряжение и подтолкнуть к развязке ядерного или другого конфликта, ведущего к апокалиптическому развитию событий? Общественный резонанс на изменение климата может создать больше проблем для человечества, чем само изменение климата.

Начать сначала

Древовидные растения, процветавшие в меловой период, вымерли, превратившись в геологическом времени в каменный уголь. Планктон морей и океанов закончил жизнь в осадочных породах, превратившись в нефть и газ. Климат остывал, в то время как морские организмы собирали углекислый газ и создавали раковины и скелеты.

На протяжении тысячелетий океаны будут поглощать большую часть окружающего CO_2 . Нарастающее закисление морских вод повлечет развитие карбонатных пород, а химические реакции в результате дадут еще большее поглощение двуокиси углерода. Тем не менее концентрации атмосферного CO_2 будут значительно превышать доиндустриальный уровень в 280 частей на млн в течение многих десятков тысяч лет. В итоге приостановятся наступление и отступление ледниковых

эпох, вызываемые незаметными изменениями земной орбиты, и антропогенная эмиссия парниковых газов погрузит нашу планету в условия парника.

По истечении времени увеличившиеся температуры и осадки ускорят темп растворения горных пород и грунтов. Ручьи и реки будут выносить растворенные породы и минералы, содержащие такие элементы, как кальций и магний, в океаны. Возможно, пройдут сотни тысяч лет, пока некоторые морские организмы поглотят кальций и двуокись углерода и создадут карбонатные раковины. В конце концов эти морские моллюски и миллионы других превратятся в известняк. Как и Белые скалы Дувра в Англии, что стали реликтовыми свидетелями атмосферы мелового периода, большая часть углерода в ископаемом топливе, сожженная сегодня, станет одним из слоев пород, воплотив в камне историю мира, измененного единственным видом. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Oceanography: Anthropogenic Carbon and Ocean pH. Ken Caldeira and Michael E. Wickett in Nature, Vol. 425, page 365; September 25, 2003.
- Climate Change 2007: The Physical Science Basis. International Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007. www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html
- The Long Thaw. David Archer. Princeton University Press, 2010
- Видео о том, чего еще можно ожидать от изменения климата, можно посмотреть по адресу: ScientificAmerican.com/sep2012/future-climate