



ЖАРКИЙ ПОЛДЕНЬ
ДЛЯ 2°C

ДОКЛАД
ЖАРКИЙ ПОЛДЕНЬ ДЛЯ 2°C
октябрь 2009

Авторы
д-р Катя Фрилер,
д-р Мальтэ Майнсхаузен
д-р Бил Хэер

Опубликовано
шведской неправительственной организацией
Air Pollution & Climate Secretariat
а/я 7005, 402 31 Гётеборг, Швеция
Тел.: +46 31 711 45 15
info@airclim.org www.airclim.org

Авторы

Д-р Катя Фрилер (Dr. Katja Frieler) (katja.frieler@pik-potsdam.de) – математик, получила степень кандидата наук по специальности «Физика атмосферы» в Потсдамском университете. Будучи докторантом, работала в Институте морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (AWI, Потсдам) над проблемой химического моделирования потерь озона в полярной стратосфере. Является членом исследовательской группы PRIMAP (“Potsdam Real-Time Integrated Model for probabilistic Assessment of emission Path”) при Потсдамском институте изучения последствий изменения климата (PIK). В настоящее время работает над статистическими методами прогнозирования региональных изменений климата.

Д-р Мальтэ Майнсхаузен получил степень кандидата наук по специальности «Климатология и климатическая политика» и диплом по специальности «Наука об окружающей среде» в Швейцарском Федеральном институте технологии, Швейцария. В 2000 г. получил степень магистра по специальности «Изменение окружающей среды и управление ее состоянием» в Оксфордском университете, Великобритания. До того как присоединиться к Потсдамскому институту изучения последствий изменения климата в сентябре 2006 г., занимал должность профессора в Национальном Центре атмосферных исследований, г. Боулдер, штат Колорадо. Соавтор многих разделов четвертого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, AR4). В настоящее время – руководитель исследовательской группы PRIMAP при Потсдамском институте изучения последствий изменения климата.

Почетный доктор наук Бил Хэер (bill.hare@climateanalytics.org) – физик и ученый-эколог с более чем двадцатилетним опытом работы в научных исследованиях физической основы климатических изменений, последствий изменения климата и ответных мер политики по проблеме изменения климата и истощения озонового слоя в стратосфере. Г-н Хэер является одним из ведущих авторов одной из частей четвертого оценочного доклада (AR4) МГЭИК «Изменение климата 2007: предотвращение изменения климата», а так же тематическим руководителем по долгосрочным вопросам и Статьи РКИК ООН в сводном отчете о выполнении проекта по AR4 МГЭИК. В 2008 году Университет Мердока присудил ему степень Почетного доктора наук за вклад в решение проблем, связанных с изменением климата. Один из наиболее опытных специалистов в области международной политики по изменению климата, принимающий участие и организовывающий переговоры начиная с 1990 г. Проводит консультации для многих глав делегаций и политических лидеров по вопросам климатологии и стратегий климатической политики. В настоящее время – соруководитель исследовательской группы PRIMAP и директор НПО «Climate Analytics» (www.climateanalytics.org).

Введение: Растущий альянс

В далеком в 1992 году страны мира пришли к договоренности "предотвратить опасное антропогенное вмешательство в климатическую систему" (ст. 2 Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата¹). Однако до недавнего времени большинство стран не могли сойтись во мнениях, что именно означала эта договоренность. За прошедший год количество стран, которые достигли соглашения по конкретной цели, а именно ограничить глобальное потепление в рамках 2°C или 1,5°C, значительно возросло: теперь оно составляет 133 страны². В июне 2009 г. даже США согласились на установленный странами «Большой восьмерки» предел глобального потепления на уровне 2°C. В целом по состоянию на 2005 год, на долю всей группы стран, призывающих не допустить потепление атмосферы до 2°C или даже меньше, приходится около 75 процентов глобальной энергетики и объема техногенных выбросов CO₂³ и около 80 процентов населения мира.⁴

Хорошие новости для Копенгагена?

Это хорошая новость, потому что данный предел потепления можно непосредственно перевести в объем выбросов, которые мы еще можем себе позволить, не переступая этот порог. Таким образом, определен размер общего «пирога» разрешений на выбросы, хотя вопрос, как этот «пирог» будет делиться между странами и в течение какого срока, в настоящее время является предметом переговоров. Но именно здесь и заканчиваются хорошие новости.

Призывая удерживать потепление в рамках 2°C, страны по-прежнему претендуют на слишком большой кусок «пирога» для себя. Иными словами, обязательства, поставленные на обсуждение в Копенгагене, не ведут нас туда, куда нам следует направляться: а именно, свести почти к нулю выбросы углерода уже к концу этого века.

Цель данного информационного бюллетеня - разъяснить, откуда взялся целевой показатель в 2°C (Раздел 1), и пролить свет на наши шансы удержать потепление ниже этого уровня. Мы начнем с краткого осмотра обсуждения на тему: обречены ли мы на превышение границы потепления в 2°C (Раздел 2). Затем мы рассмотрим, что означает этот уровень для общего размера «пирога» выбросов (объема допустимых выбросов для всех стран) (Раздел 3), прежде чем перейти к вопросу о том, как бы мы могли разделить «пирог» (Раздел 4). Наконец, мы посмотрим на нынешнее состояние международных переговоров ООН, т.е., к чему сводятся текущие обязательства стран по сокращению выбросов (Раздел 5).

Раздел 1: Общие сведения о норме 2°C

Откуда появился предел 2°C

Исходя из имеющихся научных физических оснований серьезных региональных последствий климатических изменений, в конце 1980-ых гг. Консультативная группа, сформированная Всемирной метеорологической организацией, Международным Советом научных союзов и Программой ООН по окружающей среде, рекомендовала установить рост средней глобальной приповерхностной температуры на уровне 2°C относительно доиндустриального уровня. Этот показатель рекомендовался как «верхний предел, за рамками которого ожидается резкое повышение риска серьезного ущерба экосистемам и нелинейной реакции»⁵. Затем, немецкий Консультативный совет по глобальному изменению климата⁶

рекомендовал принять целевой предел потепления на уровне 2°C, исходя из мнения, что глобальное потепление необходимо удерживать в рамках, известных из последних теплых периодов (межледниковых). В 1996 году после рассмотрения второго оценочного доклада МГЭИК (SAR)⁷, основное внимание в котором уделялось серьезным последствиям, которых следует ожидать в случае потепления больше чем на 2°C, Европейский Союз впервые установил целевой предел в 2°C⁸.

Является ли предел в 2°C научно обоснованной целью?

Является ли предел в 2°C научной или ненаучной целью? Ни тем, ни другим. Это цель политики, основанная на научных сведениях, подобно ограничению скорости для автомобилей. Любая такая цель является субъективной оценкой лиц, определяющих политику, и, следует надеяться, основана на научной информации касательно возможных последствий, в случае если мы не ограничим глобальное потепление до уровня ниже 2°C. С ростом научного понимания, по оценке четвертого оценочного доклада МГЭИК (AR4), трудно прийти к другому заключению, кроме того, что для предотвращения "опасного антропогенного вмешательства в климатическую систему" необходимо удержать среднегодовое глобальное потепление в рамках не выше 2°C, и, чем ниже, тем лучше.

С одной стороны, некоторые с полным основанием заявляют, что нынешние последствия изменения климата уже опасны (например, количество жертв аномальной жары в Европе в 2003 году^{9,10}). Хотя мы пока что столкнулись с относительно мягким глобальным потеплением на 0,8°C, мы уже стали свидетелями беспрецедентного массового обесцвечивания кораллов, вызванного необыкновенно высокой температурой морской воды¹¹, беспрецедентных периодов необычайной жары и усиления интенсивных и разрушительных тропических циклонов, связанного с повышением температуры поверхности моря¹².

Учитывая информацию, содержащуюся в докладе AR4 МГЭИК, а так же данные, полученные благодаря наблюдениям и спрогнозированные с тех пор, очевидно, что система оценки, которая бы ориентировалась на целевой предел потепления выше, чем 2°C, граничила бы с абсурдом. Безусловно, что было бы оценочным суждением не относить к «опасным» такие последствия, как полное исчезновение коралловых рифов, еще более сильные засухи в зоне Средиземноморья¹³, резкий переход к полузасушливому состоянию на Юго-западе США¹⁴, возможно, более интенсивные циклоны¹⁵ или почти достоверный многометровый подъем уровня моря в долгосрочной перспективе¹⁶. Тем не менее, большинство людей с этим суждением, скорее всего, не согласятся.

2°C не является безопасным уровнем

Конечно, 2°C это не "безопасный уровень". Вот почему группа 80 наиболее уязвимых развивающихся стран призывает установить предел глобального потепления на уровне ниже 1,5°C вместо 2°C. В эту группу входят Альянс малых островных государств (АМОГ) и группа Наименее Развитых Стран (НРС), которые являются наиболее уязвимыми к изменению климата. Согласно прогнозам, глобальное потепление на 2°C причинит неприемлемый ущерб этим странам. Долгосрочное повышение уровня моря, вероятно, положит конец истории многих из низколежащих островов, даже при потеплении на 2°C.

При таком уровне потепления, если не раньше, летний морской лед Арктики может исчезнуть, а вместе с ним и уникальная экосистема ледово-зависимых видов, таких как полярные медведи. Нельзя также исключать возможность того, что в следующие столетия ускоренное таяние ледникового покрова Гренландии и разложение ледяного покрова Западной Антарктики может быть вызвано при потеплении ниже, чем на 2°C , что вызовет затопление густонаселенных дельт рек и низинных прибрежных регионов по всей планете. Ограничение глобального потепления до уровня ниже 2°C , безусловно, поможет избежать худших последствий. Таким образом, 2°C часто считается порогом, за которым мы натолкнемся на неуправляемые риски.

Раздел 2:

Можно ли избежать потепления на 2°C ?

Концентрация ПГ (парниковых газов) в атмосфере уже достигла уровня около 450 частей на млн. эквивалента углекислого газа, как же избежать потепления на 2°C ?

Атмосфера уже насыщена парниковыми газами в мере достаточной для того, чтобы привести к вероятному потеплению на 2°C при удовлетворении двух условий: во-первых, концентрация парниковых газов остановится на сегодняшнем уровне, а во-вторых, все хладагенты, то есть аэрозоли, будут ликвидированы.

Тогда возникает вопрос, готовы ли мы ограничить потепление на уровне 2°C ? Нет, и в следующих абзацах объясняется почему.

Общий объем всего нагревающего и охлаждающего воздействия на климат в результате человеческого влияния определяет среднегодовую глобальную температуру. Цифра 450 частей на млн. эквивалента углекислого газа учитывает только тепловое влияние парниковых газов CO_2 , CH_4 , N_2O , и различных видов фторуглеродов, в том числе ГФУ, но не учитывает охлаждающее воздействие аэрозолей. Действие аэрозолей в том, чтобы снизить комбинированные воздействия на изменение климата, вызванные всеми ПГ, к уровню воздействия одного только CO_2 , что составляет около 385 частей на млн. эквивалента углекислого газа.

Если бы нам пришлось сократить все выбросы сразу, то концентрация упала бы еще. В случае с CO_2 , существенное его количество по-прежнему будет перераспределяться между мировым океаном и биосферой. Что касается

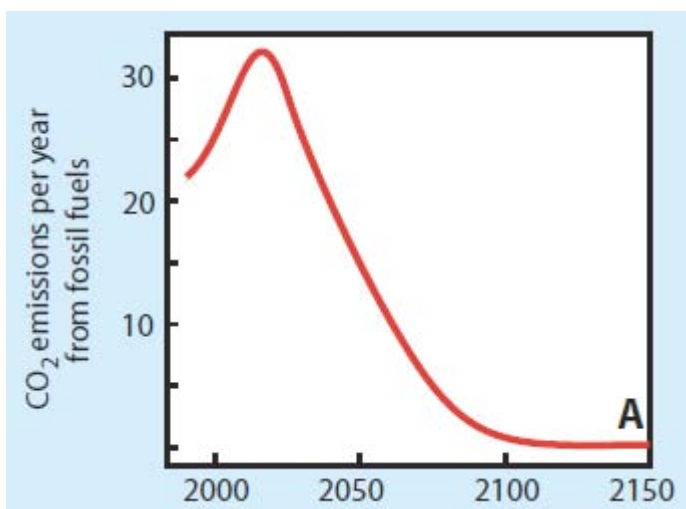


Рис.1 А: Уровень выбросов CO_2 от использования ископаемых видов топлива по сценарию предотвращения изменений климата, предполагающему к 2050 г. сокращение уровня выбросов ПГ (включенных в Киотский протокол) на половину относительно уровня 2000 г. (Schellnhuber, 2008)¹⁷

других газов, предельная продолжительность пребывания в атмосфере, приведет к тому, что их концентрация будет медленно снижаться обратно к естественно-природному уровню.

Таким образом, готовность, вероятно, лучше всего определяется сценарием выбросов, который приводит к максимально возможным темпам сокращения выбросов и является экономически и технически обоснованным, не причиняя, например, серьезных сбоев в энергоснабжении. Полученный таким образом уровень концентрации сначала вырастет выше сегодняшнего уровня, а потом, в долгосрочной перспективе, снова упадет

ниже этого уровня. Иными словами, мы не обязаны останавливаться на текущем или высшем уровне концентрации парниковых газов. Нам выбирать.

Даже если в долгосрочной перспективе убрать аэрозольный щит, создающий эффект охлаждения (поскольку это целесообразно по ряду причин, главная из которых качество воздуха), в результате потепление не должно превышать 2°C ¹⁷. Все сценарии, предусматривающие более низкий предел, проанализированные в четвертом оценочном докладе МГЭИК, например, значительно уменьшают уровень выбросов аэрозолей до середины столетия, и все же по этим сценариям можно ограничить максимальный уровень потепления ниже, чем 2°C (Табл. 3.10 в четвертом докладе МГЭИК, РГ III¹⁸). На рисунке 1А также показано уровень концентрации ПГ и среднегодовое глобальное потепление по сценарию, который предусматривает значительное удаление охлаждающих воздух загрязняющих веществ параллельно с заменой ископаемых видов топлива и технологических инноваций. Следуя верхнему диапазону целевого показателя сокращения выбросов, одобренного странами Большой восьмерки, по этому сценарию уровень глобальных выбросов парниковых газов, включенных в Киотский протокол, сокращается в два раза до 2050 года, как и в работе Шельнхубера (Schellnhuber, 2008)¹⁷. Практически, предел в 450 частей на млн. эквивалента CO_2 наверняка будет превышен (даже учитывая воздействие аэрозолей), в то время как вероятность превышения целевого показателя в 2°C составляет один из трех или немногим больше.

И наконец, мы обречены на превышение показателя 450 частей на млн. эквивалента CO_2 (даже учитывая охлаждающие вещества) на протяжении нескольких десятилетий. Только если глобальные выбросы начнут сокращаться немедленно примерно на 7 процентов в год, тогда и суммарное воздействие остановится на уровне, ниже чем 450 частей на млн. эквивалента CO_2 . Как показано на рисунке 1, такое отклонение концентрации не обязательно приведет к превышению предела повышения температуры в 2°C . Данное явление аналогично тому, как выставляется реле температуры на кухонной духовке на 220°C , в нашем случае концентрация парниковых газов исполняет роль реле температуры. Если духовку достаточно быстро выключить, фактическая температура в духовке никогда не достигнет 220°C .

Таким образом, нет никаких причин для самоуспокоения. Чтобы обеспечить безопасное будущее климата в долгосрочной перспективе, мы должны направить концентрацию эквивалента углекислого газа в атмосфере в обратную сторону. Первым и наиболее важным требованием для прекращения любого дальнейшего роста концентрации является снижение выбросов. Необходимо как можно скорее достичь пика для того, чтобы встать на путь снижения, по крайней мере, начиная с 2015 года и далее²¹. Только если уровень глобальных выбросов впоследствии сократится достаточно быстро, мы сможем остановить дальнейший рост среднегодовой глобальной температуры. Чтобы остановить рост уровня моря, просто нет другого пути, кроме как удалить CO_2 из атмосферы. Только эти "негативные" выбросы затем позволят нам в долгосрочной перспективе, вернуться к уровню концентрации CO_2 ниже 350 частей на млн. CO_2 , как предлагается в работе Хансена и др. (2008)²², что обеспечит хоть какой-то шанс, по крайней мере, ограничить рост уровня моря.

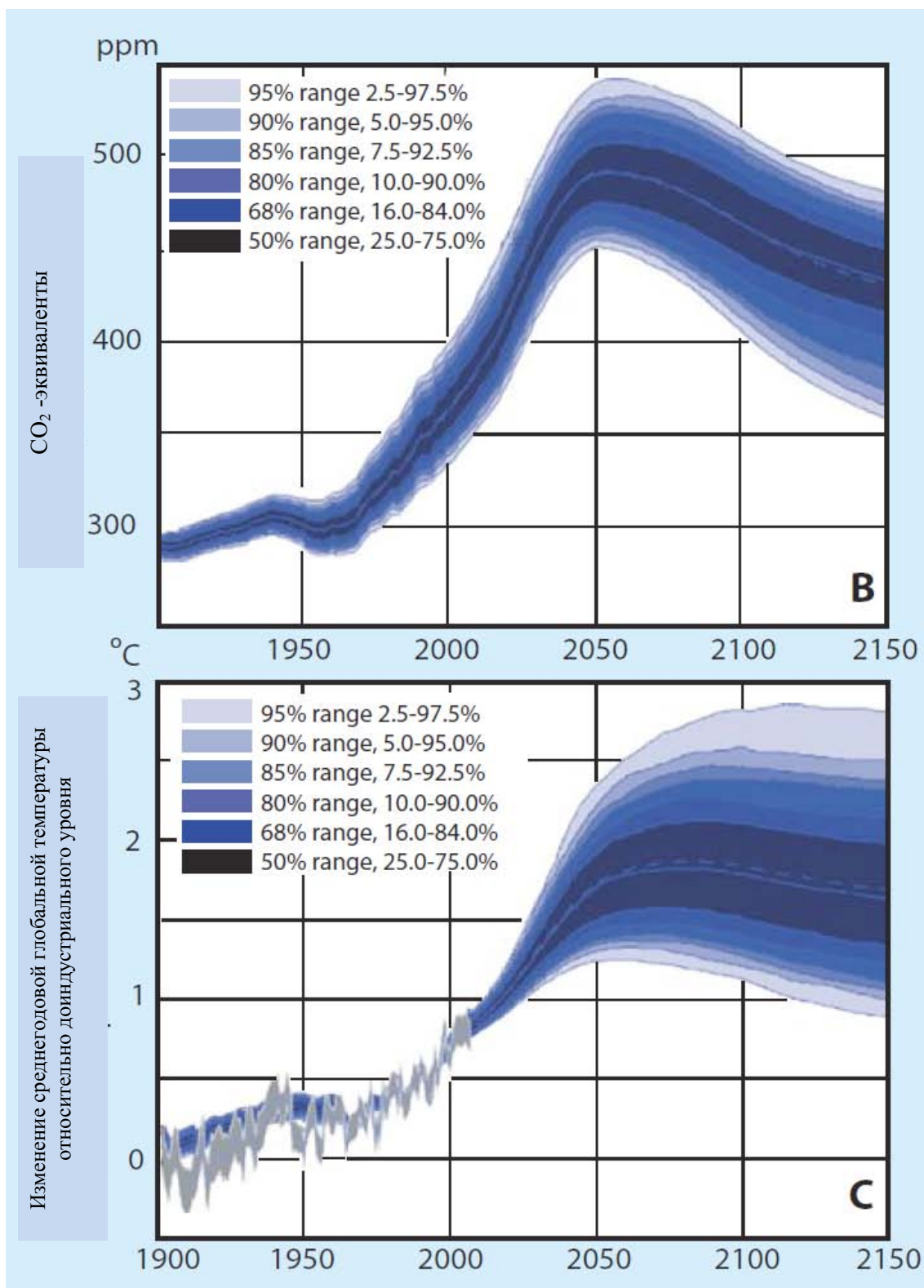


Рис. 1В: Итоговый уровень концентрации ПГ + воздействие аэрозолей переведены в концентрацию эквивалента CO₂. Расчеты основываются на упрощенной модели углеродного цикла MAGICC6.0¹⁹. Область неопределённости рассчитана с помощью статистических методов, предложенных Майнсхаузенем и др. (2009)²⁰ (см. также Приложение).

Рис. 1С: Итоговые изменения среднегодовой глобальной температуры относительно доиндустриального уровня.

Имеет ли смысл уделять большое внимание короткоживущим соединениям, которые способствуют потеплению атмосферы?

Существует один дополнительный очень важный аспект касающийся аэрозолей: хотя в целом считается, что они имеют эффект охлаждения ($-1,4 \text{ Вт/м}^2$ согласно с Раманатаном и Крамайклом (2008)²⁵ и $-1,2 \text{ Вт/м}^2$ согласно с докладом AR4 МГЭИК РГ I²³), технический углерод (ТУ) является одним из компонентов с ярко выраженным эффектом нагревания ($+0,20$ ($0,05, 0,35$) Вт/м^2 исключительно из ТУ ископаемых видов топлива (AR4 МГЭИК РГ I²³); $+0,9$ ($0,65, 1,15$) Вт/м^2 согласно с Раманатаном и Крамайклом (2008) включая и другие источники такие как сжигание биомассы). Таким образом, сокращение выбросов технического углерода поможет ослабить глобальное потепление. Выбросы технического углерода возникают главным образом вследствие приготовления пищи с использованием биотоплива, сгорания ископаемых видов топлива (особенно дизельного топлива и угля), и сжигания биомассы, связанного с лесоиспользованием и сжиганием пожнивных остатков. Поэтому сокращение выбросов технического углерода не просто принесло бы огромную пользу в плане повышения качества воздуха (в помещении). Из-за того, что технический углерод на снегу может уменьшить альбедо снега и территорий, покрытых льдами, сокращение уровня выбросов технического углерода может быть особенно полезным для ледников в Гималаях и арктических экосистем.

Однако ни одно такое сокращение не должно осуществляться за счет уменьшения внимания к главному виновнику с долгосрочными последствиями - CO_2 . Если использование короткоживущих соединений, таких как технический углерод и метан, а также ГФУ, будет сокращаться в обмен на более высокий уровень выбросов газов с большой продолжительностью пребывания в атмосфере, тем самым климату будет оказана медвежья услуга. Это объясняется тем, что в долгосрочной перспективе, когда изменение климата будет значительно более драматичным, чем сегодня, значение будут иметь только долгоживущие выбросы, осуществляемые сегодня.

Это не означает, что нет необходимости сокращать выбросы технического углерода. Напротив, сокращение загрязнения воздуха, продление жизни гималайским ледникам, которые обеспечивают снабжение водой, а также замедление текущего потепления в Арктике, являются достаточными основаниями для оперативных действий уже сейчас. Однако решение проблемы короткоживущих воздействующих веществ не может заменить решение проблемы сокращения выбросов CO_2 . Важно также вспомнить, что переход к энергетической системе с очень низким уровнем выбросов CO_2 быстро снизит уровень выбросов технического углерода, однако если действовать в противоположном направлении, такой взаимосвязи не будет или она будет незначительной. Иными словами, активное продвижение в решении проблемы с выбросами CO_2 будет означать, что параллельно решать проблемы с техническим углеродом будет легче.

Раздел 3:

Размер «пирога» – какой уровень выбросов является допустимым?

Для уникальных экспериментов в запасе имеется много сюрпризов

Преобразование цели 2°C или $1,5^\circ\text{C}$ в руководство по достижению целевых показателей сокращения глобальных выбросов в течение ближайших десятилетий является одной из наиболее важных и срочных задач. Нам придется ответить на вопрос о том, какой потолок необходимо установить для выбросов, чтобы удержать уровень среднегодового глобального потепления ниже вышеуказанных целевых показателей. Именно это число потом позволит провести оценку целевых показателей. Но, к сожалению, определить это число – задание не из

простых. Несомненным является факт, что выбросы парниковых газов, вызванные деятельностью человека, могут вызвать и вызвали глобальное потепление²⁶. Но при этом невозможно предсказать точный показатель вызванного потепления даже для определенного количества выбросов. Он (показатель) зависит от многих факторов, таких как: количество CO₂, поглощенного или выделенного биосферой суши и океанами; сила радиационного воздействия, связанного с концентрацией CO₂ и других парниковых газов, остающихся в атмосфере; охлаждающее воздействие аэрозолей и доля потепления, которая была поглощена океанами. Однако в последнее время отмечается значительный прогресс в измерении этих неопределенностей.

Воздействие	Радиационное воздействие за 2005 г. (Вт/м ²)	Улучшенная оценка концентрации эквивалента CO ₂ (частей на млн.), если все нижеприведенные элементы включены по одному ²⁴ .
CO ₂	1,66 (1,49; 1,83)	380 CO ₂
Метан (CH ₄)	0,48 (0,43; 0,53)	415 CO ₂ -экв. (CO ₂ + CH ₄)
N ₂ O	0,16 (0,14; 0,18)	427 CO ₂ -экв.
Галоидуглеводород	0,34 (0,31; 0,37)	455 CO ₂ -экв.
Тропосферный озон	0,35 (0,25; 0,65)	486 CO ₂ -экв.
Стратосферный озон	-0,05 (-0,15; 0,05)	482 CO ₂ -экв.
Использование земель	-0,20 (-0,40; 0,00)	464 CO ₂ -экв.
Технический углерод на снегу	0,10 (-0,00; 0,20)	473 CO ₂ -экв.
Непосредственное воздействие аэрозолей	-0,50 (0,90; -0,10)	431 CO ₂ -экв.
Косвенное воздействие аэрозолей	-0,70 (-1,81; -0,30)	378 CO ₂ -экв.

Таблица 1. Текущее антропогенное воздействие на атмосферу. В левой колонке перечислены радиационно-воздействующие вещества, связанные с деятельностью человека, основным среди которых является CO₂; их радиационное воздействие (мера, до которой эти вещества способствуют потеплению) указано в средней колонке (взято из таблицы 2.12 доклада AR4 МГЭИК, РГ I²³); в правой колонке указана соответствующая улучшенная оценка концентрации эквивалента углекислого газа.

Как и с любым уникальным экспериментом, а мы в настоящее время проводим большой эксперимент с климатом Земли, в запасе обязательно найдется несколько сюрпризов. В истории человечества климат еще никогда не доводился до такого уровня потепления, к которому направляемся мы. Мы не можем быть уверены, что еще большие механизмы, с позитивной обратной связью, такие, как выброс метана из морского дна при нагревании морей, не станут в будущем основным источником потепления, который будет нас преследовать. Мы не можем быть уверены в том, какой именно будет реакция углеродного цикла на протяжении различных экосистем Земли. Но также присутствуют и определенные факты. Мы наверняка знаем, что климат будет теплеть, и при потеплении на 2°C, очевидно, что под угрозой будет находиться больше наземных, пресноводных и морских видов, чем в любое другое время недавнего геологического прошлого²⁷.

Метод управления рисками – количественное определение допустимых выбросов

Учитывая эти факторы неопределенности, политику изменения климата необходимо рассматривать как метод управления рисками. Как и во многих других областях политики, мы

не только должны установить цель, но также решить насколько уверенными мы хотим быть в достижение этой цели. Отсюда возникает вопрос: «Какой уровень выбросов является допустимым, если мы хотим сохранить глобальное потепление, ниже уровня 1,5°C или 2°C с вероятностью в X %?» Для каждой траектории выбросов будет существовать определенный риск превышения заданной целевой температуры из-за погрешности в прогнозах – не принимая даже во внимание потенциально сильные обратные связи, упомянутые выше. Любое принятие решения о возможных траекториях выбросов сопряжено с большой неопределенностью, как и большинство политических решений. Но приложено немало усилий к тому, чтобы количественно определить и сократить неопределенности, связанные с этим конкретным вопросом.

Недавно было проведено четыре исследования (Meinshausen et al., 2009²¹ и Allen et al, 2009²⁸, Matthews et al. 2009²⁹ и Zickfeld et al. 2009³⁰), в которых был предпринят комплексный подход к количественной оценке текущих факторов неопределенности, связанных с вопросом о том, какой уровень глобальных выбросов является допустимым. В данном информационном бюллетене мы сосредотачиваем внимание на методологии, которая предусматривает все парниковые газы (Meinshausen et al., 2009).

При любой конкретной траектории выбросов, для оценки вероятности превышения уровня среднегодового глобального потепления на 2°C в XXI веке была использована упрощенная климатическая модель углеродного цикла. Таким образом, было проведено большое количество модельных экспериментов на основании различных наборов входных параметров модели, изменяющихся в пределах их области неопределенности. Подробнее о методологии рассказывается в Приложении.

Расчет этих вероятностей превышения 2°C для большого количества схем сокращения выбросов говорит нам о том, что:

1. Как правило, вероятность превышения зависит от кумулятивного уровня выбросов, т.е. от уровня выбросов суммированного в течение длительного времени, а не по конкретной схеме сокращения выбросов.
2. Если мы принимаем вероятность превышения 2°C на уровне 25 процентов, кумулятивный уровень выбросов CO₂ вследствие использования ископаемых видов топлива и изменения характера землепользования должен быть ограничен до 1000 млн. тонн CO₂. Даже если мы желаем принять вероятность превышения потепления на 2°C на уровне 50 процентов, предел достигается при 1440 млн. тонн CO₂.

Мы не можем себе позволить сжигать сегодняшние резервы.

Но что же означают цифры 1000 млн. тонн CO₂ и 1440 млн. тонн CO₂, соответственно? Есть ли надежда, что запасы ископаемого топлива будут исчерпаны еще до того как будут достигнуты эти пределы? Ответ – нет. Сжигание известных запасов нефти, газа и угля, извлекаемых в экономических целях, намного превышает «допустимый уровень выбросов», который должен удерживать глобальное потепление в рамках ниже 2°C: известный уровень выбросов CO₂ с 2000 г. и до сегодня (2009 г.) в целом уже составляет более чем 300 млн. тонн CO₂. Таким образом, у нас осталось только менее 700 млн. тонн CO₂ допустимого количества выбросов, если мы хотим сохранить "вероятность"³¹ (75 процентов или другими словами шансы 3 к 1) удерживать глобальное потепление в рамках ниже 2°C. Учитывая, что количество запасов ископаемого топлива, извлекаемых в экономических целях, составляет около 2 800 млн. тонн CO₂^{32,33}, это меньше чем четверть. На основании сегодняшней интенсивности выбросов, составляющей 36,3 млн. тонн CO₂/год, баланс в 1000 млн. тонн CO₂ будет исчерпан до 2027 года. Кроме того, имейте в виду, что общая оценка ресурсов, включая нетрадиционные источники ископаемого топлива, вероятно, во много раз больше, чем количество резервов, извлекаемых в экономических целях.

Но применение технологии CCS (улавливания и захоронения углерода) позволит нам сжечь все виды ископаемого топлива!?

Краткий ответ – нет, и вот почему: технология улавливания и захоронения углерода (CCS) является важной технологией; ее стоит поддерживать и очень важно сделать ее доступной в коммерческих масштабах, обеспечив основательные решения для урегулирования таких проблем, как долговечность, утечки, транспортирование и т.д. И да, это так, если сжигание ископаемых видов топлива на электростанциях, работающих на угле, сочетать с технологией CCS, то такая электростанция будет с нулевым балансом выбросов углерода.

Так почему же тогда CCS не является спасательным кругом для угольной промышленности? Для того чтобы достичь безопасного климатического уровня в долгосрочной перспективе, например, возвратиться к уровню концентрации CO₂ 350 частей на млн., мы будем вынуждены до конца века сократить все выбросы по сути до нуля. Вполне вероятно, что выбросы CO₂ должны будут достичь близкого к нулю уровня, непосредственно начиная со второй половины века. Более того, чтобы предотвратить дальнейшее повышение уровня моря или текущее окисление океана, мы должны избавиться от негативных выбросов CO₂. Эти негативные выбросы, например, возможны при сочетании электростанций, работающих на биомассе, и технологии CCS. Таким образом, мы просто не можем позволить себе тратить имеющиеся подземные места для захоронения двуокиси углерода из угольных электростанций, но мы должны будем использовать их для высасывания углерода из атмосферы. Для таких крупных точечных источников, как электростанции, нулевой баланс выбросов углерода просто будет недостаточным.

Что означает 2°C для уровня выбросов в 2050 г.?

Как правило, объем выбросов за один год не дает достаточно информации о совокупном уровне выбросов, чтобы можно было вывести вероятность превышения. Высокий или низкий уровень выбросов в 2050 г. может быть компенсирован особенно низким или высоким уровнем выбросов в предыдущие годы. Но, учитывая, что мы обсуждаем "вероятные" реальные траектории мировых выбросов, в 2050 г. уровень выбросов фактически станет надежным показателем вероятности превышения. Учитывая принятые по умолчанию предположения о чувствительности климата (см. Приложение), получается, что сокращение уровня глобальных выбросов до 2050 года наполовину по сравнению с 1990 годом, с очень высокой вероятностью будет недостаточным для достижения целевого показателя 2°C. Риск превышения предела 2°C все еще сохраняется на уровне одной третьей.

США	-80%	-85%	-90%	-93%
ЕС27	-73%	-80%	-87%	-90%
Страны не входящие в ОЭСР	48%	10%	-26%	-45%
ОЭСР	-72%	-79%	-86%	-90%
Мир	-9%	-32%	-55%	-66%
Средний показ. на душу населения (т CO ₂ -экв./душ. нас./год)	3,04	2,26	1,52	1,13

Таблица 2. Отношение между абсолютным уровнем выбросов в 2050 г. по сравнению с 1990 г. – при предположении о равных на душу населения показателях выбросов ПГ, определенных Киотским протоколом, за искл. LULUCF (изменения в землепользовании и лесном хозяйстве) (Универсальный формат отчетности (CRF)³⁶ + Моделирование и оценка факторов способствующих изменению климата (MATCH)³⁷) в 2050 году. Цифры базируются на Среднем варианте демографического прогноза ООН 2008 г.³⁸

Как уже упоминалось, в данном анализе представлены предположения о том, как должна выглядеть "вероятная траектория". Она в основном сводится к "гладким" траекториям, с максимальным коэффициентом сокращения, составляющим шесть процентов в год в регионе с самыми высокими сокращениями выбросов, т. е. страны ОЭСР. На международной арене существуют некоторые наброски траекторий, которые предполагают постоянно растущий уровень глобальных выбросов до 2030 года, а затем исключительно высокие темпы сокращения выбросов в период между 2040 и 2050 годами. Мы восхищаемся оптимизмом, лежащим в основе этих траекторий, т.е. они считают вполне возможным достичь очень резких темпов сокращения в будущем с помощью каких-то чудо-технологий. Четвертый оценочный доклад МГЭИК также не разделяет этот оптимизм, так как пришел к выводу, что для стабилизационных категорий, предусматривающих более низкий предел, достижение максимума глобальных выбросов до 2015 г. имеет решающее значение. Однако, даже если уровень выбросов сократился бы до 2050 года в два раза, после такой резкой траектории вероятность превышения будет больше, чем лишь треть – по той простой причине, что совокупные выбросы за первую половину 21 века будут слишком высокими.

Раздел 4:

Разделение баланса «допустимых» выбросов

Вопрос о том, как нам справедливо разделить объем "допустимых" выбросов среди стран мира, находится в центре переговоров, посвященных климату. Например, некоторые развивающиеся страны указывают на существенный исторический вклад развитых стран в уровень выбросов. Не надо даже оглядываться в прошлое, текущий уровень выбросов на душу населения в промышленно развитых странах по-прежнему значительно выше, чем уровень выбросов на душу населения в развивающихся странах. В 2005 году, показатель уровня выбросов на душу населения достиг 23,5 тонн эквивалента углекислого газа в США, 10,5 тонн эквивалента углекислого газа в 27 странах ЕС, 5,4 тонн эквивалента углекислого газа в Китае, и 1,65 тонн эквивалента углекислого газа в Индии^{34,35,36}.

Для принятия любого справедливого решения во избежание худших климатических последствий, меры по сокращению выбросов, в первую очередь, должны быть взяты на себя теми, у кого самый высокий показатель выбросов на душу населения, кто имеет финансовую возможность действовать, и кто исторически внес самый большой вклад в изменение климата, с которым мы сталкиваемся сегодня. Речь идет о группе стран ОЭСР. Несомненно, однако, что без стабилизации уровня выбросов в развивающихся странах, таких как Китай, до 2020 года мы не сможем удержать глобальные выбросы в рамках остаточного допустимого баланса. Следовательно, не только внутренние меры должны быть предусмотрены во всех странах, но богатым странам необходимо также взять на себя финансовую и техническую поддержку для того, чтобы обеспечить бедным странам путь развития с нулевым уровнем углеродных выбросов.

В этой работе мы не прописываем какие-либо правила по делению оставшегося количества допустимых выбросов, имеющие отношение к обоснованному шансу удержать глобальное потепление в рамках ниже 2°C. Скорее, мы следуем консервативному подходу, в том смысле, что мы не учитываем исторические выбросы, а просто исходим из предположения одинакового уровня выбросов на душу населения в 2050 году. Справедливость такого подхода может быть, конечно, поставлена под сомнение: это, пожалуй, как спрашивать справедливо ли, чтоб те, кто к концу вечеринки уже пьяны, заявляли право на равную долю в последней бутылке с теми, кто до тех пор пил только воду (Николас Стерн, Конференция по климатическим изменениям на Бали, 2007). С другой стороны, политические реалии наводят на мысль, что будущие поколения в странах ОЭСР могут оказаться не готовы подписаться на

проведение финансовых переводов, как только их уровень выбросов на душу населения окажется ниже уровня развивающихся в настоящее время стран. В любом случае, для наглядности, вносит ясность схематическое изображение мира с равномерным распределением выбросов на душу населения в 2050 году, как показано в таблице 2.

На основании Среднего варианта демографического прогноза (ООН, 2008 г.) мы можем вычислить итоговое сокращение глобальных выбросов ПГ (в пересчете на эквивалент углекислого газа) при условии, что США и страны ЕС 27 сократят свои выбросы до 2050 года на относительные величины, напечатанные жирным шрифтом. Таким образом, первая колонка таблицы 2 гласит следующее: если США сократит свой общий (не на душу населения) уровень выбросов на 80 процентов по сравнению с 1990 годом, это означает, что уровень выбросов на душу населения будет составлять 3,04 тонн эквивалента углекислого газа в 2050 году. Чтобы достичь такой же уровень выбросов на душу населения в 2050 году, страны ЕС 27, как группа, должны сократить свой общий уровень выбросов на 73 процента. Для группы стран ОЭСР это означает сокращение выбросов должно составлять 72 процента, в то время как в странах не входящих в группу ОЭСР допускается рост уровня выбросов на 48 процентов. Но в целом это означает, что глобальные выбросы сокращаются только на 9 процентов – этого не достаточно для обоснованного шанса удержать глобальное потепление в рамках ниже 2°C. Чтобы ограничить вероятность превышения до 25 процентов, глобальные выбросы должны быть сокращены на 50 процентов или больше. Предположение равного уровня выбросов на душу населения в 2050 году означает, что США должны сократить свои выбросы примерно на 90 процентов.

Для стран ЕС 27 это означает сокращение выбросов на 87 процентов, и в этом случае даже страны не входящие в ОЭСР должны сократить свои выбросы на 26 процентов (см. колонку 3 таблицы 2). Согласно этому сценарию средний показатель выбросов ПГ, включенных в Киотский протокол, на душу населения достигает 1,52 тонн эквивалента углекислого газа в год.

Только за сценарием, при котором страны ЕС и остальные страны ОЭСР как одна группа сократят свою долю выбросов на 90 процентов по сравнению с уровнем 1990 года, будет возможность достичь равной доли выбросов на душу населения до 2050 г. и удержать глобальные выбросы на уровне существенно ниже 50 процентов.

-17% выбросов до 2020 г. для США может быть справедливым – по сравнению с уровнем 1990 г., но не 2005 г.

Законопроект Ваксмана-Маркли HR 37 это большой шаг для законодательства США в области изменения климата, который предусматривает возможность почти 17-процентного сокращения выбросов до 2020 г. по сравнению с уровнем 2005 г., включая дополнительные меры³⁸. Однако, этого недостаточно в соотношении с целевыми показателями США на 2020 г. Допустим, например, что доли выбросов ЕС и США на душу населения должны быть уравнены до 2050 г., как описано выше. Предположим также, что приемлемая траектория достижения этой цели в 2050 г. может быть просто прямой, так что соотношение между уровнем выбросов на душу населения в США и странах ЕС27 будет непрерывно сокращаться с нынешнего коэффициента 2,3 к 1 в 2050 г. Тогда, если ЕС стремится к 90-процентному сокращению выбросов до 2050 г., выбросы США до 2020 г. должны быть на 17 процентов ниже уровня 1990 г. - уже с учетом того факта, что население США неуклонно растет. См. Рис 3

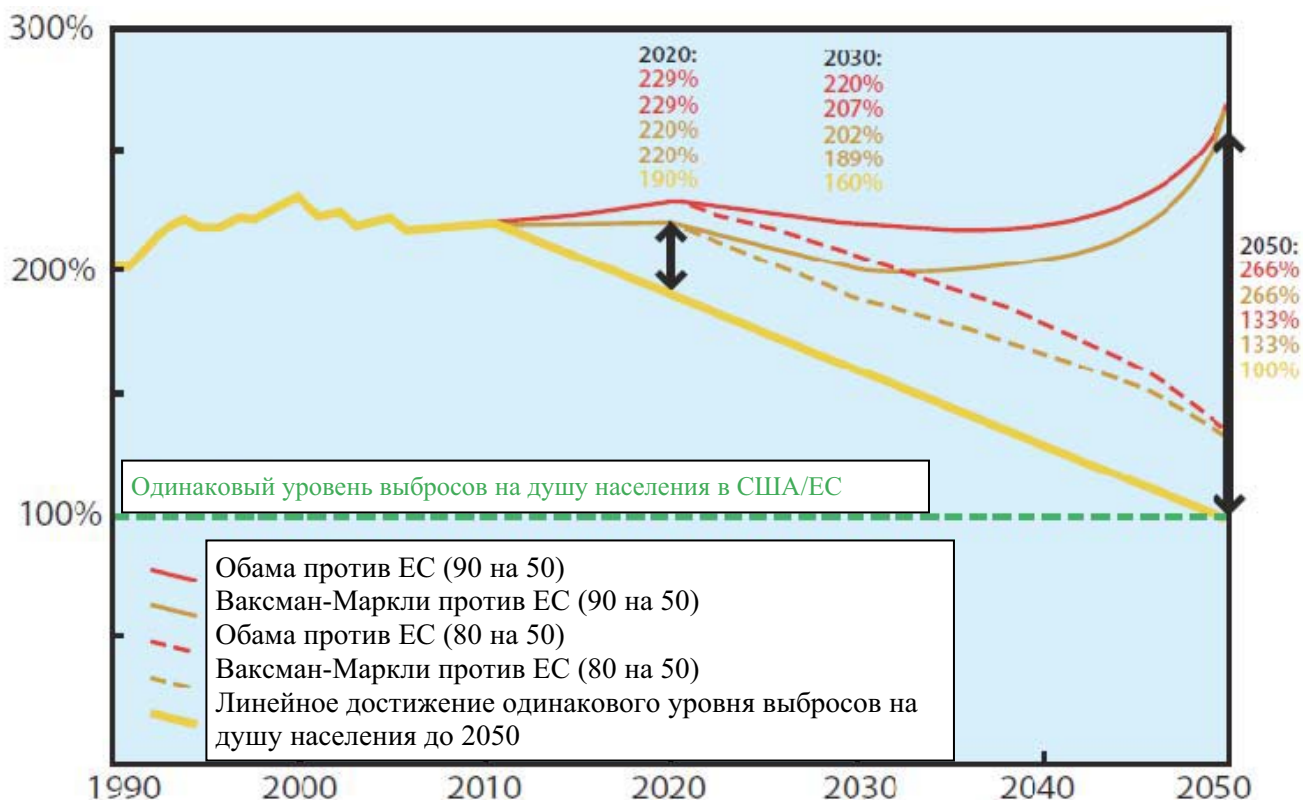


Рисунок 2. Выбросы на душу населения в США пропорционально выбросам на душу населения в ЕС, предполагая, что ЕС сократит свои выбросы ПГ на 90 процентов (сплошные линии), или 80 процентов (пунктирные линии) до 2050 года по отношению к 1990 году. Оранжевая линия: линейное сокращение в пропорциях, начиная от сегодняшнего уровня до одинаковых выбросов на душу населения в 2050 году. Коричневые линии: при условии, что сокращение выбросов США следует законопроекту Ваксмана-Маркли. Красные линии: при условии, что сокращение выбросов США следует предложению президента Обамы. (Принимая Средний вариант демографического прогноза ООН; выбросы ПГ, определенных Киотским протоколом (за искл. выбросов CO₂ вследствие LULUCF) цель ЕС27 -30% ниже уровня 1990 г.)

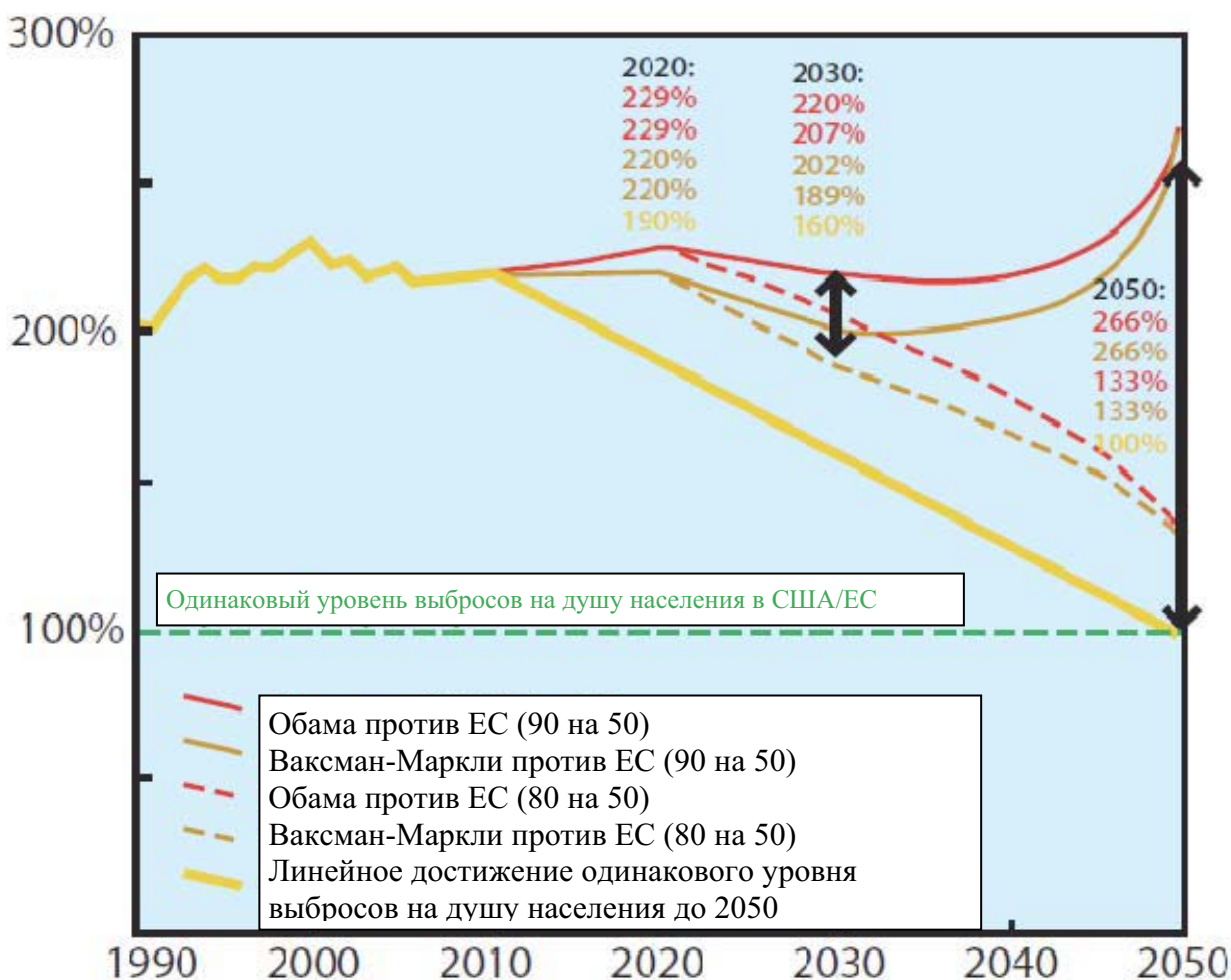


Рисунок 3. Прогнозы абсолютных выбросов ПГ в год в США и ЕС-27 при разных сценариях, рассмотренных на рисунке 2 (см. надписи). Таким образом, целевой показатель -17% до 2020 г. в США будет значительно ниже уровней, подразумеваемых в законопроекте Ваксмана/Маркли (коричневая линия), как показано черной стрелкой направленной вниз. Предполагая, что гипотетически начальный год схождения уровней выбросов на душу населения это момент заключения Киотского протокола (1997 г.), сокращения выбросов в США на -17% к 2020 году является сравнительно "мягким", как показано черной стрелкой направленной вверх. (выбросы ПГ, определенных Киотским протоколом (за искл. выбросов CO₂ вследствие LULUCF)); Универсальный формат отчетности (CRF) согласно РКИК ООН 2008; продолжен на срок после 2009 г. согласно предложению по целевым показателям.)

Раздел 5: Большой разрыв

Одними заявлениями цели по сокращению выбросов не достигнуть

Копенгагенская конференция, посвященная проблеме изменения климата, (пройдет в декабре 2009) предоставляет возможность, вероятно последнюю, направить глобальные выбросы в траекторию, которая до 2015 года примет обратное направление. В настоящее время выбросы продолжают расти, а вместе с ними риск для коралловых рифов, дельт рек и, большей мерой, для территорий, пораженных засухами и уже претерпевающих дефицит воды. С приближением крайнего срока Копенгагенской конференции, промышленно развитые страны

начали делать заявления по поводу будущих обязательств на сокращения выбросов. Некоторые развивающиеся страны также ввели в действие или только составили план политики, которая бы сократила рост их выбросов. Что же все эти обязательства, климатические инициативы и предложения означают с точки зрения достижения целевого показателя 2°C (1,5°C)? Являются ли текущие предложения достаточными для достижения этой цели? К сожалению, короткий ответ: нет.

Глядя на глобальные сокращения выбросов, необходимо учитывать целевые показатели или политику сокращения выбросов как развивающихся, так и развитых стран. Рожель и др., (2009)³⁹ подсчитали, что общее количество стран, для которых удалось вывести будущий уровень выбросов, составляет около двух третей населения мира. На эту группу приходилось 76 процентов глобальных выбросов ПГ в 2005 г. Рожель и др. (2009) собрали все эти обязательства, чтобы создать траекторию глобальных выбросов до 2100 года. В случаях, когда было невозможно указать позицию страны, предполагалось, что выбросы будут следовать сценарию традиционного ведения бизнеса до 2100 года (SRESA1B, Nakicenovic and Swart 2000⁴⁰).

Принимая все случаи, когда указывается диапазон сокращений, как наилучшие варианты («текущий лучший сценарий»), и все случаи, когда установлена цель на 2050 г., как константный уровень выбросов после 2050 г., Рожель и др. пришел к выводу, что в 2020 году глобальные выбросы увеличатся на 42 процентов по сравнению с 1990 годом. В 2050 г. общий объем выбросов, согласно прогнозам, будет на 80 процентов выше, чем в 1990 г. С учетом этого, практически нет ни единого шанса ограничить глобальное потепление до 2°C. Исходя из методологии Майнсхаусена и др. (2009) вероятность превышения достигает 100 процентов. Даже риск превышения глобального потепления на уровне 3°C до 2100 г. составляет больше, чем 50 процентов. По прогнозам, концентрация CO₂ превысит 550 частей на млн. до середины столетия. Это уровень, при котором, как ожидается, из-за окисления океана растворятся коралловые рифы (Silverman et al., 2009)⁴¹.

Заключение

Таким образом, в то время, как есть хорошая новость о принятии странами рамок глобального потепления на уровне 1,5 и 2°C, очевидно, что их объявленных целей по сокращению выбросов просто не достаточно, чтобы достичь этого уровня. Преодоление этого разрыва, то есть достижение масштабного сокращения выбросов и обеспечение достаточной финансовой поддержки для дополнительных сокращений в развивающихся странах, является ключевой задачей для Копенгагена. С данной задачей сравнимы только попытки некоторых сторон подорвать международное строение, при котором может процветать взаимное доверие наций. Международное соглашение, которое сводится к набору обязательств, где каждая нация играет только по своим собственным правилам и каждая нация проверяет свои собственные достижения, вряд ли создаст атмосферу уверенности в том, что наши соседи вносят свою справедливую долю, и в которой мы сможем остановить глобальные выбросы в ближайшее время. Это скорее будет похоже на жизнь на Диком Западе. Жарком Диком Западе.

Приложение

Методика

Наш метод расчета температур и концентраций ПГ по траекториям выбросов (Майнсхаусен и др., 2009)²⁷ основан на Байесовском методе и методе Монте-Карло, что позволяет нам рассчитать вероятность превышения целевого уровня потепления на 2°C для той или иной траектории выбросов. Для описания текущего уровня погрешностей, связанных с прогнозами,

используются вероятности. Эти погрешности объясняются неопределенностью большого количества параметров модели, используемых в расчете глобального потепления для определенной траектории выбросов. Основная идея такого подхода проста: вместо вычисления среднегодового глобального потепления для одной конкретной траектории выбросов и для одного набора входных параметров модели, эти параметры изменяются в таких диапазонах, которые в настоящее время рассматриваются как "возможные" или правдоподобные, по сравнению с результатами наблюдения. Предположения об этих диапазонах основаны на AR4 МГЭИК и более недавней литературе. Одним из наиболее важных параметров модели в прогнозировании глобального потепления является, например, чувствительность климата. Она определяется как изменение равновесного состояния среднегодовой глобальной приземной температуры в результате удвоения концентрации эквивалента углекислого газа в атмосфере. Для описанных в данной работе результатов, ее область неопределенности определяется распределением вероятностей, установленным Фреймом и др. (2006)⁴². Это распределение сходно с оценкой AR4 (при наилучшей оценке 3°C; в диапазоне от 2,0°C до 4,5°C). Таким образом, вместо одного прогноза мы получаем большое количество прогнозов. Эти прогнозы сравниваются с такими данными наблюдений как, например, временной ряд исторической температуры, и оцениваются в соответствии с их согласованием с этими ограничениями наблюдений. Таким образом, можно исключить некоторые конфигурации параметров, так как они не соответствуют данным наблюдений, и сократить суммарную погрешность прогнозов. На основании этого взвешенного набора прогнозов, наконец, можно определить одну вероятность превышения данной траектории выбросов. Она может быть выведена из части прогнозов, которые превышают предел потепления 2°C.

Благодарность

Мы благодарим Кирстена Мэси (Kirsten Masey) за очень полезные комментарии к этому манускрипту.

Список литературы

1. О истории см. также Оппенгаймер и Петсонк (Oppenheimer and Petsonk) (2006) Статья 2 РКИК ООН: историческое происхождение, современные интерпретации, дата информации: 10.1007/s10584-005-0434-8.
2. См. <http://tinyurl.com/Countries2C> at www.climateanalytics.org
3. UNFCCC:
http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/4303.php and Marland et al. (2008) Carbon Dioxide Information Analysis Center, USA.
http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html.
4. UN (2008) 'World Population Prospects: The 2008 Revision Population Database.' <http://esa.un.org/unpp>.
5. Rijsberman F. J. and R. J. Stewart (eds.). Targets and Indicators of Climate Change, Environment Institute, Stockholm (1990).
6. WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Szenario zur Ableitung globaler CO₂-Reduktionsziele und Umsetzungsstrategien, Stellungnahme zur ersten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Berlin. Sondergutachten (1995).
7. <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>
8. 1939th Council meeting, Luxembourg, 25 June 1996, and http://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/brochure_2c.pdf
9. WHO (2004) Heat-waves: risks and responses. WHO.
10. Schär C., P. L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M. A. Liniger, C. Appenzeller. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves, *Nature*, 427 (2004).
11. Hoegh-Guldberg, O. Low coral cover in a high-CO₂ world. *J. Geophys. Res.* 110, 1-11 (2005).
12. Pachauri, R.K. and A. Reisinger (eds.), Climate Change: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland (2007).
13. Sheffield, J. and E. Wood. "Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations." *Climate Dynamics*, 31(1): 79-105 (2008).
14. Seager, R., M. Ting, et al. "Model Projections of an Imminent Transition to a More Arid Climate in Southwestern North America." *Science* 316(5828): 1181-1184 (2007).
15. Emanuel, K., R. Sundararajan and J. Williams. "Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations." *Bulletin of the American Meteorological Society* 89(3): 347-367 (2008). <http://dx.doi.org/10.1175%2FBAMS-89-3-347>
16. Rohling, E. J., K. Grant, M. Bolshaw, A. P. Roberts, M. Siddall, C. Hemleben and M. Kucera. "Antarctic temperature and global sea level closely coupled over the past five glacial cycles." *Nature Geosci* 2(7): 500-504 (2009). <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo557>
17. Schellnhuber H-J. Global warming: Stop worrying, start panicking? *Proc. Nat. Academy of Science*, 105, 38, 14239-14240 (2008).
18. Metz B., O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds). Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, United Kingdom and New York, NY, USA (2007).
19. Meinshausen M., S.C.B. Raper, T.M.L. Wigley. Emulating IPCC AR4 atmospheric-ocean and carbon cycle models for projecting global-mean hemispheric and land/ocean temperatures: MAGICC6.0, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 6153-6272 (2008).
 20. Meinshausen M., N. Meinshausen, W. Hare, S. C. B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D. J. Frame, M. R. Allen. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C, *Nature*, 458, doi:10.1038/nature08017 (2009).
 21. See peaking dates 2000 to 2015 found by IPCC WG III for the lowest class of assessed stabilization pathways, Table 3.10 in reference 11.
 22. Hansen J., M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner, V. Masson-Delmotte, M. Pagani, M. Raymo, D. L. Royer, J. C. Zachos. Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, 2, 217-231 (2008).
 23. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007).
 24. Using formula $CO_{2eq} = 278 * \exp(\text{total RF}/5.35)$.
 25. Ramanathan V., G. Carmichael. Global and regional climate change due to black carbon. *Nature Geoscience* (2008).
 26. IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Intergovernmental Panel on Climate Change.
 27. Fischlin, A., G. F. Midgley, et al. (2007). Ecosystems, their properties, goods, and services. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson. Cambridge UK, Cambridge University Press: 211–272.
 28. Allen M. R., D. J. Frame, C. Huntingford, C. D. Jones, J. A. Lowe, M. Meinshausen, N. Meinshausen. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature*, 458, doi:10.1038/nature08019 (2009)
 29. Matthews H. D., N. P. Gillett, P. A. Stott, K. Zickfeld. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions, *Nature* 459, 829-832 (2009).
 30. Zickfeld, K., M. Eby, H.D. Metthews, A.J. Weaver, 2009. Setting cumulative emission targets to reduce the risk of dangerous climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* (submitted).
 31. Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 32. Clarke, A.W., J.A. Trinnaman (eds.). 2007 survey of energy resources, World Energy Council (2007)
 33. Rempe, H., S. Schmidt, U. Schwarz-Schampera. Reserves, resources and availability of energy resources 2006, German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (2007)
 34. www.unfccc.int

35. Höhne, N., H. Blum, J. Fuglestvedt, R.B. Skeie, A. Kurosawa, G. Hu, J. Lowe, L.K. Gohar, B. Matthews, A.C. Nioac de Salles, C. Ellermann. Contributions of individual countries' emissions to climate change and their uncertainty, *Climatic Change* (submitted).
36. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, *World Population Prospects: The 2008 Revision*, <http://esa.un.org/unpp>
37. American Clean energy and security act of 2009, HR 2454, 111th Congress, 1st session; bill passed by the House of Representatives June 26, 2009.
38. WRI (World Resources Institute) summary of H.R. 2454, the American Clean energy and security Act, J. Larson, A. Kelly and R. Heilmayr, July 2009.
39. Rogelj J., B. Hare, J. Nabel, K. Macey, M. Schaeffer, K. Markmann, M. Meinshausen. Halfway to Copenhagen, no way to 2°C. *Nature Reports Climate Change*, published online, doi:10.1038/climate.2009.57 (2009).
40. Nakicenovic, N., Swart, R. *IPCC Special Report on Emissions Scenarios* Cambridge Univ. Press (2000).
41. Silverman J., B. Lazar, L. Cao, K. Caldeira, J. Erez. Coral reefs may start dissolving when atmospheric CO2 doubles, *Geophysical Research Letters*, 36, L05606, doi:10.1029/2008GL036282 (2009)
42. Frame, D. J., D. A. Stone, P.A. Stott, M. R. Allen. Alternatives to stabilization scenarios. *Geophys. Res. Lett.* 33, L14707, doi: 10.1029/2006GL025801 (2006).