

СПЕКОТНИЙ ПОЛУДЕНЬ ДЛЯ 2°C

ДОПОВІДЬ
СПЕКОТНИЙ ПОЛУДЕНЬ ДЛЯ 2°C
жовтень 2009 року

Автори
д-р Катя Фрілер,
д-р Мальте Майнсхаузен
д-р Біл Хеєр

опубліковано за фінансової підтримки
шведської неурядової організації
Air Pollution & Climate Secretariat
а/с 7005

402 31 Гьотеборг, Швеція

Тел.: +46 31 711 45 15

info@airclim.org www.airclim.org

Опубліковано в Україні за ініціативою
Національного екологічного центру України
www.necu.org.ua, www.climategroup.org.ua

Автори

Д-р Катя Фрілер (Dr. Katja Frieler) (katja.frieler@pik-potsdam.de) – математик, отримала ступінь кандидата наук за спеціальністю «Фізика атмосфери» у Потсдамському університеті. Поки була докторантом, працювала в Інституті морських і полярних досліджень ім. Альфреда Вегенера (AWI, Потсдам) над проблемою хімічного моделювання втрат озону в полярній стратосфері. Є членом дослідницької групи PRIMAP (“Potsdam Real-Time Integrated Model for probabilistic Assessment of emission Path”) при Потсдамському інституті вивчення наслідків зміни клімату (PIK). В даний час працює над статистичними методами прогнозування очікуваних регіональних змін клімату.

Д-р Мальте Майнсхаузен отримав ступінь кандидата наук за спеціальністю «Кліматологія і кліматична політика» і диплом за спеціальністю «Наука про навколишнє середовище» в Швейцарському Федеральному інституті технологій, Швейцарія. В 2000 році отримав ступінь магістра за спеціальністю «Зміна навколишнього середовища і управління її станом» в Оксфордському університеті, Великобританія. До того як приєднатися до Потсдамського інституту вивчення наслідків зміни клімату у вересні 2006 року, займав посаду професора в Національному Центрі атмосферних досліджень, м. Боулдер, штат Колорадо. Співавтор багатьох розділів четвертої оцінювальної доповіді Міжурядової групи експертів із зміни клімату (МГЕЗК, AR4). В даний час – керівник дослідницької групи PRIMAP при Потсдамському інституті вивчення наслідків зміни клімату.

Почесний доктор наук Біл Хеєр (bill.hare@climateanalytics.org) – фізик і вчений-еколог з більш ніж двадцятирічним досвідом роботи у сфері наукових фізичних обґрунтувань кліматичних змін, наслідків зміни клімату і заходів у відповідь на проблеми зміни клімату та виснаження озонового шару в стратосфері. Пан Хеєр є одним з провідних авторів одної з частин четвертої оцінювальної доповіді (AR4) МГЕЗК «Зміна клімату 2007: Попередження змін клімату» і тематичним керівником з довгострокових питань та Статті РКЗК ООН у звідному звіті про виконання проекту за AR4 МГЕЗК. В 2008 році Університет Мердока присудив йому ступінь

Почесного доктора наук за внесок у рішення проблем, пов'язаних із зміною клімату. Один з найдосвідченіших спеціалістів в області міжнародної політики із зміни клімату, який приймає участь і організовує переговори починаючи з 1990 року. Надає консультації для багатьох глав делегацій і політичних лідерів з питань кліматології та стратегій кліматичної політики. В даний час – співкерівник дослідницької групи PRIMAP і директор НУО «Climate Analytics» (www.climateanalytics.org).

Вступ:

Зростаючий альянс

У далекому в 1992 році країни світу досягли домовленості “запобігти небезпечному антропогенному втручанню в кліматичну систему” (ст. 2 Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату¹). Проте до недавнього часу більшість країн не могли зійтися в поглядах, що саме означала ця домовленість. За минулий рік, кількість країн, які досягли згоди щодо конкретної мети, а саме обмежити глобальне потепління в рамках 2°C або 1,5°C, суттєво збільшилася: тепер вона складає 133 країни². У червні 2009 р. навіть США погодилися на встановлену країнами «Великої вісімки» межу глобального потепління на рівні 2°C. В цілому станом на 2005 рік, на частку всієї групи країн, що закликають не допустити потепління атмосфери більш ніж на 2°C або навіть менше, припадає близько 75 відсотків глобальної енергетики і обсягу техногенних викидів CO₂³ і близько 80 відсотків населення світу⁴.

Гарні новини для переговорного процесу ООН зі зміни клімату?

Це гарна новина, тому що цю межу потепління можна безпосередньо перевести в обсяг викидів, які ми ще можемо собі дозволити, аби не переступити цей поріг. Таким чином, визначено розмір загального «пирога» дозволених викидів, хоча питання, як цей «пиріг» поділити між країнами і протягом якого терміну, зараз є предметом переговорів. Але на цьому гарні новини закінчуються.

Закликаючи утримати потепління в рамках 2°C, країни як і раніше претендують на завеликий шматок «пирога» для себе. Іншими словами, зобов'язання, представлені на обговорення на міжнародних переговорах зі зміни клімату, на даний момент, не ведуть нас туди, куди нам слід прямувати, а саме, звести викиди вуглецю майже до нуля вже до кінця цього століття.

Мета цього інформаційного бюлетеня - роз'яснити, звідки взявся цільовий показник в 2°C (Розділ 1), і пролити світло на наші шанси утримати потепління нижче цього рівня. Ми почнемо з короткого огляду обговорення на тему: чи приречені ми на перевищення межі потепління на 2°C (Розділ 2). Потім ми розглянемо, що означає цей рівень для загального розміру «пирога» викидів (об'єму прийнятних викидів для всіх країн) (Розділ 3), перш ніж перейти до питання про те, як би ми могли розділити «пиріг» (Розділ 4). Нарешті, ми поглянемо на нинішній стан міжнародних переговорів ООН, тобто, до чого зводяться поточні зобов'язання країн по зменшенню викидів (Розділ 5).

Розділ 1:

Загальна інформація про норму 2°C

Звідки взялася межа 2°C

Виходячи з наявних наукових фізичних основ серйозних регіональних наслідків зміни клімату, в кінці 1980-х рр. Консультативна група, сформована Всесвітньою метеорологічною організацією, Міжнародною Радою наукових союзів і Програмою ООН з довкілля, рекомендувала встановити зростання середньої глобальної приповерхневої температури на рівні 2°C відносно доіндустріального рівня. Цей показник рекомендувалось встановити як «верхню

межу, за рамками якої очікується різке підвищення ризику серйозної шкоди екосистемам і нелінійної реакції»⁵. Після того, німецька Консультативна рада з глобальної зміни клімату⁶ рекомендувала прийняти цільовий показник межі потепління на рівні 2°C, виходячи з того, що глобальне потепління необхідно утримувати в рамках, відомих з останніх теплих періодів (міжльодовикових). У 1996 році після розгляду другої оціночної доповіді МГЕЗК (SAR)⁷, основна увага в якій приділялась серйозним наслідкам, яких слід очікувати у випадку потепління більше ніж на 2°C, Європейський Союз вперше встановив цільовий показник межі в 2°C⁸.

Межа в 2°C – науково обґрунтована мета?

Чи є межа в 2°C науково обґрунтованою чи необґрунтованою метою? Ні те, ані інше. Це мета політична, заснована на наукових відомостях, подібно до обмеження швидкості для автомобілів. Будь-яка така мета є суб'єктивною оцінкою осіб, що визначають політику, і, слід сподіватися, ґрунтується на науковій інформації щодо можливих наслідків, у випадку якщо ми не обмежимо глобальне потепління до рівня, нижче 2°C. Із зростанням наукового розуміння, за оцінкою четвертої оціночної доповіді МГЕЗК (AR4), важко прийти до іншого висновку, крім того, що для запобігання “небезпечному антропогенному втручанням в кліматичну систему” необхідно утримати середньорічне глобальне потепління в рамках не вище 2°C, а чим нижче, тим краще.

З одного боку, дехто цілком обґрунтовано заявляє, що нинішні наслідки зміни клімату вже небезпечні (наприклад, кількість жертв аномальної спеки в Європі в 2003 році^{9,10}). Хоча ми поки що зіткнулися з відносно м'яким глобальним потеплінням на 0,8°C, ми вже стали свідками безпрецедентного масового знебарвлення коралів, спричиненого незвичайно високою температурою морської води¹¹, безпрецедентних періодів надзвичайної спеки і посилення найінтенсивніших і руйнівних тропічних циклонів, пов'язаних з підвищенням температури поверхні моря¹².

Враховуючи інформацію доповіді AR4 МГЕЗК і даних, які були з того часу прогнозовані і отримані в результаті спостережень, очевидно, що система оцінки, яка б орієнтувалась на цільовий показник межі потепління на рівні вище, ніж 2°C, межувала б з абсурдом. Безумовно, було б оціночним судженням не відносити до «небезпечних» такі наслідки, як повне зникнення коралових рифів, ще сильніші засухи в зоні Середземномор'я¹³, різкий перехід до напівзасушливого стану на південному Заході США¹⁴, можливо, інтенсивніші циклони¹⁵ або майже достовірний багатометровий підйом рівня моря в довгостроковій перспективі¹⁶. Проте, більшість людей з таким, швидше за все, не погодяться.

2°C не є безпечним рівнем

Звичайно, 2°C це не "безпечний рівень". Ось чому група 80 найуразливіших країн, що розвиваються, закликають встановити межу глобального потепління на рівні нижче 1,5°C замість 2°C. До цієї групи входять Альянс малих острівних держав (АМОД) і Група Найменш Розвинених Країн (НРК), які є найуразливішими до зміни клімату. Згідно з прогнозами, глобальне потепління на 2°C заподіє неприйнятної шкоди цим країнам. Довгострокове підвищення рівня моря, ймовірно, покладе кінець історії багатьох низинних островів навіть при потеплінні на 2°C.

При такому рівні потепління, якщо не раніше, літній морський лід Арктики може зникнути, а разом з ним і унікальна екосистема залежних від льодового покриву видів, таких як полярні ведмеді. Не можна також виключати можливість того, що в наступні століття прискорене танення льодовикового покриву Гренландії і розкладання крижаного покриву Західної Антарктики буде спричинене потеплінням менше, ніж на 2°C, що викличе затоплення

густонаселених дельт річок і низовинних прибережних регіонів по всій планеті. Обмеження глобального потепління до рівня нижче 2°C, безумовно, допоможе уникнути гірших наслідків. Таким чином, 2°C часто вважається порогом, за яким ми наштовхнемося на некеровані ризики.

Розділ 2:

Чи можливо уникнути потепління на 2°C?

Концентрація ПГ (парникових газів) в атмосфері вже близько 450 часток на млн. еквіваленту вуглекислого газу; як же уникнути потепління на 2°C?

Атмосфера насичена парниковими газами вже в достатній мірі, щоб привести до ймовірного потепління на 2°C при дотриманні двох умов: по-перше, концентрація парникових газів зупиниться на сьогоднішньому рівні, а по-друге, всі холодагенти, тобто аерозолі, будуть ліквідовані.

Тоді виникає питання, чи готові ми обмежити потепління на рівні 2°C? Ні, і в наступних абзацах ми пояснимо чому.

Загальний обсяг всього нагріваючого і охолоджуючого впливу на клімат в результаті людського впливу визначає середньорічну глобальну температуру. Цифра 450 частин на млн. еквіваленту вуглекислого газу враховує лише тепловий вплив парникових газів CO₂, CH₄, N₂O, і різних видів фторвуглеводнів, у тому числі ГФВ, але не враховує охолоджувальну дію аерозолів. Дія аерозолів полягає в тому, щоб знизити рівень комбінованого впливу на зміну клімату, викликаного усіма ПГ, до рівня дії одного лише CO₂, що складає близько 385 частин на млн. еквіваленту вуглекислого газу.

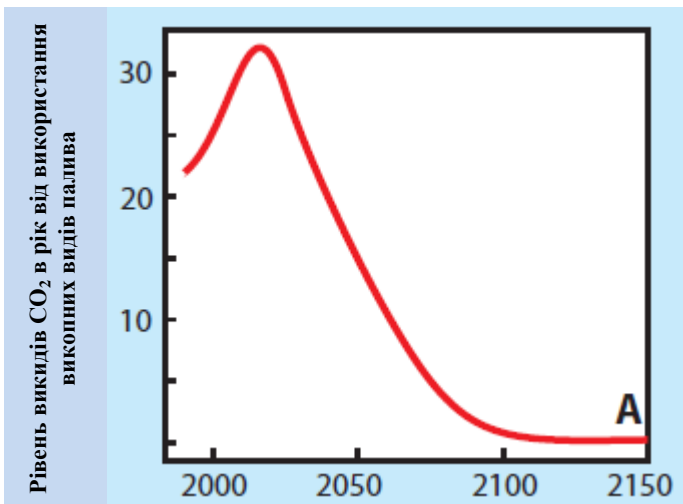


Рис.1 А: Рівень викидів CO₂ від використання викопних видів палива за сценарієм наслідків попередження змін клімату, що передбачає до 2050 р. скорочення рівня викидів ПГ, включених у Кіотський протокол, на половину відносно рівня 2000 р. (Schellnhuber, 2008)¹⁷

Якби нам довелося скоротити всі викиди відразу, то концентрація впала б ще. У випадку з CO₂, істотна його кількість як і раніше перерозподілятиметься між світовим океаном і біосферою. Що стосується інших газів, гранична тривалість перебування в атмосфері приведе до того, що їх концентрація повільно знижуватиметься назад до природного рівня.

Таким чином, готовність, ймовірно, краще за все визначається сценарієм викидів, який приводить до максимально можливих темпів скорочення викидів і є економічно і технічно обґрунтованим, не заподіюючи, наприклад, серйозних збоїв у енергопостачанні. Отриманий таким чином рівень концентрації спочатку виросте вище сьогоднішнього рівня, а потім, в довгостроковій перспективі, знову впаде нижче цього рівня. Іншими словами, ми не

зобов'язані зупинитися на поточному або вищому рівні концентрації парникових газів. Вибір за нами.

Навіть якщо в довгостроковій перспективі прибрати аерозольний щит, що створює ефект охолодження (оскільки це доцільно з багатьох причин, головна з яких якість повітря), в результаті, потепління не повинне перевищувати 2°C¹⁷. Всі сценарії, що передбачають нижчу межу, проаналізовані в четвертій оціночній доповіді МГЕЗК, наприклад, значно зменшують

рівень викидів аерозолів до середини століття, та все ж за цими сценаріями можна обмежити максимальний рівень потепління нижче, ніж 2°C (Таблиця 3.10 в четвертій доповіді МГЕЗК, РГ III¹⁸). На рисунку 1 А також проілюстровано рівень концентрації ПГ і середньорічне глобальне потепління за сценарієм, який передбачає значне видалення забруднюючих речовин, що охолоджують повітря, паралельно із заміною викопних видів палива і технологічних інновацій. Дотримуючись верхнього діапазону цільового показника скорочення викидів, схваленого країнами Великої вісімки, за цим сценарієм рівень глобальних викидів парникових газів, включених в Кіотський протокол, скорочується в два рази до 2050 року, як зазначено і в роботі Шельнхубера (Schellnhuber, 2008)¹⁷. Практично, межа в 450 частин на млн. еквіваленту CO₂ з великою певністю буде перевищена (навіть враховуючи дію аерозолів), тоді як вірогідність перевищення цільового показника в 2°C становить один з трьох або трохи вище.

І нарешті, ми, правду кажучи, приречені на перевищення показника 450 частин на млн. еквіваленту CO₂ (навіть враховуючи речовини, що мають охолоджувальну дію) впродовж декількох десятиліть. Лише якщо глобальні викиди почнуть скорочуватися негайно приблизно на 7 відсотків в рік, тоді і сумарний вплив зупиниться на рівні, нижче ніж 450 частин на млн. еквіваленту CO₂. Як показано на рисунку 1, таке перевищення концентрацій не обов'язково приведе до перевищення межі підвищення температури в 2°C. Це явище аналогічно тому, як виставляється реле температури на кухонній духовці на 220°C, в нашому випадку концентрація парникових газів виконує роль реле температури. Якщо духовку досить швидко вимкнути, фактична температура в духовці ніколи не досягне 220°C.

Таким чином, немає жодних причин для самозаспокоєння. Щоб забезпечити безпечне майбутнє клімату в довгостроковій перспективі, ми повинні направити концентрацію еквіваленту вуглекислого газу в атмосфері у зворотний бік. Першою і найважливішою вимогою для припинення будь-якого подальшого зростання концентрації є зниження викидів. Необхідно якнайскоріше досягти піку для того, щоб вийти на шлях зниження, принаймні, починаючи з 2015 року і надалі²¹. Лише якщо рівень глобальних викидів згодом скоротиться досить швидко, ми зможемо зупинити подальше зростання середньорічної глобальної температури. Щоб зупинити зростання рівня моря, просто немає іншого шляху, окрім як позбутися CO₂ з атмосфери. Лише ці "негативні" викиди потім дозволять нам в довгостроковій перспективі повернутися до рівня концентрації CO₂ нижче 350 частин на млн. CO₂, як пропонується в роботі Хансена та ін. (2008)²², що забезпечить хоч якийсь шанс, принаймні, обмежити зростання рівня моря.

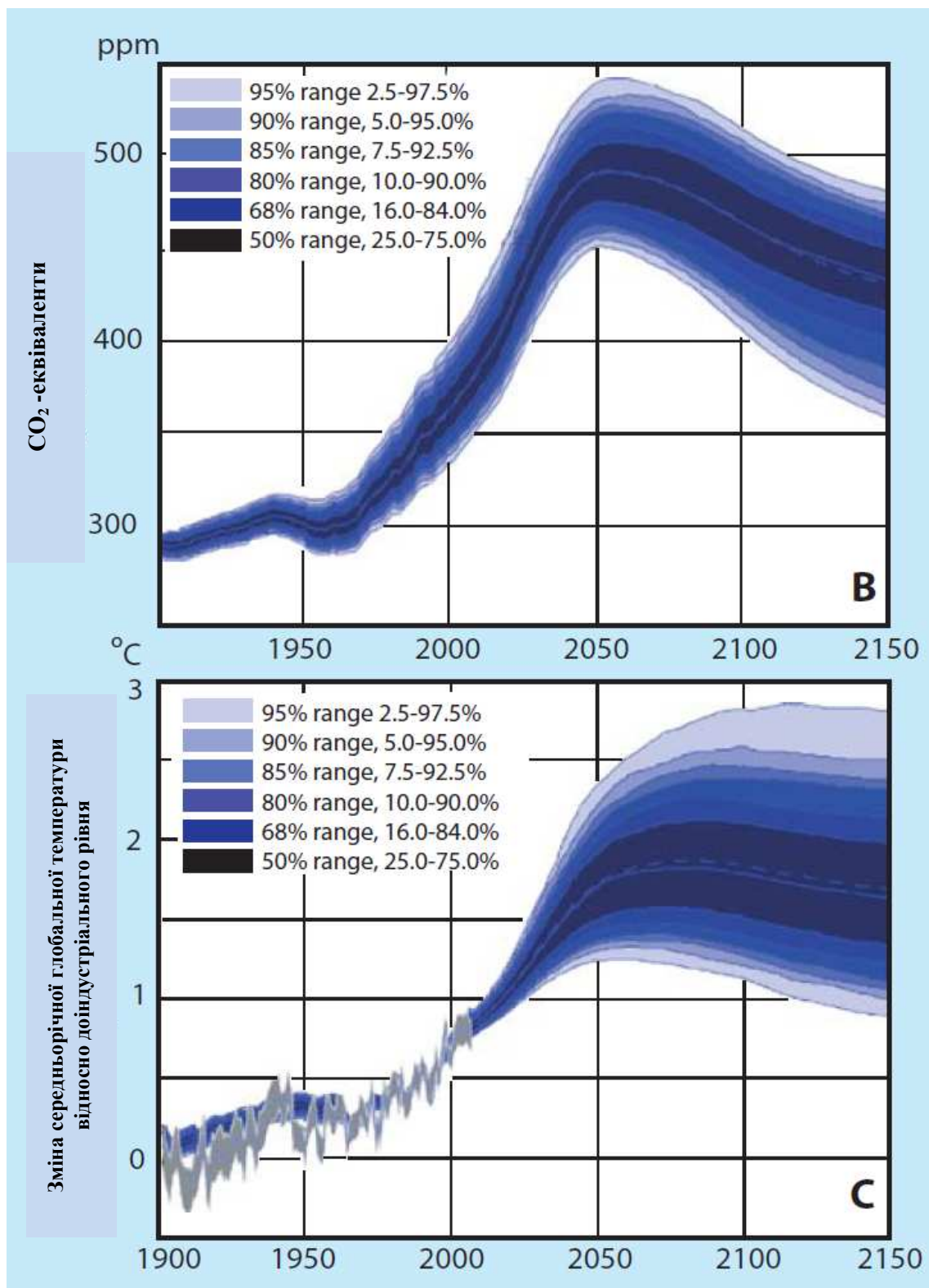


Рис. 1В: Підсумковий рівень концентрації ПГ + вплив аерозолів переведені в концентрацію еквіваленту CO₂. Розрахунки базуються на спрощеній моделі вуглекислого циклу MAGICC6.0¹⁹. Область невизначеності обчислена за допомогою статистичних методів, запропонованих Майнсхаузенем та ін. (2009)²⁰ (див. також Додаток).

Рис. 1С: Підсумкова зміна середньорічної глобальної температури відносно доіндустріального рівня.

Чи має сенс приділяти велику увагу нестійким сполукам, що сприяють потеплінню атмосфери?

Існує один додатковий дуже важливий аспект, що стосується аерозолів: хоча в цілому вважається, що вони мають ефект охолодження ($-1,4$ Вт/м² згідно з Раманатаном і Крамайклом (2008)²⁵ і $-1,2$ Вт/м² згідно з доповіддю AR4 МГЕЗК РГ I²³), одним з їхніх компонентів є технічний вуглець (ТВ), що має яскраво виражений ефект нагрівання ($+0,20$ ($0,05$, $0,35$) Вт/м² виключно з ТВ викопних видів палива (AR4 МГЕЗК РГ I²³); $+0,9$ ($0,65$, $1,15$) Вт/м² згідно з Раманатаном і Крамайклом (2008), включаючи й інші джерела такі як спалювання біомаси). Таким чином, скорочення викидів технічного вуглецю допоможе послабити глобальне потепління. Викиди технічного вуглецю виникають головним чином унаслідок приготування їжі з використанням біопалива, згорання викопних видів палива (особливо дизельного палива і вугілля), і спалювання біомаси, пов'язаного з лісовинищуванням і спалюванням пожнивних залишків. Тому скорочення викидів технічного вуглецю не лише принесло б величезну користь в плані підвищення якості повітря (у приміщенні). У зв'язку з тим, що технічний вуглець на снігу може зменшити альbedo снігу і територій, покритих льодами, скорочення рівня викидів технічного вугілля може бути особливо корисним для льодовиків в Гімалаях і арктичних екосистем.

Проте жодне таке скорочення не повинне здійснюватися за рахунок зменшення уваги до головного винуватця з довгостроковими наслідками - CO₂. Якщо використання короткоживучих сполук, таких як технічний вуглець і метан, а також ГФВ, скорочуватиметься в обмін на вищий рівень викидів газів з великою тривалістю перебування в атмосфері, тим самим клімату буде надана ведмежа послуга. Це пояснюється тим, що в довгостроковій перспективі, коли зміна клімату буде значно драматичнішою, ніж сьогодні, значення матимуть лише викиди з довгим періодом життя, здійснювані сьогодні.

Це не означає, що немає необхідності скорочувати викиди технічного вуглецю. Навпаки, зменшення забруднення повітря, продовження життя гімалайським льодовикам, які забезпечують постачання водою, а також уповільнення поточного потепління в Арктиці, є достатніми підставами для оперативних дій вже зараз. Проте вирішення проблеми короткоживучих діючих речовин не може замінити вирішення проблеми скорочення викидів CO₂. Важливо також пригадати, що перехід до енергетичної системи з дуже низьким рівнем викидів CO₂ швидко понизить рівень викидів технічного вуглецю, проте якщо діяти в протилежному напрямі, такого взаємозв'язку не буде або він буде незначним. Іншими словами, активне просування у вирішенні проблеми з викидами CO₂ означатиме, що паралельно вирішувати проблеми з технічним вуглецем буде легше.

Розділ 3:

Розмір «пирога» – який рівень викидів є прийнятним?

Для унікальних експериментів в запасі знайдеться багато сюрпризів

Перетворити мету 2°C або 1,5°C в посібник з досягнення цільових показників скорочення глобальних викидів протягом найближчих десятиліть є одним із найважливіших і термінових завдань на сьогодні. Нам доведеться відповісти на питання, яку верхню межу викидів необхідно встановити, щоб утримати рівень середньорічного глобального потепління нижче вищезгаданих

цільових показників. Саме це число потім дозволить провести оцінку цільових показників. Але, на жаль, визначення цього числа – завдання не з простих: хоча безперечним є факт, що викиди парникових газів, спричинені діяльністю людини, можуть викликати і викликали глобальне потепління²⁶, передбачити точний показник потепління, навіть для певної траєкторії викидів неможливо. Він (показник) залежить від багатьох чинників, таких як: кількість CO₂, поглиненого або виділеного біосферою суші і океанами; сила радіаційної дії, пов'язаної з концентрацією CO₂ і інших парникових газів, що залишаються в атмосфері; охолоджувальна дія аерозолів і частка потепління поглинена океанами. Проте останнім часом спостерігається значний прогрес у встановленні кількості цих невизначеностей.

Вплив	Радіаційний вплив за 2005 р. (Вт/м ²)	Покращена оцінка концентрації еквіваленту CO ₂ (частин на млн.), якщо усі нижче приведені елементи включені 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 -екв. (CO ₂ + CH ₄)
N ₂ O	0,16 (0,14; 0,18)	427 CO ₂ -екв.
Галоїдні вуглеводні	0,34 (0,31; 0,37)	455 CO ₂ -екв.
Тропосферний озон	0,35 (0,25; 0,65)	486 CO ₂ -екв.
Стратосферний озон	-0,05 (-0,15; 0,05)	482 CO ₂ -екв.
Використання земель	-0,20 (-0,40; 0,00)	464 CO ₂ -екв.
Технічний вуглець на снігу	0,10 (-0,00; 0,20)	473 CO ₂ -екв.
Безпосередній вплив аерозолів	-0,50 (0,90; -0,10)	431 CO ₂ -екв.
Непрямої вплив аерозолів	-0,70 (-1,81; -0,30)	378 CO ₂ -екв.

Таблиця 1. Поточна антропогенна дія на атмосферу. У лівій колонці перераховані речовини, які мають радіаційний вплив, пов'язані з діяльністю людини, основним серед яких є CO₂; їх радіаційна дія (міра, до якої ці речовини сприяють потеплінню) зазначена в середній колонці (узято з таблиці 2.12 доповіді AR4 МГЕЗК, РГ I²³); в правій колонці вказана відповідна покращена оцінка концентрації еквіваленту вуглекислого газу.

Як і з будь-яким унікальним експериментом, а ми в даний час проводимо великий експеримент з кліматом Землі, в запасі обов'язково знайдеться кілька сюрпризів. В історії людства клімат ще ніколи не доводився до такого рівня потепління, до якого прямуємо ми. Ми не можемо бути упевнені, що ще більші механізми з позитивним зворотнім зв'язком, такі, як викид метану з морського дна при нагріванні моря, не стануть в майбутньому основним джерелом потепління, яке нас переслідуватиме. Ми не можемо бути певні в тому, якою саме буде реакція вуглецевого циклу в різних екосистемах Землі. Але є також і речі, про які ми можемо говорити впевнено. Ми напевно знаємо, що клімат нагріватиметься, і очевидно, що при потеплінні на 2°C під загрозою опиняться більше наземних, прісноводних і морських видів, ніж у будь-який інший час недавнього геологічного минулого²⁷

Метод управління ризиками – кількісне визначення допустимих викидів

Враховуючи ці чинники невизначеності, політику зміни клімату необхідно розглядати як метод управління ризиками. Як і в багатьох інших сферах політики, ми не лише повинні встановити мету, але також вирішити наскільки упевненими ми хочемо бути в досягненні цієї мети. Звідси виникає запитання: «Який рівень викидів є прийнятним, якщо ми хочемо зберегти глобальне потепління на рівні нижче 1,5°C або 2°C з вірогідністю X %?» Для кожної траєкторії викидів існуватиме певний ризик перевищення заданої цільової температури через погрешності

в прогнозах – не беручи навіть до уваги потенційно сильні зворотні зв'язки, згадані вище. Будь-яке ухвалення рішення про можливі траєкторії викидів пов'язане з великою невизначеністю, як і більшість політичних рішень. Але витрачено багато зусиль на те, щоб кількісно визначити і скоротити невизначеності, пов'язані з цим конкретним питанням.

Нещодавно було здійснено чотири дослідження (Meinshausen et al., 2009²¹ і Allen et al., 2009²⁸, Matthews et al. 2009²⁹ і Zickfeld et al. 2009³⁰), в яких проведено комплексний підхід до кількісної оцінки поточних факторів невизначеності, пов'язаних з питанням того, який рівень глобальних викидів є прийнятним. У цьому інформаційному бюлетені ми концентруємо увагу на методології, яка включає усі парникові гази (Meinshausen et al., 2009).

За будь-якою конкретною траєкторією викидів, для оцінки вірогідності перевищення рівня середньорічного глобального потепління на 2°C в XXI столітті була використана спрощена кліматична модель вуглецевого циклу. Таким чином, було проведено велику кількість модельних експериментів на підставі різних наборів вхідних параметрів моделі, що змінюються в межах їх області невизначеності. Детальніше про методологію розповідається в Додатку.

Розрахунок цієї вірогідності перевищення для великої кількості схем скорочення викидів говорить нам про те, що:

1. Як правило, вірогідність перевищення залежить від кумулятивного рівня викидів, тобто від рівня викидів підсумованого протягом довгого часу, а не за конкретною схемою скорочення викидів.
2. Якщо ми приймаємо вірогідність перевищення на рівні 25 відсотків, кумулятивний рівень викидів CO₂ унаслідок використання викопних видів палива і зміни характеру землекористування має бути обмежений до 1000 млн. тонн CO₂. Навіть якщо ми бажаємо прийняти вірогідність перевищення потепління на 2°C на рівні 50 відсотків, межа досягається при 1440 млн. тонн CO₂.

Ми не можемо дозволити собі спалювати сьогоднішні резерви.

Але що ж означають цифри 1000 млн. тонн CO₂ і 1440 млн. тонн CO₂, відповідно? Чи є надія, що запаси викопного палива будуть вичерпані ще до того, як будуть досягнуті ці межі? Відповідь – ні. Спалювання відомих запасів нафти, газу і вугілля, які видобуваються для комерційної експлуатації, набагато перевищує «допустимий рівень викидів», який повинен утримати глобальне потепління в рамках нижче 2°C: відомий рівень викидів CO₂ з 2000 р. і до сьогодні (2009 р.) в цілому вже складає більш ніж 300 млн. тонн CO₂. Таким чином, у нас залишилося лише менше 700 млн. тонн CO₂ прийнятної обсягу викидів, якщо ми хочемо зберегти "вірогідність" (75 відсотків або шанси 3 до одного) утримати глобальне потепління в рамках нижче 2°C. Враховуючи, що кількість запасів викопного палива, які видобуваються для комерційної експлуатації, складає близько 2 800 млн. тонн CO₂^{32,33}, це менше ніж чверть. На підставі сьогоднішньої інтенсивності викидів, що становить 36,3 млн. тонн CO₂/ рік, баланс в 1000 млн. тонн CO₂ буде вичерпаний до 2027 року. Крім того, майже на увазі, що загальна оцінка ресурсів, включаючи нетрадиційні джерела, ймовірно, у багато разів більша, ніж кількість резервів, які видобуваються в економічних цілях.

Але застосування технології CCS (уловлювання і зберігання вуглецю) дозволить нам спалити всі види викопного палива!?

Коротка відповідь – ні, і ось чому: технологія уловлювання і зберігання вуглецю (CCS) є важливою технологією; її варто підтримувати і дуже важливо зробити її доступною в комерційних масштабах, забезпечивши обґрунтовані рішення для врегулювання таких проблем, як довговічність, витоки, транспортування і так далі. І так, якщо спалювання викопних видів

палива на електростанціях, що працюють на вугіллі, поєднати з технологією CCS, то така електростанція буде з нульовим балансом викидів вуглецю.

Так чому ж тоді CCS не є рятівною шлюпкою для вугільної промисловості? Для того, щоб досягти безпечного кліматичного рівня в довгостроковій перспективі, наприклад, повернутися до рівня концентрації CO₂ 350 частин на млн., ми будемо вимушені до кінця століття скоротити всі викиди по суті до нуля. Цілком імовірно, що викиди CO₂ повинні будуть дійти до рівня, близького до нуля, вже починаючи з другої половини століття. Більш того, щоб запобігти подальшому підвищенню рівня моря або поточному окисненню океану, ми повинні позбавитися від негативних викидів CO₂. Ці негативні викиди, наприклад, можливі при поєднанні електростанцій, що працюють на біомасі і технології CCS. Таким чином, ми просто не можемо дозволити собі витратити наявні підземні місця для поховання двоокису вуглецю з вугільних електростанцій, але ми повинні будемо використовувати їх для висмокування вуглецю з атмосфери. Для таких великих точкових джерел, як електростанції, нульовий баланс викидів вуглецю просто буде недостатнім.

Що означає 2°C для рівня викидів в 2050 р.?

Як правило, обсяг викидів за один рік дає недостатньо інформації про сукупний рівень викидів, щоб можна було вивести вірогідність перевищення. Високий або низький рівень викидів в 2050 р. може бути компенсований особливо низьким або високим рівнем викидів в попередні роки. Але, враховуючи, що ми обговорюємо "вірогідні" реальні траєкторії світових викидів, в 2050 р. рівень викидів фактично стане надійним показником вірогідності перевищення. Враховуючи, прийняті, за замовчуванням, припущення про чутливість клімату (див. Додаток), виходить, що скорочення рівня глобальних викидів до 2050 року вповоловину в порівнянні з 1990 роком, з дуже високою вірогідністю буде недостатнім для досягнення цільового показника 2°C. Ризик перевищення межі 2°C все ще зберігається на рівні однієї третьої.

США	-80%	-85%	-90%	-93%
ЄС27	-73%	-80%	-87%	-90%
Країни, які не входять до ОЕСР	48%	10%	-26%	-45%
ОЕСР	-72%	-79%	-86%	-90%
Світ	-9%	-32%	-55%	-66%
Середній показ. на душу населення (т CO ₂ -екв./душ. нас./рік)	3,04	2,26	1,52	1,13

Таблиця 2. Відношення між абсолютним рівнем викидів в 2050 р. в порівнянні з 1990 р. – при припущенні про рівні на душу населення показники викидів ПГ, встановлених Кіотським протоколом за викл. LULUCF (зміни в землекористуванні і лісовому господарстві) (Універсальний формат звітності (CRF) 36 + Моделювання і оцінка чинників сприяючих зміні клімату (MATCH)³⁷) в 2050 році. Цифри базуються на Середньому варіанті демографічного прогнозу ООН 2008 р.³⁸

Як уже згадувалося, в цьому аналізі представлені припущення про те, як повинна виглядати "вірогідна траєкторія". Вона в основному зводиться до "гладких" траєкторій з максимальним коефіцієнтом скорочення, який становить шість відсотків в рік в регіоні з найвищими скороченнями викидів, тобто країни ОЕСР. На міжнародній арені існують деякі припущення щодо траєкторій, які передбачають постійно зростаючий рівень глобальних викидів до 2030 року, а потім виключно високі темпи скорочення викидів в період між 2040 і 2050 роками. Ми захоплюємося оптимізмом, що лежить в основі цих траєкторій. Тобто вони вважають за можливе досягти дуже різких темпів скорочення в майбутньому за допомогою

якихось диво-технологій. Четверта оцінювальна доповідь МГЕЗК також не розділяє цей оптимізм, оскільки приходиться до висновку, що для стабілізаційних категорій, що передбачають нижчу межу, досягнення максимуму глобальних викидів до 2015 р. має вирішальне значення. Проте, навіть якщо рівень викидів скоротився б до 2050 року в два рази, після такої різкої траєкторії вірогідність перевищення буде більша, ніж лише третина – тій через те, що сукупні викиди за першу половину XXI століття будуть дуже високими.

Розділ 4:

Розподіл об'єму «прийнятних» викидів

Питання про те, як нам справедливо розподілити баланс "прийнятних" викидів серед країн світу, знаходиться в центрі переговорів, присвячених клімату. Наприклад, деякі країни, що розвиваються, вказують на істотний історичний внесок розвинутих країн в рівень викидів. Не треба навіть озиратися в минуле, поточний рівень викидів на душу населення в промислово розвинених країнах як і раніше значно вищий, ніж рівень викидів на душу населення в країнах, що розвиваються. У 2005 році, показник рівня викидів на душу населення досяг 23,5 тонн еквіваленту вуглекислого газу в США, 10,5 тонн еквіваленту вуглекислого газу в 27 станах ЄС, 5,4 тонн еквіваленту вуглекислого газу в Китаї, і 1,65 тонн еквіваленту вуглекислого газу в Індії^{34,35,36}

Для ухвалення будь-якого справедливого рішення, щоб уникнути гірших наслідків зміни клімату, заходи по скороченню викидів мають бути, в першу чергу, узяті на себе тими, у кого показник викидів на душу населення найвищий, хто має фінансову можливість діяти, і чий вклад в історичний рівень викидів найвищий, іншими словами тими, хто найбільше сприяв зміні клімату, з якою ми стикаємося сьогодні. Йдеться про групу країн ОЕСР. Поза сумнівом, проте, що без стабілізації рівня викидів в країнах, що розвиваються, таких як Китай, до 2020 року ми не зможемо утримати глобальні викиди в рамках залишкового прийняттого об'єму. Отже, не лише внутрішні заходи мають бути передбачені у всіх країнах, але також багатим країнам необхідно узяти на себе фінансову і технічну підтримку для того, щоб забезпечити бідним країнам шлях розвитку з нульовим рівнем викидів вуглецю.

У цій роботі ми не прописуємо жодні правила для розподілу кількості прийнятних викидів, що залишилися, які мають відношення до обґрунтованого шансу утримати глобальне потепління в рамках нижче 2°C. Швидше, ми підтримуємо консервативний підхід, в тому сенсі, що ми не враховуємо історичні викиди, а просто виходимо з припущення однакового рівня викидів на душу населення в 2050 році. Справедливість такого підходу може бути, звичайно, поставлена під сумнів; це, мабуть, як запитувати чи справедливо, щоб ті, хто до кінця вечірки вже п'яний, заявляли своє право на рівну частину в останній пляшці з тими, хто доти пив лише воду (Ніколас Стерн, Конференція з кліматичних змін на Балі, 2007). З іншого боку, політичні реалії наводять на думку, що майбутні покоління в країнах ОЕСР можуть виявитися не готові підписатися на здійснення фінансових переказів, як тільки їхній рівень викидів на душу населення виявиться нижчим за рівень країн, що розвиваються в даний час. У будь-якому випадку, для наочності, вносить ясність схематичне зображення світу з рівномірним розподілом викидів на душу населення в 2050 році, як показано в таблиці 2.

На підставі Середнього варіанту демографічного прогнозу (ООН, 2008 р.) ми можемо обчислити підсумкове скорочення глобальних викидів ПГ (у перерахунку на еквівалент вуглекислого газу) за умови, що США і країни ЄС 27 скоротять свої викиди до 2050 року на відносні величини, надруковані жирним шрифтом. Таким чином, перша колонка таблиці 2 свідчить про наступне: якщо США скоротить свій загальний (не на душу населення) рівень викидів на 80 відсотків в порівнянні з 1990 роком, це означає, що рівень викидів на душу населення становитиме 3,04 тонн еквіваленту вуглекислого газу. Щоб досягти такого ж рівня

викидів на душу населення в 2050 році, країни ЄС 27, як група, повинні скоротити свій загальний рівень викидів на 73 відсотки. Для групи країн ОЕСР це означає, що скорочення викидів повинно становити 72 відсотки, тоді як в країнах, що не входять до групи ОЕСР допускається зростання рівня викидів на 48 відсотків. Але в цілому це означає, що глобальні викиди скорочуються лише на 9 відсотків – цього недостатньо для обґрунтованого шансу утримати глобальне потепління в межах нижче 2°C. Щоб обмежити вірогідність перевищення до 25 відсотків, глобальні викиди мають бути скорочені на 50 відсотків або більше. Припущення рівного рівня викидів на душу населення в 2050 році означає, що США повинні скоротити свої викиди приблизно на 90 відсотків.

Для країн ЄС 27 це означає скорочення викидів на 87 відсотків, і в цьому випадку навіть країни, що не входять в ОЕСР повинні скоротити свої викиди на 26 відсотків (див. колонку 3 таблиці 2). Згідно з цим сценарієм середній показник викидів ПГ, передбачених Кіотським протоколом, на душу населення досягає 1,52 тонн еквіваленту вуглекислого газу в рік.

Лише за сценарієм, при якому країни ЄС і решта країн ОЕСР як одна група скоротять свою частку викидів на 90 відсотків в порівнянні з рівнем 1990 року, буде можливість досягти рівної частки викидів на душу населення до 2050 р. і утримати глобальні викиди на рівні істотно нижчому, ніж 50 відсотків.

-17% викидів до 2020 р. для США може бути справедливим – у порівнянні з рівнем 1990 р., але не 2005 р.

Законопроект Ваксмана-Марклі HR 37 це великий крок для законодавства США в області зміни клімату, який передбачає можливість майже 17-процентного скорочення викидів до 2020 р. в порівнянні з рівнем 2005 р., включаючи додаткові заходи³⁸. Проте, цього недостатньо у співвідношенні з цільовими показниками США на 2020 р. Допустимо, наприклад, що долі викидів ЄС і США на душу населення мають бути зрівняні до 2050 р., як описано вище. Припустимо також, що прийнятна траєкторія досягнення цієї мети 2050 р. може бути просто прямою, так що співвідношення між рівнем викидів на душу населення в США і країнах ЄС27 буде безперервно скорочуватись з нинішнього коефіцієнта 2,3 до 1 в 2050 р. Тоді, якщо ЄС прагне до 90-процентного скорочення до 2050 р., викиди США до 2020 р. мали б бути на 17 відсотків нижчими за рівень 1990 р. -- вже з врахуванням того факту, що населення США неухильно зростає. Див. рис 3

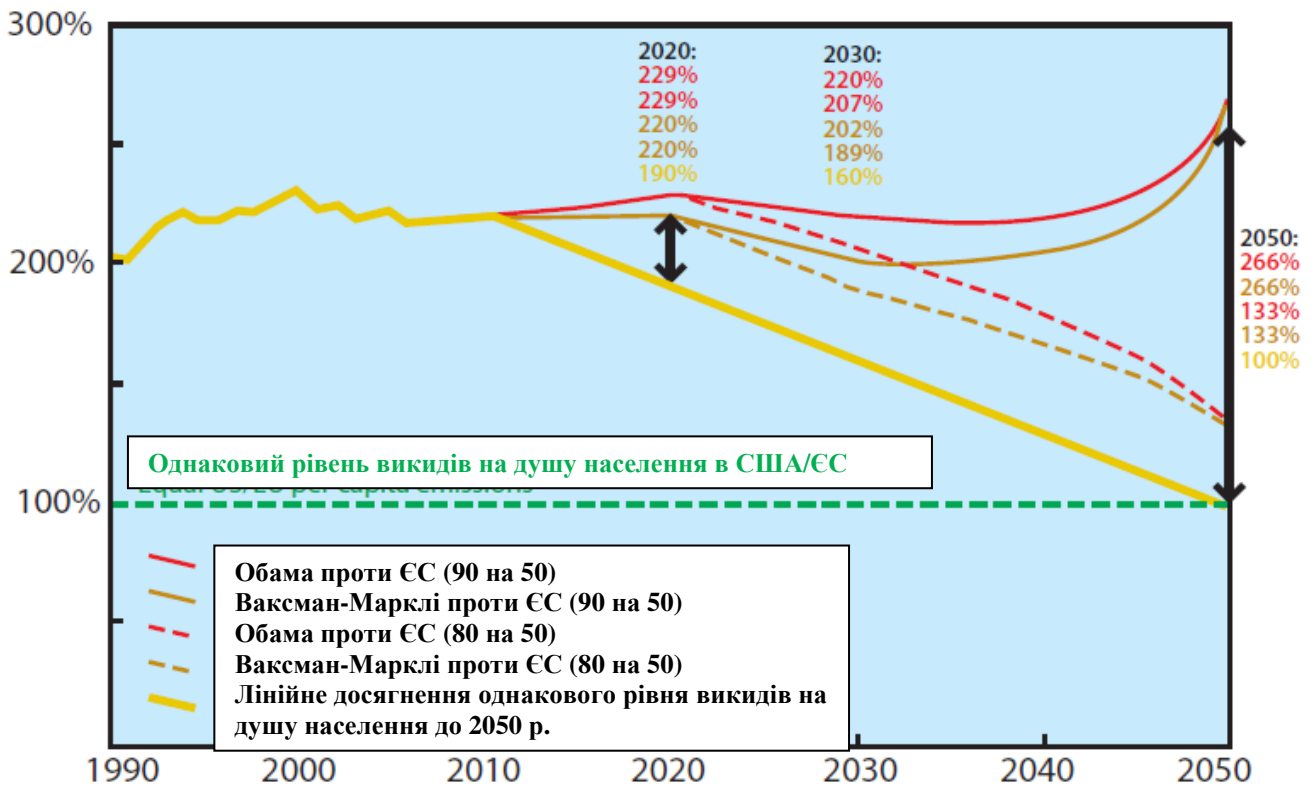


Рисунок 2. Викиди на душу населення в США пропорційно викидам на душу населення в ЄС, передбачаючи, що ЄС скоротить свої викиди ПГ на 90 відсотків (суцільні лінії), або 80 відсотків (пунктирні лінії) до 2050 року по відношенню до 1990 року. Оранжева лінія: лінійне скорочення в пропорціях, починаючи від сьогоднішнього рівня до однакових викидів на душу населення в 2050 році. Коричневі лінії: за умови, що скорочення викидів США слідує законопроекту Ваксмана-Марклі. Червоні лінії: за умови, що скорочення викидів США слідує пропозиції президента Обама. (Приймаючи Середній варіант демографічного прогнозу ООН; викиди ПГ, передбачених Кіотським протоколом (за викл. викидів CO₂ внаслідок LULUCF) мета ЕС27 - 30% нижче рівня 1990 р.)

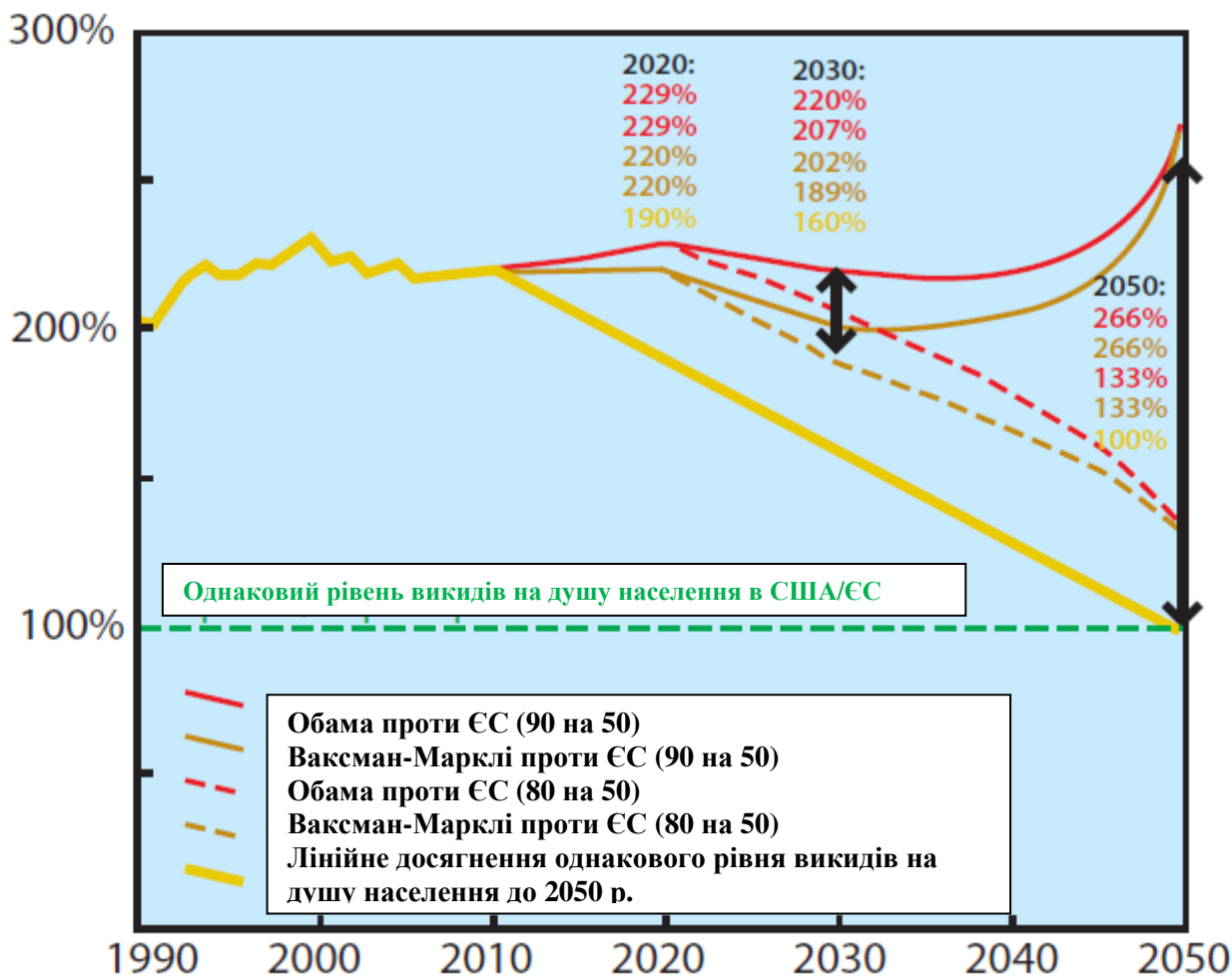


Рисунок 3. Прогнози абсолютних викидів ПГ в рік в США і ЄС-27 при різних сценаріях, розглянутих на малюнку 2 (див. написи). Таким чином, цільовий показник -17% до 2020 р. в США буде значно нижчий за рівні, що мають на увазі в законопроекті Ваксмана/Марклі (коричнева лінія), як показано чорною стрілкою, направленою вниз. Передбачаючи, що гіпотетично початковий рік сходження рівнів викидів на душу населення це момент укладення Кіотського протоколу (1997 р.), скорочення викидів в США на -17% до 2020 року є порівняно "м'яким", як показано чорною стрілкою, направленою вгору. (викиди ПГ, передбачених Кіотським протоколом (за викл. викидів CO₂ внаслідок LULUCF)); Універсальний формат звітності (CRF) згідно РКЗК ООН 2008; продовжений на термін після 2009 р. згідно з пропозицією цільових показників.)

Розділ 5: Великий розрив

Одними лише заявами мети скорочення викидів не досягти

Переговори ООН зі зміни клімату це можливість, ймовірно остання скерувати глобальні викиди в траєкторію, яка до 2015 року прийме зворотний напрям. В даний час викиди продовжують зростати, а разом з ними ризик для коралових рифів, дельт річок і, більшою мірою, для територій, які уражені засухами і вже зазнають дефіциту води. В кінці 2009 року із наближенням крайнього терміну Копенгагенської конференції, промислово розвинені країни

почали робити заяви з приводу майбутніх зобов'язань щодо скорочень викидів. Деякі країни, що розвиваються, також ввели в дію або лише склали план політики, яка б скоротила зростання їх викидів. Що ж всі ці зобов'язання, кліматичні ініціативи та пропозиції означають з точки зору досягнення цільового показника потепління 2°C (1,5°C)? Чи є поточні пропозиції достатніми для досягнення цієї мети? На жаль, коротка відповідь: ні.

Дивлячись на глобальні скорочення викидів, необхідно враховувати цільові показники або політику скорочення викидів як країн, що розвиваються, так і розвинених країн. Рожель і ін., (2009)³⁹ підрахували, що загальна кількість країн, для яких удалося вивести майбутній рівень викидів, складає близько двох третіх населення світу. На цю групу припадало 76 відсотків глобальних викидів ПГ в 2005 р. Рожель і ін. (2009) зібрали всі ці зобов'язання, щоб створити траєкторію глобальних викидів до 2100 року. У випадках, коли було неможливо вказати позицію країни, передбачалося, що викиди слідуватимуть сценарію традиційного ведення бізнесу до 2100 року (SRESA1B, Nakicenovic and Swart 2000⁴⁰).

Приймаючи всі випадки, коли вказується діапазон скорочень, як найкращі варіанти («поточний кращий сценарій»), і всі випадки, коли встановлена мета на 2050 р., як константний рівень викидів після 2050 р., Рожель і ін. прийшов до висновку, що в 2020 році глобальні викиди збільшаться на 42 відсотки в порівнянні з 1990 роком. У 2050 р. загальний обсяг викидів, згідно з прогнозами, буде на 80 відсотків вище, ніж в 1990 р. З врахуванням цього, практично немає ні єдиного шансу обмежити глобальне потепління до 2°C. Виходячи з методології Майснхаусена та ін. (2009) вірогідність перевищення досягає 100 відсотків. Навіть ризик перевищення глобального потепління на рівні 3°C до 2100 р. складає більше, ніж 50 відсотків. За прогнозами, концентрація CO₂ перевищить 550 частин на млн. до середини століття. Це рівень, при якому, як очікується, із-за окислення океану розчиняться коралові рифи (Silverman et al., 2009)⁴¹.

Висновок

Таким чином, в той час, як є гарна новина в тому, що країни приймають рамки глобального потепління на рівні 1,5 і 2°C, проте їхнього поточного прагнення просто не достатньо, щоб досягти цього рівня. Подолання цього розриву, тобто досягнення даних цілей крупного скорочення викидів, і забезпечення достатньої фінансової підтримки для додаткових скорочень в країнах, що розвиваються, є ключовим завданням для майбутніх переговорів ООН зі зміни клімату. З даним завданням можна порівняти лише спроби деяких сторін підірвати міжнародну будову, при якій може процвітати взаємна довіра націй. Міжнародна угода, яка зводиться до набору зобов'язань, де кожна нація грає лише за своїми власними правилами і кожна нація перевіряє свої власні досягнення, навряд чи створить атмосферу упевненості в тому, що наші сусіди вносять свою справедливую частку, і в якій ми зможемо зупинити глобальні викиди найближчим часом. Це швидше буде схоже на життя на Дикому Заході. Спекотному Дикому Заході

Додаток

Методика

Наш метод розрахунку температур і концентрацій ПГ за траєкторіями викидів (Майнсхаусен та ін., 2009)²⁷ базується на Баєсовському методі і методі Монте-Карло, що дозволяє нам розрахувати вірогідність перевищення цільового рівня потепління на 2°C для тієї або іншої траєкторії викидів. Для опису поточного рівня погрішностей, пов'язаних з прогнозами, використовується вірогідність. Ці погрішності пояснюються невизначеністю великої кількості параметрів моделі, що використовуються в розрахунку глобального потепління для певної траєкторії викидів. Основна ідея такого підходу проста: замість обчислення середньорічного глобального потепління для однієї конкретної траєкторії викидів і для одного набору вхідних параметрів моделі, ці параметри змінюються в таких діапазонах, які в даний час розглядаються як "можливі" або правдоподібні, в порівнянні з результатами спостереження. Припущення про ці діапазони базуються на AR4 МГЕЗК і більш недавній літературі. Одним з найбільш важливих параметрів моделі в прогнозуванні глобального потепління є, наприклад, чутливість клімату. Вона визначається як зміна рівноважного стану середньорічної глобальної приземної температури в результаті подвоєння концентрації еквіваленту вуглекислого газу в атмосфері. Для описаних в даній роботі результатів, її область невизначеності визначається розподілом вірогідності, отриманим в роботі Фрейма та ін. (2006) 42. Цей розподіл схожий на оцінку AR4 (при найкращій оцінці 3°C; у діапазоні від 2,0°C до 4,5°C). Таким чином, замість одного прогнозу ми отримуємо велику кількість прогнозів. Ці прогнози порівнюються з такими даними спостережень як, наприклад, часовий ряд історичної температури, і оцінюються відповідно до їх узгодження з цими обмеженнями спостережень. Таким чином, можна виключити деякі конфігурації параметрів, оскільки вони не відповідають даним спостережень, і скоротити сумарну погрішність прогнозів. На підставі цього зваженого набору прогнозів, нарешті, можна визначити одну вірогідність перевищення даної траєкторії викидів. Вона може бути виведена з частини прогнозів, які перевищують межу потепління 2°C.

Подяка

Висловлюємо вдячність Кірстену Месі (Kirsten Macey) за надзвичайно корисні коментарі до цього манускрипту.

Список літератури

1. Про історію див. також Оппенгаймер і Петсонк (Oppenheimer and Peterson) (2006) Стаття 2 РКЗК ООН: історичне походження, сучасні інтерпретації, дата інформації: 10.1007/s10584-005-0434-8.
2. Див. <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. Lowe⁵, 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. Matthews, 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. Trnnaman (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. Fuglestedt, 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).