

**Ядерна енергія: міф і реальність**  
№ 6, листопад 2006р. Українська версія

## **Ядерна енергія та зміна клімату**

Фелікс Маттес

### **Зміст**

- 1 Передмова
- 2 Вступ
- 3 Проблема зміни клімату
- 4 “Бізнес як завжди”
- 5 Комплексні структури ризику
- 6 Шляхи пом'якшення проблеми
- 7 Ключові стратегії: вивчення німецького прикладу
- 8 Висновки
- 9 Список літератури

### Про автора:

Доктор наук Фелікс Маттес має дипломи з електротехніки та політології. Пропрацювавши багато років на виробництві, в 1991 році він перейшов на роботу до берлінського філіалу Інституту прикладної екології (Öko-Institut) у м. Фрайбург. Він опублікував ряд досліджень з національної та міжнародної енергетичної і кліматичної політики і надає консультативні послуги в області стратегії на національному та європейському рівнях. З 2000 по 2002 рік він був науковим представником комісії "Стала енергія в рамках глобалізації та лібералізації" німецького федерального парламенту.

Тематичне дослідження, No. 6

Ядерна енергія та зміна клімату

Фелікс Маттес

© Фондація Генріха Бьолля 2005

Всі права застережені

Цей документ не обов'язково відображає погляди Фондації Генріха Бьолля.

## **Передмова**

Зміна клімату – це, безумовно, один з найсерйозніших викликів, які кидає нам XXI сторіччя. Хоча Кіотський протокол, який нещодавно вступив у силу, та ефективна Європейська система торгівлі відходами є добрим сигналом, відповідь людства на цей виклик поки що далека від досягнення мети.

Значні проблеми потребують значних узгоджених дій. Однак чи означає це, що вони потребують також величезних, дорогих та ризикованих технологій, які було створено ще півстоліття тому? Інакше кажучи, чи потребує вирішення проблеми клімату повернення до ядерної енергії?

Як переконливо демонструє в своєму дослідженні Фелікс Маттес, існує цілий спектр інших шляхів боротьби проти зміни клімату, пов'язаних з набагато меншим ризиком. Вкладання ж коштів у ядерну енергію тягне за собою не тільки значний ризик у сфері здоров'я, фінансів та безпеки, але й може завести в економічний глухий кут. Через двадцять років після Чорнобильської ядерної катастрофи будь-які намагання ядерної промисловості святкувати своє відродження та змальовувати себе в якості вирішення проблеми клімату мають бути відкинуті. Політики всього світу повинні прислухатись до думки населення, яке в більшості своїй протестує проти використання ядерної енергії.

Ми твердо переконані, що ядерна енергія не вирішує проблем зміни клімату. Короткочасний ренесанс ядерної технології вимагатиме значної кількості урядових коштів, які можна було б із більшою користю вкласти у розвиток технологій відновлюваної енергетики та ефективного енерговикористання.

Тому ми представляємо 6-й випуск бюлетеня “Тематичні дослідження з ядерної енергетики” (“Nuclear Issues Paper”) у якості нашого внеску в громадські дебати про адекватну відповідь на проблему зміни клімату і питання про майбутнє ядерної енергетики.

Йорг Хаас  
Фонд Генріха Бьолля

## **1 Вступ**

Глобальне потепління складає одну з найбільших проблем XXI сторіччя. Широкий спектр досліджень та моделювань у цій сфері переконливо доводить: для того, щоб обмежити глобальне потепління до прийнятної величини, потрібні масштабні зменшення викидів в атмосферу.

Створення цільової кліматичної політики важливе передусім для енергетичного сектору. Викиди вуглекислого газу від згоряння викопних видів палива складає велику частину глобальних викидів парникових газів. Якщо в цьому сторіччі будуть потрібні значні зниження викидів CO<sub>2</sub>, енергетичний сектор, а понад усім - виробники електроенергії, мають піддатись фундаментальній зміні.

Серед технологій, які можуть сприяти зниженню викидів, основну роль відіграють атомні електростанції. Використання ядерної енергії супроводжувалось запеклими дебатами ще з самого моменту її впровадження на ринок енергоносіїв. З цією технологією пов'язаний цілий ряд факторів ризику, від аварій до військового чи терористичного використання ядерних матеріалів, які є продуктами ядерного технологічного ланцюга. Виробництво електроенергії на

АЕС зазнало застою після Чорнобиля та інших аварій. Більше того, після лібералізації ринків електроенергії в більшості країн Організації економічного співробітництва і розвитку (ОЕСР) багато ядерних підприємств опинились перед серйозними проблемами, а нові інвестиції в атомну енергетику виявились не вигідними для інвесторів. Однак, в ході все більш активної полеміки про зміну клімату атомна енергетика регулярно повертається до порядку денного, особливо після того, як Європейський Союз ввів у дію схему торгівлі відходами, а отже за викиди CO<sub>2</sub> тепер доводиться платити. Тому ядерну енергію все частіше подають як ключову технологію в портфелі варіантів зниження викидів.

Кліматична політика, яка покликана боротися проти ризиків глобального потеплення, а також специфічних ризиків, пов'язаних з атомною енергією, являє собою складну область конфліктів. Дебати ускладнюються проблемою порівняння різних моделей ризиків та питанням існування альтернативи. Ризик для здоров'я людей та екосистем, а також соціальних та економічних структур, має бути порівняний з наявністю та вартістю потенційних альтернатив. На фоні цих складнощів розмір майбутнього зниження викидів має відігравати значну роль, як і потенційний внесок до зниження викидів. Якщо були б потрібні лише помірні скорочення викидів, або був наявний величезний потенціал привабливих альтернатив, доля атомної енергії була б набагато менш важливою, ніж ми спостерігаємо сьогодні.

В цій роботі ми намагаємося систематизувати полеміку про кліматичну політику і ядерну енергію, а також зробити висновки з огляду ряду статей і дискусій. В 2-му розділі ми наведемо короткий перегляд того, яка могла б бути необхідна величина майбутнього зниження викидів, та визначимо основу для дискусії про ядерну енергію в рамках цільової кліматичної політики. В 3-му розділі ми опишемо прогноз розвитку подій за принципом “бізнес як завжди”, що стосується викидів CO<sub>2</sub> та розвитку атомної енергетики протягом найближчих десятиліть. Цей прогноз використовується як базисна модель в подальшому вивченні шляхів зниження викидів. На тлі великої різноманітності моделей ризику глобального потепління й атомної енергії, ми спираємось на ілюстративну модель для систематичного аналізу та оцінки різних типів ризику в розділі 4. В 5-му розділі ми опишемо та оцінимо різні варіанти зниження викидів у довгостроковій перспективі.

Після аналізу в глобальних масштабах, в розділі 6 ми проілюструємо свою думку на прикладі експериментальної моделі зниження викидів CO<sub>2</sub> на 80% у такій високоіндустріалізованій країні, як Німеччина. Після цього ми детально розглянемо висновки, які можна зробити з цієї справи і аналізу, виконаного в попередньому розділі. Розділ 7 присвячений головним висновкам, до яких приводить представлений в цій роботі аналіз.

Враховуючи довгострокову природу проблеми глобального потепління, різні варіанти мають вивчатись протягом довгого часу. У своєму аналізі ми обмежились періодом до 2050 року, тому що оцінка технології та інших факторів стає все більш умоглядною, чим довший період часу, про який йдеться. Тому ми обмежили горизонт прогнозування аналізу та дискусії 50 роками від нинішнього часу. Більш того, аналіз, представлений у цій роботі, було виконано в глобальному контексті. Для багатьох питань, порушених в різних розділах цієї роботи, потрібна більш детальна дискусія про конкретні регіони, яка дозволила б краще зрозуміти поточні події та дебати, що дуже різняться у різних країнах та регіонах світу.

## **2 Проблема зміни клімату**

Глобальна зміна клімату є, очевидно, найбільшим викликом для енергетичної і екологічної політики на наступні кілька десятиліть. Маса наукових доказів існування факту та наслідків

глобального потепління, викликаного антропогенними викидами, продовжує зростати. Це веде до необхідності пошуку нових підходів до енергетичної політики. Якщо викиди парникових газів зростатимуть, а їх концентрація в атмосфері подвоїться чи зросте, виникнуть ще більш значні втручання в кліматичну систему всієї планети. Викиди вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) внаслідок згоряння палива відіграють значну роль у зміні клімату. Спалення викопних видів палива несе відповідальність за близько 80% всіх викидів CO<sub>2</sub> у світі. І хоча концентрація кількох інших газів також значно зросла за останнє століття, деякі з них мають дуже довгий час життя в атмосфері, і є ще деякі невизначені фактори, але індустріальні викиди вуглекислого газу становлять більше половини зростаючого впливу, що спричиняє антропогенне глобальне потепління (таблиця 1).

**Таблиця 1 Сучасні концентрації парникових газів**

	Концентрація до 1750р.	Сучасна концентрація в тропосфері	Потенціал глобального потепління (ПГП) (прогноз на 100 років)	Атмосферне життя	Підвищений радіаційний вплив
				Років	Вт/м <sup>2</sup>
<b>Концентрація (часток на мільйон)</b>					
Двоокис вуглецю (CO <sub>2</sub> )	280	375	1	змінна величина	1.46
<b>Концентрація (часток на мільярд)</b>					
Метан (CH <sub>4</sub> )	730 / 688	1 852 / 1 730	23	124	0.48
Окис азоту (N <sub>2</sub> O)	270	319	296	1 144	0.15
Тропосферний озон (O <sub>3</sub> )	25	344	немає даних	годин-днів	0.35
<b>Концентрація (часток на трильйон)</b>					
CFC-11 (трихлорфторметан) (CCl <sub>3</sub> F)	нуль	256 / 253	4 600	45	0.34 для всіх галоїдних вуглеводнів разом, включно багатьох таких, що тут не вказані.
(CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	нуль	546 / 542	10 600	100	
CFC-113 (трихлорфторетан) (C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub> )	нуль	80/80	6 000	85	
Чотирьоххлористий вуглець (CCl <sub>4</sub> )	нуль	94/92	1 800	35	
Метил хлороформ (CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	нуль	28 / 28	140	4.8	
HCFC-22 (хлордифторметан) (CHClF <sub>2</sub> )	нуль	15,811	1 700	11.9	
HFC-23 (фтороформ) (CHF <sub>3</sub> )	нуль	1,412	12 000	260	
Перфторетан (C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )	нуль	312	11 900	10 000	
Гексафторид сірки (SF <sub>6</sub> )	нуль	5.2111	22 200	3 200	0.0025
Трифторметил пентафторид сірки (SF <sub>5</sub> CF <sub>3</sub> )	нуль	0.1213	~ 18 000	~ 3 200	< 0.0001

Джерело інформації: Blasing/Jon (2005)

Наразі точиться дискусія про те, як стабілізувати концентрацію парникових газів в атмосфері “на такому рівні, який не допускав би небезпечного антропогенного впливу на кліматичну систему” (Стаття 2 Рамкової конвенції ООН про зміну клімату). Обмеження зростання середньосвітової температури на 2градуси Цельсія в порівнянні з доіндустріальними рівнями все більше розглядається як поріг величини глобального потепління, після якого наслідки та

ризика для природи і людського суспільства стають неприйнятними.<sup>1</sup> З урахуванням того факту, що середня глобальна температура вже зросла на 0,6°C з XIX століття, прийнятним вважається подальше потепління лише на 1,4°C. До того ж, середнє довгострокове потепління не повинне перевищити максимуму в 0,2°C за десять років.<sup>2</sup>

Переведення цих цілей в концентрації та траєкторії викидів підлягає іншим невизначеностям (як, наприклад, чутливість клімату) і є предметом всесторонньої наукової полеміки.

Наступні параметри є визначальними для ототожнення заходів, які допоможуть утримати глобальне потепління в межах прийнятних “кліматичних вікон”:

- траєкторії викидів за деякий період часу для різних парникових газів, а також для інших газів, що впливають на радіаційний фон (наприклад, викиди сірки, тому що аерозолі SO<sub>2</sub> мають “охолоджувальний ефект”), де темп зростання, час піку і наступний темп зниження є особливо важливими;
- концентрація або профілі радіаційного впливу для різних газів як результат траєкторії викидів;
- чутливість клімату, використана в останній час для моделювання, коливається від 1,5 до 4,5 градусів Цельсія для подвоєних концентрацій CO<sub>2</sub>, де 2,5 градусів Цельсія є середнім значенням; якщо чутливість клімату виявиться ближчою до вищого рівня, для досягнення мети у 2 градуси Цельсія знадобляться набагато більш значні зниження викидів. Якщо чутливість клімату виявиться в нижньому діапазоні, це означатиме менше обмежень на майбутні викиди (однак багато моделей засновані на значеннях чутливості клімату від 2,5 до 2,8 градусів).

Існує широкий спектр способів моделювання для визначення прийнятних траєкторій викидів у межах нижче 2 градусів глобального потепління. Особливо важливу роль для дискусії мають альтернативні стратегії зниження викидів для різних газів або альтернативний розрахунок часу.<sup>3</sup>

Nare/Meinshausen (2004) зазначає, що

- за умов стабілізації концентрації всіх парникових газів на рівні еквівалента 550 часток на мільйон CO<sub>2</sub> (що приблизно відповідає стабілізації CO<sub>2</sub> на значенні 475 часток на мільйон), ризик відхилення від 2 градусів становить між 68% та 99% (в середньому 85%, “дуже високий” за визначенням Міжнародної групи експертів з питань змін клімату (МГЕЗК) );
- за умови стабілізації концентрації парникових газів на рівні 450 часток на мільйон в еквіваленті CO<sub>2</sub> (всіх газів, що приблизно відповідає стабілізації CO<sub>2</sub> на значенні 400 часток на мільйон), ризик перевищення 2 градусів становить між 26% та 78% ( в середньому, 47% - “середня ймовірність”);
- за умови стабілізації концентрації всіх парникових газів на рівні 400 часток на мільйон в еквіваленті CO<sub>2</sub> (що приблизно відповідає стабілізації CO<sub>2</sub> на значенні 350 часток на мільйон), ризик перевищення 2 градусів становить від 2% до 57% (середній - 27% - “малоймовірний”).

На тлі вищесказаного стає очевидно, що радикальна кліматична політика повинна ставити на

---

<sup>1</sup> Наприклад, Рада Європи заявила, що “аби досягти кінцевої мети Рамкової конвенції ООН про зміну клімату і відвернути небезпечні атмосферні втручання в кліматичну систему, загальне зростання світової температури не повинно перевищити 2°C понад передіндустріальні рівні”.

<sup>2</sup> Див. WGBU (2003+2004).

<sup>3</sup> Більше про дискусію щодо понять “своєчасні дії” та “затримана реакція” див. Meinshausen et al. (2005).



550 часток на мільйон об'єму CO <sub>2</sub>	весь світ	+50%	+45%
	країни Додатку I	від -5% до -25%	від -40% до -80%
	країни, що не входять в Додаток I	Відхилення від стандартного сценарію в Латинській Америці, на Близькому Сході, у Східній Азії та країнах Азії з плановою економікою	Відхилення від стандартного сценарію в більшості регіонів, особливо в Латинській Америці та на Близькому Сході у порівнянні з рівнями викидів у 1990р. (якщо не вказано інше)

Джерело інформації: Ecosfys (2004)

В таблиці 2 вказані приблизні граничні значення викидів для стабілізації концентрації CO<sub>2</sub> на різних рівнях для груп країн (країни Додатку I Рамкової конвенції і ті, що в нього не входять). Якщо необхідно досягти стабілізації концентрації парникових газів на рівні 400-450 часток на мільйон і концентрації CO<sub>2</sub> між 350 і 400 часток на мільйон, глобальні викиди CO<sub>2</sub> мали б бути знижені приблизно на 60% до 2050р. відносно рівня 1990р.

Країнам Додатку I доведеться знизити викиди вуглекислого газу на 80 – 90%

Навіть для менш амбіційних значень стабілізації викиди індустріалізованих країн мали б знизитись більше ніж на 70% у порівнянні з 1990р. Більш того, за такої траєкторії викидів треба було б досягти значних знижень викидів серед країн, що розвиваються. За такого сценарію викиди CO<sub>2</sub> могли б зрости, але після 2020р. вони мали б значно скоротитись.

Однак коридор викидів CO<sub>2</sub> для обмеження глобального потепління до 2°C у порівнянні з доіндустріальними рівнями у великій мірі залежить від чутливості клімату<sup>5</sup>. Таблиця 3 ілюструє це на прикладі даних, наведених WBGU (Німецька консультативна рада з глобальних змін) (2003). Якщо припустити, що чутливість клімату є високою, сукупні викиди CO<sub>2</sub> на період 2000-2100рр. мають бути в 4 рази меншими, ніж у разі нижчої чутливості клімату.<sup>6</sup>

**Таблиця 3 Сукупні викиди CO<sub>2</sub> для обмеження глобального потепління до 2°C у порівнянні з доіндустріальними рівнями**

Очікувана чутливість клімату °C	Припустимі сукупні викиди CO <sub>2</sub>	
	мільярд тон вуглецю	мільярд тон CO <sub>2</sub>
1.5	1 780 – 1 950	6 527 – 7 150
2.5	850 - 910	3 117 – 3 337
3.5	530 - 560	1 943 – 2 053
4.5	380	1 393

Джерело інформації: WBGU (2004)

<sup>5</sup> Чутливість клімату виражається як підвищення глобальної середньої температури в разі подвоєння концентрації парникових газів.

<sup>6</sup> Інші автори (наприклад, Meinshausen 2005) на основі моделювання роблять висновок, що досягнення мети в 2°C є "ймовірним" тільки в тому разі, якщо сукупні викиди CO<sub>2</sub> від спалення викопного палива будуть обмежені 400 мільярдами тон вуглецю на період після 1990р. Якщо прийняти до уваги сукупні викиди між 1990 і 2000 роками, це призвело б до залишку резерву викидів у 333 гігатон вуглецю (або близько 1221 гігатон CO<sub>2</sub>) для викидів від спалення викопного палива.

З урахуванням цієї інформації оцінка ядерної енергії та інших варіантів знешкодження викидів має брати до уваги структуру швидких і значних знижень викидів CO<sub>2</sub>, в рамках якої пік викидів для індустріалізованих країн буде досягнуто протягом наступних двадцяти років, глобальні викиди CO<sub>2</sub> повинні бути знижені на 30-60% до 2050р., а для індустріалізованих країн цей показник має скласти 60-90% до 2050р. Але і цей діапазон представляє великий ступінь невпевненості щодо того, чи можливо утримати потепління в межах 2°C. Досягнення порогу в 2°C можна вважати "ймовірним", якщо траєкторії викидів є ближчими до нижньої межі вищезазначених діапазонів.

### **3 Бізнес як завжди**

#### *Тенденції викидів CO<sub>2</sub>*

Від початку двадцятого століття глобальні викиди вуглекислого газу зросли у 12 разів. Тоді як до 1950 року на глобальному рівні домінували викиди основних парникових газів з Північної Америки та Західної Європи, в післявоєнний період дуже швидко зросли викиди з соціалістичних країн.

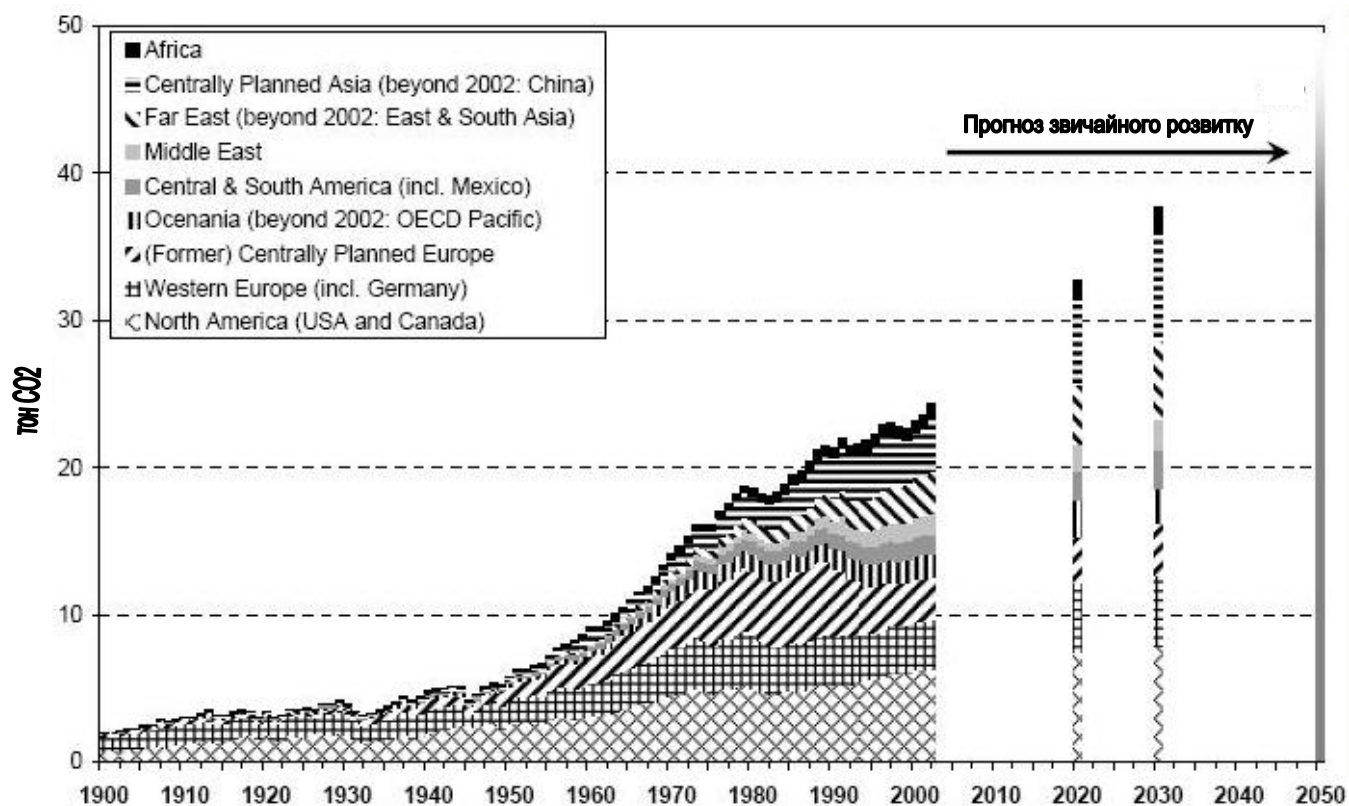
До нафтової кризи 1970-х європейські країни з центральним плануванням відповідали за 22% глобальних викидів CO<sub>2</sub> від спалення викопних видів палива, Західна Європа - за 23%, а Північна Америка – за 32%.

Найбільш значні тенденції глобальних викидів CO<sub>2</sub> з 1980-х і далі є такими:

- постійний ріст обсягів викидів в Північній Америці;
- більш-менш незмінні тенденції викидів у Західній Європі;
- різке зниження викидів CO<sub>2</sub> після розвалу європейських країн з плановою економікою;
- підвищення викидів у азійських країнах з плановою економікою (особливо в Китаї) та інших країнах Дальнього Сходу, що розвиваються.

В 2002р. доля Північної Америки в глобальних викидах CO<sub>2</sub> становила тільки 26%. Доля Західної Європи (14%) була порівняною з азійськими країнами планової економіки (15%) і перевищувала долю країн з перехідною економікою (12%).

**Малюнок 1 Глобальні викиди CO<sub>2</sub> від спалення викопних видів палива, 1900-2050рр.**



Джерело інформації: Marlandта ін. (2005), IEA (2004), власні підрахунки

Однак, що стосується сукупних викидів, Північна Америка та Західна Європа спричинили левову частку викидів CO<sub>2</sub> в період з 1900 по 2002рр. Загальні викиди CO<sub>2</sub> на цей період становлять 1012 млрд.тон. На основі сукупних викидів внески різних регіонів можна приблизно порівняти з поточними кількостями викидів у 1970р. Країни Північної Америки відповідають за 32% загальних викидів CO<sub>2</sub>, Західна Європа представляє 22%, а колишні соціалістичні європейські країни – 18%. Доля азіатських країн з плановою економікою та інших країн Далекого Сходу все ще залишається низькою, на рівні відповідно 8% та 5%.

Прогноз Міжнародного енергетичного агентства (IEA 2004) передбачає продовження сучасних тенденцій:

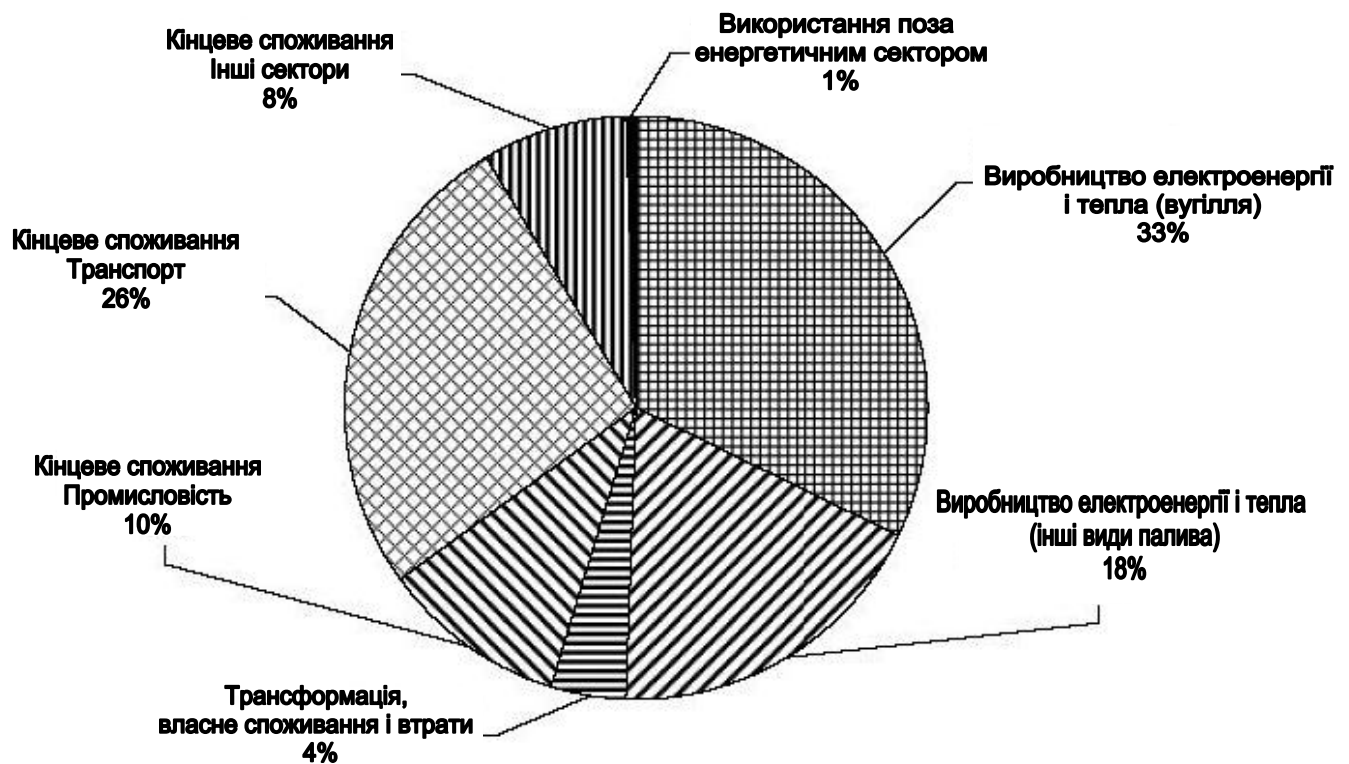
- глобальні викиди CO<sub>2</sub> від спалення викопного палива можуть зрости на 62% у період 2002-2030рр;
- зростання викидів CO<sub>2</sub> в країнах Організації економічного співробітництва і розвитку (ОЕСР) в Північній Америці сягне 33%;
- викиди в Західній Європі та Європейському Союзі можуть підвищитись на 20%;
- викиди в країнах ОЕСР в Азії та тихоокеанському регіоні можуть також зрости на 20%;
- викиди CO<sub>2</sub> в країнах з перехідною економікою (особливо Росії) виросте ще на 40%;
- викиди CO<sub>2</sub> в багатьох країнах, що розвиваються (Китай, Індія, Індонезія, Бразилія тощо), зростуть у 1,2 – 1,6рази.

Малюнок 2 вказує на ключові сектори для зростання викидів у прогнозі Міжнародного енергетичного агентства. Половина прогнозованого росту викидів у період з 2002 до 2030рр. походить з енергетичного сектора, а ще одна третина – з виробництва електроенергії на основі

вугілля. Другий ключовий сектор – це транспорт, який спричиняє близько 26% росту викидів. Хоча всі сектори повинні підлягати заходам зі зниження викидів, виробництво електроенергії та транспортний сектор мають відігравати виключно важливу роль в будь-якій стратегії скорочення викидів.

Навіть у прогнозах з дуже різною динамікою майбутнього росту викидів у регіонах світу “історична відповідальність” в розумінні сукупних викидів CO<sub>2</sub> зміниться лише дуже незначним чином. Країни Північної Америки відповідатимуть за 28% загального сукупного значення викидів CO<sub>2</sub> у період з 1900 по 2030рр, Західна Європа - за 18%, а колишні соціалістичні країни Європи - за 14%. Країни Азії та Далекого Сходу, що швидко розвиваються, і надалі представлятимуть 12% і 9% сукупних глобальних викидів CO<sub>2</sub> у період з 1900 до 2030рр.

**Малюнок 2 Внесок різних секторів економіки в зростання глобальних викидів CO<sub>2</sub> в результаті спалення викопного палива, 2002-2030рр.**



Джерело інформації: IEA (2004), власні розрахунки

У порівнянні з бюджетами викидів, про які ми згадували в Розділі 2, тенденція викидів у прогнозі стандартного розвитку Міжнародного енергетичного агентства навряд чи може бути узгоджена з будь-якою траєкторією викидів, яка б дозволила дотримуватись цілі у 2°C, якщо чутливість клімату вища за 2,5°C. Якщо б чутливість клімату становила близько 2,5°C, викиди набули б тенденції до швидкого зменшення обсягів після 2030 року, що дало б шанс на обмеження глобального потепління на 2°C у порівнянні з доіндустріальними рівнями (Таблиця4).

**Таблиця 4 Сукупні викиди CO<sub>2</sub> для обмеження глобального потепління до 2°C порівняно з доіндустріальними рівнями і стандартний сценарій росту викидів CO<sub>2</sub> до 2030р.**

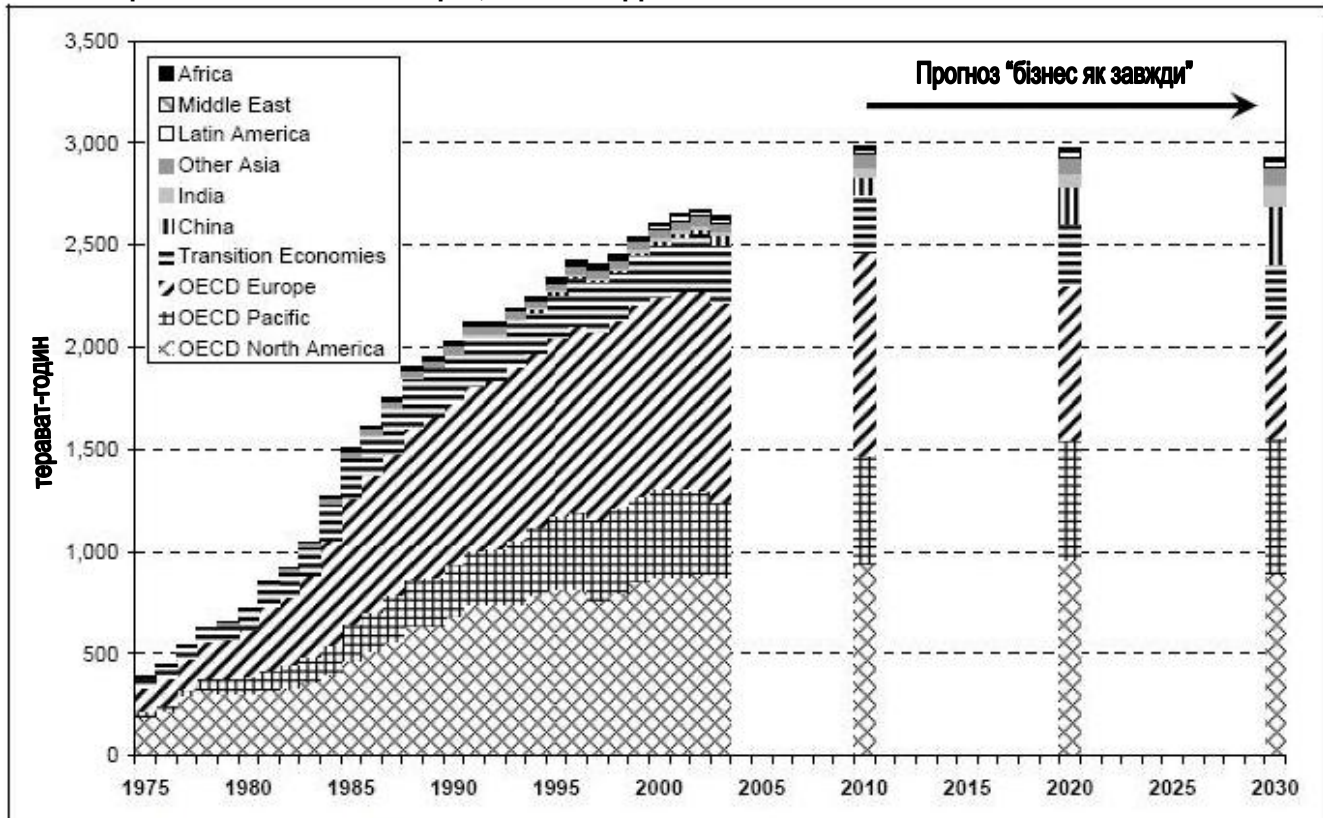
Передбачувана чутливість клімату	Припустимі сукупні викиди CO <sub>2</sub> 2000-2100рр.	Сукупні викиди CO <sub>2</sub> 2000-2030рр.	Бюджет залишку викидів
°C	мільярдів метричних тон CO <sub>2</sub>		
1.5	6 527 – 7 150	~ 900	86% - 87%
2.5	3 117 – 3 337	~ 900	71% - 73%
3.5	1 943 – 2 053	~ 900	54% - 56%
4.5	1 393	~ 900	35%

Джерело інформації: WBGU (2004), IEA (2004), власні розрахунки.

### Виробництво ядерної енергії

На відміну від глобальної потреби в енергії та від глобальних викидів CO<sub>2</sub>, розвиток атомної енергетики відбувався в основному в країнах ОЕСР та європейських соціалістичних державах або країнах з перехідною економікою. Швидкий розвиток ядерної енергетики у 1970 і 1980 роки істотно уповільнився після Чорнобильської катастрофи. В період після 2000 року можна спостерігати лише невеликий ріст цієї промисловості. Доля атомної енергії у виробництві електроенергії в 2003р. становила 22% для країн ОЕСР та 6% для країн, що не входять до цієї організації. Лише кілька країн світу виробляють більш, ніж третину своєї електрики, на атомних станціях, серед них країни ОЕСР (Франція, Швеція, Бельгія, Угорщина, Корея, Словаччина, Швейцарія) та деякі країни з перехідною економікою (Болгарія, Словенія, Вірменія, Литва та Україна).

Мал. 3 Виробництво атомної енергії, 1975-2030рр.



Джерело інформації: IEA (2004+2005)

Занепад ядерної енергетики в багатьох регіонах світу можна пояснити такими факторами:

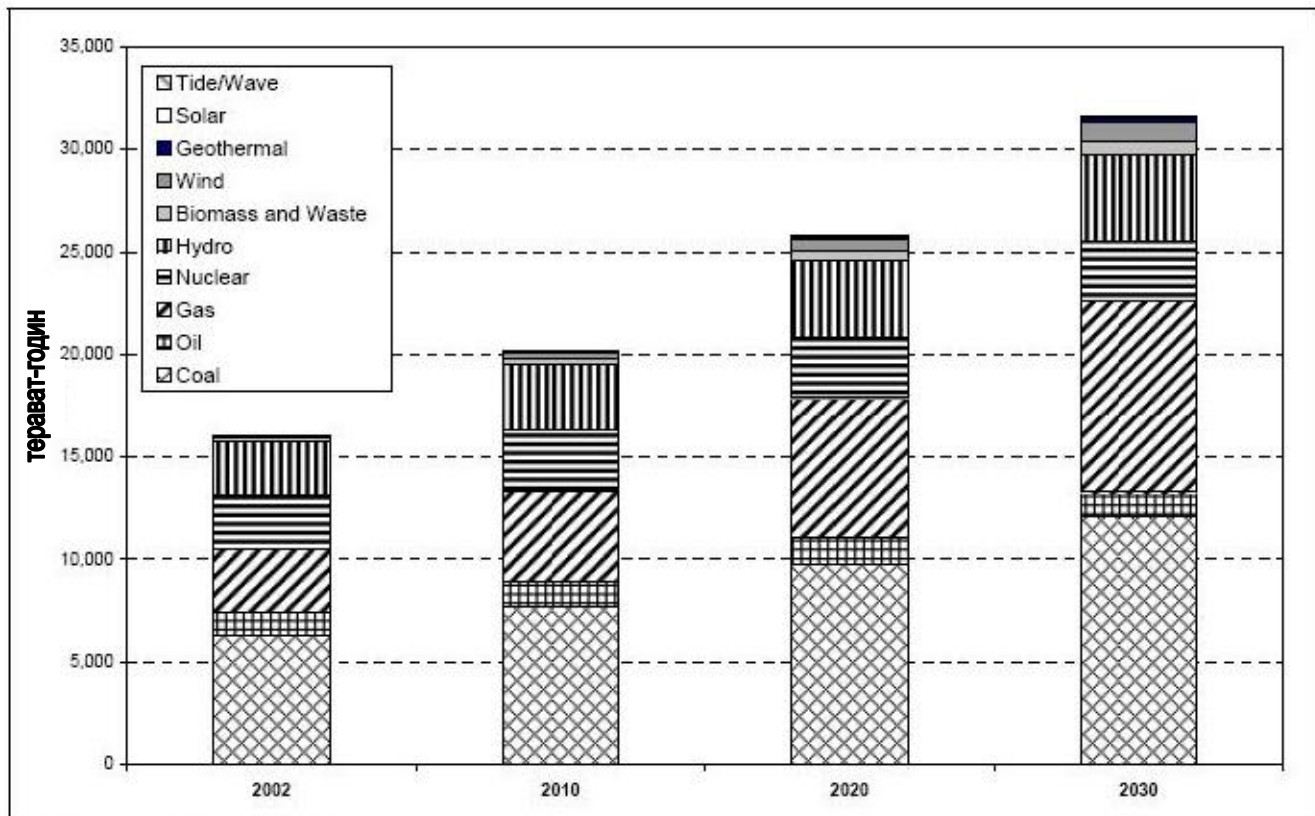
- зростання громадського опору проти атомної енергії в багатьох країнах, особливо з приводу

великих ядерних аварій, захоронення радіоактивних відходів, транспортування ядерних матеріалів і проблеми розповсюдження ядерної зброї та тероризму;

- економічні проблеми, що постають перед атомними станціями після лібералізації ринків електроенергії в деяких країнах ОЕСР, включно з проблемою фінансування виводу станцій з експлуатації та захоронення ядерних відходів;
- підвищення вимог і стандартів безпеки експлуатації для нових та вже існуючих атомних станцій;
- відносно низькі ціни на викопне паливо і значне покращення конкурентних технологій виробництва електроенергії.

Стандартний сценарій розвитку виробництва ядерної енергії вказує на невеликий ріст до 2010 року та невеликий спад у наступні два десятиліття після 2010р. Це пояснюється трьома різними тенденціями. Особливо сильний спад виробництва ядерної енергії передбачається для європейських країн ОЕСР. В цих країнах, як і в Європейському Союзі, виробництво ядерної електроенергії повинно знизитись на 40% у наступні тридцять років. В Північній Америці, а також країнах з перехідною економікою, виробництво атомної електроенергії очікується на більш-менш постійному рівні. Однак, для країн азіатської ОЕСР та деяких країн, що розвиваються, Міжнародне енергетичне агентство передбачає значне збільшення виробництва атомної електроенергії (IEA 2004). В країнах азіатської ОЕСР це ймовірне збільшення становить 60%. Починаючи з дуже низьких рівнів, виробництво ядерної енергії в Китаї, як очікується, виросте в 10 разів, а в Індії – у 4,8 рази. Щодо інших країн, що розвиваються, очікується набагато менший, але все ж таки значний розвиток ядерної енергетики (Латинська Америка +38% у період 2002 - 2030рр, Африка +18%).

**Мал. 4 Виробництво електроенергії в разі звичайного розвитку (“бізнес як завжди”), 2002-2020рр.**



Джерело інформації: IEA (2004)

Хоча невеличке зростання виробництва атомної енергії на атомних станціях і передбачається в «Перспективах розвитку світової енергетики»(2004 рік), доля атомної енергії в загальному виробництві електроенергії має суттєво знизитись. В 2002р. доля атомної енергії складала 17%, до 2030р. вона знизиться до 9%. І навіть в Китаї, країні, де відбувається найшвидший розвиток ядерної енергії, АЕС додадуть лише 5% до загального виробництва електроенергії. Основний ріст виробництва електроенергії в «Перспективах розвитку світової енергетики» припадає на електростанції, що спалюють вугілля та природний газ. Хоча прогнозується також значний розвиток виробництва електроенергії на основі відновлюваних джерел, ці джерела (за винятком гідроенергетики) відіграватимуть менш важливу роль в стандартному сценарії Міжнародного енергетичного агентства.

#### **4 Вирішення проблеми комплексних структур ризику**

Ризик, який становить глобальне потепління, та небезпека, пов'язана з атомною енергією, складають ядро конфлікту, в якому необхідний систематичний підхід до оцінки різних видів ризику, що дозволило б розробити основні принципи та стратегії.

Німецька консультативна рада з глобальних змін (WBGU) запропонувала модель, яка уможливує порівняння і оцінку різних видів ризику. В моделі WBGU ризики розподіляють за категоріями на основі таких критеріїв (WBGU 2000):

- ймовірність події;
- розмір шкоди;
- вірогідність оцінки ймовірності та розміру шкоди;
- повсюдність, глобальність ефекту;
- тривалість періоду ліквідації;
- необоротність шкоди;
- ефект затримки періоду ліквідації;
- потенціал мобілізації (величина психологічного та політичного значення).

На основі цих критеріїв ризику можна організувати у декілька сфер: нормальну, перехідну та заборонену. Ризики в “нормальній сфері” характеризуються такими атрибутами (WBGU 2000):

- низька невизначеність щодо ймовірностей шкоди;
- невеликий загальний потенціал катастрофічних наслідків;
- низька чи середня невизначеність щодо ймовірності події та масштабів шкоди;
- вузькі довірчі інтервали стосовно ймовірності та розміру шкоди,
- низькі рівні тривалості й повсюдності (масштаб події в часі та просторі);
- високий ступінь оборотності потенціальної шкоди;
- низький потенціал соціального конфлікту і мобілізації.

Більш проблематичною є ситуація з “критичною сферою”, яка складається з “перехідної” та “забороненої” сфер. Ризики в “критичній сфері” мають щонайменше одну з таких характеристик (WBGU 2000):

- висока невизначеність всіх параметрів ризику;
- високий потенціал шкоди;
- висока ймовірність (близька до 1);
- висока невизначеність оцінки, але достатні підстави для того, щоб припустити можливість шкоди великих масштабів;
- високі тривалість, повсюдність та необоротність, необхідні достатні підстави, щоб припустити

можливість шкоди;

- слід очікувати великого потенціалу мобілізації (відмова, протест, опір) через те, що проект може сприйматися як несправедливе розподілення благ, або через інші соціальні та психологічні фактори.

Диференціація між “перехідною” та “забороненою” сферами базується на можливості зниження ризику або побудови консенсусу, завдяки чому сприятливі можливості перевищують потенційну шкоду (WBGU 2000):

- Якщо можливо знизити ризик за допомогою заходів, виконання яких сприяє переходу до “нормальної сфери” ризику, тоді ризик необхідно розглядати як частину “перехідної сфери”.
- Якщо масштаб шкоди дуже серйозний, і неможливо прийняти заходи для значного обмеження збитків або неможливо досягти консенсусу в суспільстві щодо того, що ризик є прийнятним у порівнянні з можливостями, які при цьому отримуються, такий ризик необхідно вважати частиною “забороненої сфери”.

У зв’язку з вищесказаним, ключові питання стосовно поділу ризиків на сфери є такими:

- Чи є заходи, вже існуючі або на стадії розробки, які могли б знизити розмір шкоди з великою мірою впевненості та у передбачуваному майбутньому, в такій мірі, щоб їх можна було віднести до “нормальної сфери”? Якщо ні, необхідно додати всіх зусиль для заміни цієї технології.
- Чи існує, або може бути досягнутий, консенсус в суспільстві про те, що ризик значної шкоди є припустимим у порівнянні з перевагами для суспільства. Якщо ні, необхідно додати зусиль задля того, щоб замінити цю технологію іншими. Це питання є особливо складним, якщо проблема має наслідки для інших країн та поколінь, але між різними закладами немає домовленості, яка б відображала консенсус у суспільстві щодо цього питання.

На додаток до критеріїв для віднесення ризику до певної сфери, WBGU ввела в ужиток кілька класів ризику з вказанням на розміри екологічних та інших видів ризику. В таблиці 5 див. огляд класів ризику „Дамокл”, „Циклоп”, „Піфія”, „Пандора”, „Касандра” та „Медуза”.

**Таблиця 5 Огляд класів ризику: характеристика та реальні приклади**

Клас ризику	характеристики	приклади
Дамокл	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ймовірність низька</li><li>• Достовірність оцінки ймовірності висока</li><li>• Масштаб шкоди великий</li><li>• Достовірність оцінки масштабу шкоди є скоріше високою</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ядерна енергія</li><li>• Великі хімічні підприємства</li><li>• Дамби</li><li>• Зіткнення з метеоритами</li></ul>
Циклоп	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ймовірність події невідома</li><li>• Високий ступінь шкоди</li><li>• Достовірність оцінки масштабу шкоди є скоріше високою</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Повені • Землетруси</li><li>• Виверження вулканів</li><li>• Зараження на СНІД</li><li>Масове зникнення видів під антропогенним впливом</li><li>Системи оперативного попередження про ядерну атаку і застосування зброї масового знищення</li><li>Зупинка термогалінної циркуляції</li></ul>
Піфія	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ймовірність невідома</li><li>• Ступінь шкоди невідомий (потенційно високий)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Самопідсилюване глобальне потепління</li><li>• Зараження на хворобу Кройцфельда -Якоба; (новий варіант, вияв у людини коров'ячої спонгіформної енцефалопатії)</li><li>• Деякі приклади застосування генної інженерії</li><li>• Нестабільність льодовикових щитів Західної Антарктики</li></ul>

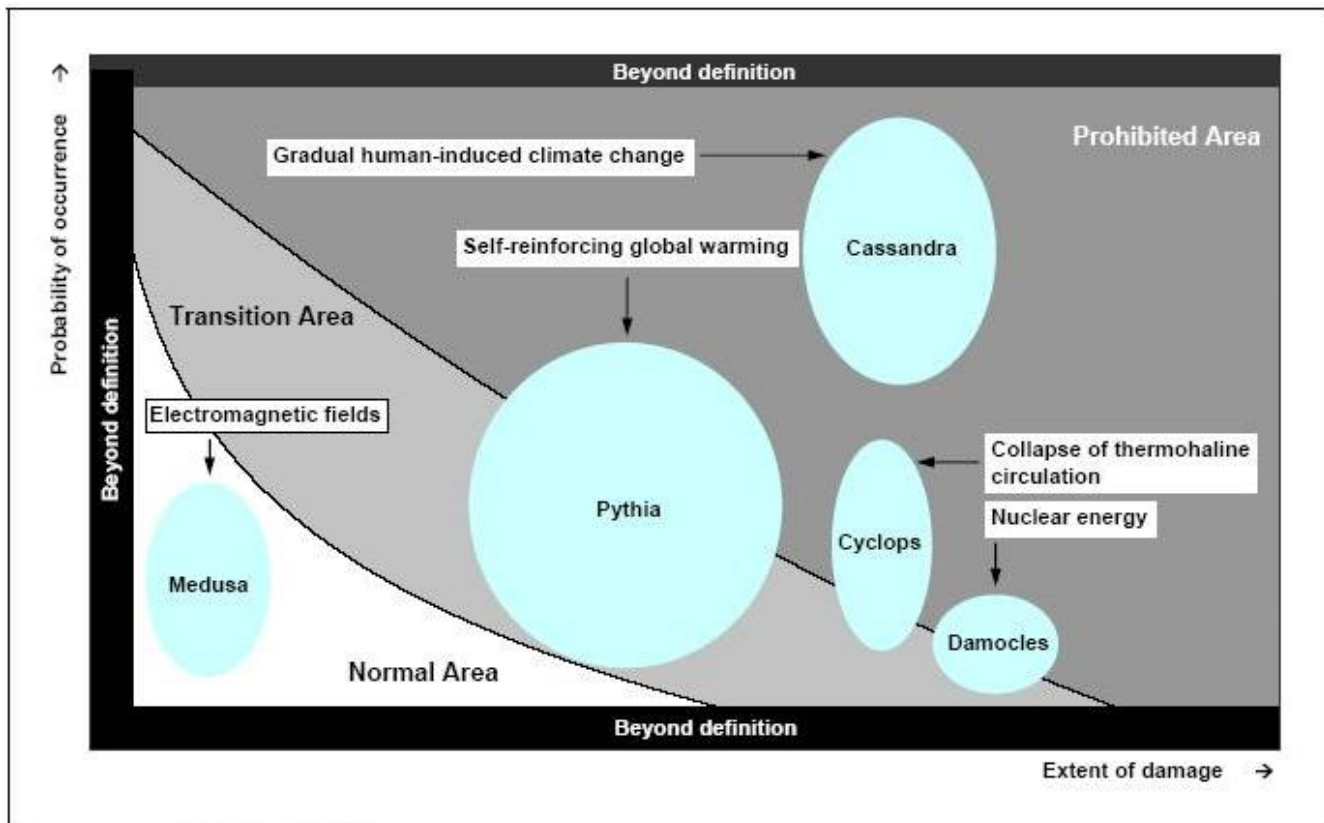
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Достовірність оцінки масштабу шкоди невідома</li> </ul>	
Пандора	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ймовірність невідома</li> <li>▪ Достовірність оцінки ймовірності невідома</li> <li>▪ Розмір шкоди невідомий (можливі тільки припущення)</li> <li>▪ Достовірність оцінки масштабу шкоди невідома</li> <li>▪ Тривалість висока (кілька поколінь)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Стійкі органічні забруднювачі</li> <li>▪ Ендокринні деструктори</li> </ul>
Касандра	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ймовірність події скоріше висока</li> <li>▪ Достовірність оцінки ймовірності скоріше низька</li> <li>▪ Масштаб шкоди великий</li> <li>▪ Достовірність оцінки масштабу шкод скоріше висока</li> <li>▪ Довга затримка наслідків</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Поступова зміна клімату в результаті діяльності людини</li> <li>▪ Дестабілізація наземних екосистем</li> </ul>
Медуза	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ймовірність події скоріше низька</li> <li>▪ Достовірність оцінки ймовірності скоріше низька</li> <li>▪ Низький ступінь шкоди</li> <li>▪ Достовірність оцінки масштабу шкоди скоріше висока</li> <li>▪ Потенціал мобілізації високий</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Електромагнітні поля</li> </ul>

Джерело: WBGU (2000)

Особливе значення для дебатів про ядерну енергію та клімат мають такі класи ризику, як “Касандра” і “Дамокл”. WBGU закликає вжити запобіжних заходів у кліматичній політиці й докласти великих зусиль, щоб обмежити ризик глобального потепління типу “Касандра” (див. Мал. 5) в межах прийнятних кліматичних вікон.

- Зростання світової середньої температури повинно обмежитись до 2°C порівняно з доіндустріальними рівнями.
- темп зміни температури має бути нижчим, ніж 0,2°C за десять років.

**Малюнок 5 Класи ризику та їх розташування в нормальній, перехідній та забороненій сферах**



Джерело: WBGU (2000).

Щодо ризику ядерної енергії типу “Дамокл”, WBGU констатує: “Якщо навіть найкращі зусилля не можуть належним чином знизити катастрофічний потенціал або зробити це можливо тільки за рахунок надмірних коштів, тоді...таке джерело ризику можна схвалити за двох умов: по-перше, якщо корисність даного джерела ризику має життєве значення, і по-друге, якщо можливо гарантувати, що будуть задіяні всі технологічні, інституційні та організаційні можливості для запобігання катастрофічній події, а якщо вона все-таки відбудеться, то наслідки будуть пом'якшені по мірі можливості. Ця друга умова набуває особливого значення, коли такі джерела ризику в рамках передачі технології експортуються в інші країни”.

У відповідності до цієї оцінки, ситуація з ядерною енергією є дуже складною:

- Перше ключове питання стосується того, чи існує повний комплект технологічних, інституційних та організаційних можливостей для трансформації типу ризику з “Дамокла” у “Медузу”, тобто обмеження масштабу шкоди і збереження низької ймовірності події. Ці варіанти необхідно оцінювати з урахуванням як сучасного рівня використання ядерної енергії, так і набагато ширшого її використання в будь-якому регіоні світу.
- Друге питання полягає в тому, чи могла б ядерна енергія бути невід’ємною частиною вирішення проблеми глобального потепління, тобто заміною ризику типу “Касандра”, який, безсумнівно, входить до “забороненої сфери”.

Ризик, властивий існуючим атомним реакторам, (великі аварії, терористичні атаки, переробка і захоронення радіоактивних матеріалів тощо) неможливо утримати в тих межах, яких вимагає “нормальна сфера”. До того ж, існує високий ступінь невизначеності щодо здатності майбутніх поколінь підкорятися вищезгаданім вимогам, та міцний зв'язок між ризиками ядерної енергії та соціальною, політичною, а також інституційною стабільністю.

На тлі всього вищесказаного можна стверджувати, що перше вирішальне питання майбутнього ядерної енергії в глобальній енергетичній системі полягає в тому, чи існують альтернативні варіанти забезпечення якісних енергетичних послуг на глобальному рівні в рамках жорстких обмежень на викид парникових газів. По-друге, необхідно вивчити питання про те, чи можливо, і якщо так, то яким чином, обмежити ризик кліматичних змін до прийнятних рівнів, не покладаючись на ядерну енергію, а також, чи можна це зробити в рамках прийнятних наслідків (вартість, соціальне сприйняття, інші ризики).

## **5 Шляхи пом'якшення проблеми**

### ***Попередні зауваження***

Широкий діапазон наукового аналізу стратегій зниження викидів для стабілізації концентрації парникових газів в атмосфері показує, що не існує якогось одного варіанту дій, який може призвести до потрібного зниження викидів. Однак внесок різних варіантів у великій мірі залежатиме від рівня стабілізації концентрації газів. Якщо зосередити увагу на менш радикальних темпах зменшення обсягів викидів, то це призведе до набагато більшої гнучкості у питаннях використання різних технологічних варіантів. За такого сценарію було б набагато легше відмовитись від ядерної енергії, особливо зважаючи на причини, обговорені в попередньому розділі.

Сполучення різних технологій для стратегій зниження парникових газів було проаналізовано за допомогою багатьох різних методичних підходів, наприклад, у третьому оціночному звіті Міжнародної групи експертів з питань змін клімату (МГЕЗК) від 2001р., а також у багатьох інших дослідженнях (наприклад Schrattenholzer et al. 2004, WBGU 2004).

В аналізі, що представлений тут, ми розглянемо ці звіти й дослідження за допомогою простого метода. Якщо припустити, що в разі звичайного розвитку подій (“бізнес як завжди”) глобальні викиди CO<sub>2</sub> від спалювання викопного палива зростуть на 40-50 мільярдів тон до 2050 року, а необхідне зниження для стабілізації викидів CO<sub>2</sub> на рівні, який дозволив би виконати мету в 2°C, є на 30 – 60% нижчим за рівень 1990 року, тоді різниця, яку необхідно покрити, буде між 25 та 40 мільярдами тон CO<sub>2</sub> до 2050р. У спрощеній моделі ми припускаємо лінійну тенденцію і не беремо до уваги різні варіанти піку викидів та шляхи зниження викидів після піку, що розрізняються темпами зниження викидів. Ми використовуємо цю спрощену модель для демонстрації можливих внесків та потенційних взаємодій між різними стратегіями з пом'якшення зміни клімату.

### ***Ядерна енергія***

В 2004р. у всьому світі працювали 442 реактори загальною потужністю 368,6 ГВт. В більшості своїй це легководні реактори різного типу. В 2003р. атомні електростанції виробляли 15,7% всесвітньої електроенергії. Доля атомної енергії є суттєво різною у країнах ОЕСР та поза цією організацією. В країнах ОЕСР у 2003 році приблизно 2223 ТВт-год. електроенергії було вироблено на атомних станціях, що становило близько 22,3% від усієї виробленої тут електроенергії. Виробництво атомної енергії в країнах, що не є членами ОЕСР, в 2003р. становило 412 ТВт-год., що дорівнювало 6% усього обсягу. Прогноз звичайного розвитку подій (“бізнес як завжди”) для країн ОЕСР вказує на повільний розвиток ядерної енергії до 2030 року. Підвищення загальної потужності з 359 ГВт в 2002р. до 376 ГВт в 2030р. відповідає середньому чистому приросту в 600 МВт на рік за даний період. Іншими словами, для такого розвитку подій необхідно кожні два роки вводити в експлуатацію нову АЕС потужністю в 1200МВт. Однак,

якщо взяти до уваги вік існуючих атомних станцій, то кожного року потрібно додавати нову атомну потужність в середньому між 4 і 5 ГВт (тобто 3-4 великих атомних станцій).

Потенційний внесок ядерної енергії до радикальних цілей зниження викидів парникових газів є предметом багатьох досліджень. Зокрема, розглядаються наступні проекти:

- Десятикратне розширення виробництва ядерної енергії в період з 2000 до 2075 року (van der Zwaan 2002) означало б всесвітню потужність ядерної енергетики в 2050 ГВт і рівень виробництва в 17283 ТВт-год. в 2050 році. Це приблизно шестеро більше, ніж у сценарії “бізнес як завжди”. В середньому необхідно буде додавати 35ГВт ядерної потужності щорічно до 2050р. Такий ріст виробництва ядерної енергії замінив би не тільки вугілля, але й значну долю виробництва електрики на основі природного газу. В результаті цього екстремального і явно нереального сценарію, можна було б до в 2050р. знизити викиди CO<sub>2</sub> на 9700 Мт.
- Pacala/Socolow (2004) пропонують до середини цього століття додати 700 ГВт, що втричі більше, ніж сучасна потужність. Враховуючи необхідну заміну існуючих станцій, щорік треба вводити в експлуатацію в середньому 25 ГВт потужності, аби до 2050 року АЕС досягли потужності в 1060ГВт. Загальне виробництво електрики в такому разі зросло б до 8260ТВт-год. і призвело до зниження викидів на 7 000 Мт CO<sub>2</sub> в 2050р., якщо замінити тільки вугільні електростанції. Якщо говорити про заміну новими АЕС електростанцій як на вугіллі, так і на газі, тоді їх внесок до зниження викидів в атмосферу в 2050р. склав би 5000 Мт CO<sub>2</sub>.

З урахуванням історичного досвіду атомної енергії, обидва сценарії видаються дуже далекими від реальності. Серйозні ризики і питання безпеки ядерної енергетики повинні знайти своє відображення в цих двох проектах. Також необхідно підкреслити, що такі сценарії припускають, що атомна енергетика повинна скласти значну долю загального виробництва електроенергії в тих країнах і регіонах, де сьогодні вона грає незначну роль, або взагалі відсутня. Це пояснюється тим, що три- або шестикратний ріст виробництва електроенергії на АЕС в Північній Америці, Європі чи Японії нездійснений, враховуючи значну долю ядерної енергії в енергетиці цих регіонів.

Головний ризик ядерних реакторів полягає у можливості великої аварії з витоком великої кількості радіації.

Такий витік завдав би істотної шкоди здоров'ю населення, екосистемам, соціальній та економічній системі (UNDP/UNICEF 2002). Значну більшість існуючих, а також більшість створених за наступні тридцять років, АЕС становлять легководні реактори, які створюються на основі сучасних конструкторських принципів. Необхідно визнати дуже серйозні дефекти, властиві таким реакторам (Froggatt 2005).

Навіть якщо ймовірність катастрофічної події здається дуже низькою,<sup>7</sup> розширення ядерної енергетики в три чи шість разів протягом наступних 50 років призвело б до грандіозного ризику однієї чи більше катастрофічних подій. Експериментальне моделювання економічних наслідків великої аварії на німецькій АЕС показало, що загальна вартість такої аварії може скласти від 2000 до 5000 млрд. доларів (Ewers/Rennings 1991+1994).

Крім легководних реакторів, на різних стадіях розробки і реалізації знаходяться кілька інших принципів проектування ядерних реакторів. Для всіх цих “еволюційних концепцій” (так званих “реакторів третього покоління”) існують значні невід'ємні ризики різних аварійних сценаріїв, які

---

<sup>7</sup> Sailor et al. (2000) оцінюють ризик аварії з великим зовнішнім викидом радіоактивних речовин приблизно в 10<sup>-5</sup> до 10<sup>-6</sup> на реактор на рік. Однак на той час не бралась до уваги ймовірність запланованих терористичних атак.

ведуть до масових викидів радіоактивних речовин. В деяких країнах почали розробляти “революційні проекти ядерних реакторів” (так звані “реактори четвертого покоління”), які мають стати набагато надійнішими, більш безпечними та економічними, ніж реактори третього покоління, і в той же час більш безпечними з точки зору нерозповсюдження ядерної зброї тощо (NERAC 2002). Більш уважний погляд на технічні деталі доводить, що багато проблем безпеки залишаються не вирішеними; існують фактичні докази того, що удосконалення безпеки в деяких відношеннях може навіть створити нові проблеми безпеки (Froggatt 2005). Нарешті, залишається не вирішеним важливе питання проте, як ці проекти реакторів співставляють заходи з підвищення безпеки з метою зниження фінансових інвестицій і експлуатаційних витрат. Варто зауважити також, що розвиток нового покоління реакторів потребує величезних капіталовкладень, а результат їх поки що сумнівний. Реактори IV покоління з’являться – якщо вони взагалі з’являться – щонайменше через 20 чи 30 років. Чи зможе, і яким чином, проектування нових реакторів відповісти на загрозу погоджених терористичних нападів (включно з падінням літаків), залишається зовсім незрозумілим. Подібні проблеми можуть виникнути за умови появи атомних станцій на ринках країн чи регіонів, де ризик військових конфліктів є набагато вищим, ніж в тих регіонах, де сьогодні працює більшість реакторів.

Наявність ядерного палива буде головною попередньою умовою значного внеску ядерної енергії до радикальних знижень викидів у 2050. В нинішній час щорічна потреба в ядерному паливі складає близько 70000 тонн урану. Для три- чи шестикратного розширення індустрії протягом відносно короткого часу, потреба в ядерному паливі виросте в кілька разів, навіть в тому разі, якщо ефективність використання палива значно збільшиться. Постачання ядерного палива вже через кілька десятиліть буде розраховувати на гіпотетичні (невідомі) ресурси (див. Kreuzsch et al 2005). Обсяг видобутку урану доведеться суттєво розширити, а це, з огляду на минулий досвід, займе багато років.<sup>8</sup>

До того ж, знадобляться значні нові потужності для збагачення урану. Lovins (2005) повідомляє, що для додаткових АЕС потужністю 700 ГВт доведеться побудувати 15 нових збагачувальних підприємств.

З урахуванням цієї інформації, Rothwell/van der Zwaan (2003) розцінюють легководні реакторні системи як нестабільні за критерієм виснаження невідновлюваних ресурсів. Більше того, плани розвитку реакторних систем IV покоління одногосло підкреслюють проблему обмежених паливних ресурсів для легководних реакторів (NERAC 2002). Якщо наявність і вартість ядерного палива для легководних реакторів визнати проблематичною, однократні паливні цикли в майбутньому матимуть обмежене значення. В даний час однократним паливним циклом переважає віддається завдяки їх нижчій вартості та виключенню ризиків, що супроводжують переробку відпрацьованого ядерного палива.

Хоча проекти реакторів IV покоління є досі в багатьох аспектах гіпотетичними, з їх наголосом на “закритих паливних циклах”, впровадження широкого діапазону реакторів-розмножувачів та переробка відпрацьованого палива знов повертаються до повістки дня (NERAC 2002). Якщо ядерний технологічний ланцюжок розшириться і включить в себе розмножувачі та підприємства з переробки палива (а також додаткові транспортні потреби), ризик аварій та уразливість до терористичних атак чи військових конфліктів також значно

---

<sup>8</sup> Price et al. (2004) наводять огляд деяких прикладів гірничої промисловості, де час між початком розвідки та початком виробництва становив 20–30 років, а проміжок часу від знаходження родовища до початку виробництва - від 10 до 20 років.

зросте. Lovins (2005) так ілюструє обсяг переробки відпрацьованого палива: в разі додаткових 700 ГВт потужності АЕС знадобляться близько 50 нових заводів з переробки у всьому світі.

Після закінчення Холодної війни все більшого значення набувають проблеми розповсюдження ядерної зброї. Існуючі сьогодні проблеми в сфері ядерного нерозповсюдження (Іран, Північна Корея) вказують на те, що з розширенням ядерної енергетики навіть в регіональних рамках виникнуть нові ризики (Nassauer 2005). Електростанція на легководних реакторах потужністю 1000 ГВт вироблятиме близько 290 т плутонію (Pu) на рік.

Якщо ядерна потужність складе 2 000 ГВт в 2050 р., щорічне виробництво плутонію досягне 560 т на рік. Така кількість ядерного палива становила б серйозну проблему з точки зору нерозповсюдження ядерної зброї та вимагала б якісно нових міжнародних режимів охорони. Якщо однократний паливний цикл замінити закритим паливним циклом, включно з переробкою та відокремленням плутонію, можуть виникнути серйозні загрози міжнародній безпеці як з точки зору кількості плутонію, яку необхідно переробляти, так і безпосередньо для регіонів, де буде зосереджена його велика кількість. Більш того, було б помилкою припустити, що ризик розповсюдження ядерної зброї зникне або стане незначним – цього не можна гарантувати навіть для проектів реакторів IV покоління.

Хоча було виконано численні дослідження з метою встановити та продемонструвати довгострокову надійність кінцевих сховищ, жодна країна не винайшла остаточного вирішення проблеми розташування ядерних відходів. Тривають дослідження методів кінцевого захоронення відходів, а також діалог з громадськістю та спроби завоювати громадську згоду на

розміщення місць захоронення (Kreusch et al. 2005). Якщо обсяг ядерних відходів значно виросте, розрив між виробництвом високорадіоактивних відходів та наявністю місць для їх захоронення буде все далі поглиблюватись. Van der Zwaan (2002) наводить такий приклад: зростання ядерного виробництва електроенергії в США лише удвічі вимагало б нового сховища місткістю еквівалентною майданчику Юкка Маунтінг кожні 25 років. Згідно з Lovins (2005), розширення світової ядерної потужності на 700 ГВт вимагало б нових сховищ місткістю в 14 майданчиків Якка Маунтінг.

І нарешті економічні аспекти є вирішальними для майбутньої ролі ядерної енергії в рамках радикальної кліматичної стратегії. Без встановлення ціни на CO<sub>2</sub> (у вигляді податку на викиди вуглецю, або в рамках схеми торгівлі відходами) є малоімовірним, що ядерна енергетика буде конкурентноздатною на лібералізованому ринку (Thomas 2005). Однак поступове впровадження ринкових інструментів кліматичної політики (наприклад, схема торгівлі відходами ЄС) могла б змінити ситуацію. Рівень цін на CO<sub>2</sub>, за якого економічні показники нових АЕС могли б покращитись, залишається невизначеним. Sailor et al (2000) посилаються на ціну вуглецю приблизно в 100 доларів США за тону вуглецю (або 27 дол./т CO<sub>2</sub>), як на таку, що забезпечить конкурентноспроможність атомних станцій на ринку. Інші оцінки показують значно вищі пороги для економічної конкурентноздатності ядерної енергетики. З іншого боку, треба брати до уваги багато інших факторів, що викривляють економічну оцінку виробництва електроенергії на АЕС. Нестача фондів для виводу станцій з експлуатації, занадто гнучкі правила фінансової відповідальності, податкові пільги та інші знижки в багатьох країнах приховують реальну вартість електрики, виробленої на атомних станціях. Якщо ядерна енергія відіграватиме в майбутньому більш значну роль, ці приховані витрати все більше спливатимуть на поверхню, тому що навантаження на ті організації, що несуть головний тягар, стане все більш очевидним.

Підсумовуючи сказане, можна зробити висновок, що ядерна енергетика могла б зробити деякий внесок до амбіційних глобальних цілей для зниження викидів парникових газів. З одного боку, цей внесок повністю не замінить собою жодного іншого варіанту, а з іншого боку, він може бути суттєвим. Для того, щоб він був суттєвим, використання ядерної енергії має бути розширене в таких пропорціях, які матимуть інші серйозні наслідки. Ці наслідки необхідно оцінити, щоб обґрунтовано порівняти їх з рештою варіантів зменшення викидів. Окрім того, не можна забувати, що масивне розширення ядерної енергетики

- значно підвищило б ризик для здоров'я населення, екосистем, соціальних та економічних систем через можливість серйозних аварій (включно з терористичними нападами);
- створило б проблему ядерних відходів та розповсюдження ядерної зброї в нових масштабах, враховуючи кількість ядерних матеріалів та країн, де виникнуть ці проблеми;
- вимагало б заміни однократного паливного циклу більш-менш закритим паливним циклом та повторним вводом в процес переробки та технології реакторів-розмножувачів, що призвело б до додаткового ризику і більшої вразливості технологічного ланцюга;
- вимагало б великих інвестицій у повний технологічний ланцюг, включно з видобутком, збагаченням та переробкою палива, для чого знадобилась би довгострокова підготовка;
- вимагало б побудови ліній енергопередачі та іншої інфраструктури для стабільної роботи станцій;
- було б привабливішим, якби на викиди CO<sub>2</sub> було призначено ціну, але з іншого боку, вивело б на поверхню інші перевернуті факти, які наразі підсолоджують економічні показники атомної електроенергії.

Ці ризики та проблеми є темою політичних і наукових дебатів. Для деяких видів ризику існують пропозиції щодо технологічних чи організаційних заходів, які допоможуть обмежити чи виключити проблеми або їхні наслідки (див. Sailor et al. 2000, van der Zwaan 2002). Однак залишається у великій мірі невідомим, чи працюватимуть ці пропозиції, чи можна їх втілити в реальному світі протягом прийняттого проміжку часу.

На тлі наведених аргументів розглянемо інші шляхи зниження викидів, їх потенціал, пов'язані з ними обмеження, та їхню вартість у порівнянні з ядерною енергетикою.

Якщо серйозно оцінити ризики й проблеми ядерної енергії, що згадані вище, постає ключове питання: чи можливо досягти радикальних цілей зниження викидів за допомогою потенційних альтернатив ядерної енергії (включно з їх наслідками). Іншими словами,

- чи можливо досягти амбіційних цілей зі зниження викидів парникових газів без ядерної енергії з точки зору потенціалу та вартості,
- чи перешкоджатимуть наслідки окремих альтернативних стратегій або їхньої сукупності стратегіям зі зменшення викидів,
- чи виявиться стратегія зі значним внеском ядерної енергії шкідливою для стратегії радикального зменшення викидів через те, що інші варіанти не матимуть змоги розвиватись.

Ключове питання оцінки ядерної енергії полягає в тому, як досягти істотного зменшення викидів в рамках кліматичної стратегії, до якої міри існує пряма (потенціал) або побічна (що стосується наслідків та впливу на інші варіанти пом'якшення проблеми) велика необхідність включення ядерної енергії в "портфель" методів досягнення радикальних задач і цілей стратегії та політики в сфері зміни клімату.

### ***Ефективність кінцевого споживання енергії***

Публікація Міжнародного енергетичного агентства «Перспективи розвитку світової енергетики,

2004 рік» (IEA 2004) приймає річне покращення показників енергоємності в середньому по світі за 1,3-1,6% в наступні три десятиріччя. Іншими словами, в 2030 році буде створено таку ж економічну вартість (в показниках паритету купівельної спроможності), як в 2002р., з використанням на третину менше первинної електроенергії. Однак швидкий економічний розвиток на глобальному рівні більш ніж компенсує користь від підвищеної енергоефективності. На період від 2002 до 2030р. Міжнародне енергетичне агентство оцінює глобальний економічний ріст у 2,4 рази (прогнозований ріст населення в цей період складе близько 30%).

Отже, споживання енергії від первинних джерел зросте майже на 60%. Якщо ці тенденції не зміняться, в 2050 році ми матимемо споживання первинної енергії приблизно у 21 мільйон тон нафтового еквіваленту та річні викиди CO<sub>2</sub> від згоряння палива на рівні 48 мільярдів тон CO<sub>2</sub>. Однак в разі розвитку подій за сценарієм “бізнес як завжди”, великий потенціал енергоефективності не буде застосований, хоча багато з цих варіантів будуть загалом рентабельними. Jochem et al (2000) демонструє існування значного потенціалу енергоефективності (від 5 до 80%) у всіх секторах економіки й регіонах світу. Міжнародна група експертів з питань змін клімату IPCC (2001) підкреслює ключові сфери енергоспоживання, в яких існують значні можливості для більш ефективного використання енергії.

В секторах кінцевого споживання найбільш значними для підвищення енергоефективності вважаються такі ключові сфери:

- енергоспоживання в житловому секторі (включно з електроприладами), IPCC (2001) посилається на потенціал зниження викидів від 1000 до 1100мегатон (Мт) вуглецю (від 3667 до 4033Мт CO<sub>2</sub>) в період часу до 2020р.; Pacala/Socolov (2004) за скромним підрахунком припускають таку ж кількість на період до 2050р.;
- основний потенціал ефективності на промисловості вбачають в енергоефективності та покращеній ефективності виробництва, згідно з IPCC (2001) загальний потенціал зниження викидів дорівнює від 1300 до 1500Мт вуглецю ( від 4767 до 5500Мт CO<sub>2</sub>) на рік в 2020р.;
- енергоспоживання на транспорті є важливим через швидко зростаючі викиди в цьому секторі; IPCC (2001) підрахувала потенціал економії від 300 до 700Мт вуглецю (1100-2567Мт CO<sub>2</sub>) в 2020р.; Pacala/Socolov (2004) наводять цифру в 2000Мт С (7333 Мт CO<sub>2</sub>) на період до 2050р.

В цілому, якщо будуть здійснені всебічні заходи для підвищення енергоефективності в секторі кінцевого споживання, можна прийняти потенціал зниження до 2050 року в 16000Мт CO<sub>2</sub>. Це складає 40-60% розриву між сценарієм “бізнес як завжди” та радикальним зниженнями викидів, які дозволили б стабілізацію концентрації CO<sub>2</sub> в межах між 400 та 450часток на мільйон.

Одна з переваг стратегії, спрямованої на енергоефективності, це те, що багато варіантів є рентабельними з загальної точки зору, а зниження викидів можна досягти з низькими або навіть нульовими додатковими витратами. Однак основні проблеми на шляху впровадження заходів енергоефективності мають неекономічну природу. Великою проблемою стратегії з підвищення енергоефективності є різноманітні перешкоди і структурні бар'єри з одного боку (від нестачі інформації та мотивації до дилеми користувач-інвестор), а також дуже неоднорідні структури з точки зору учасників процесу, їхніх мотивацій та здібностей, з іншого.

Значні покращення енергоефективності можуть бути досягнуті за допомогою вже існуючих технологій. Більш того, технологічні та організаційні нововведення протягом часу зіграють додаткову роль. Ключова проблема політики в сфері енергоефективності – це необхідність поступового впровадження і постійних довгочасових зусиль. Особливо у сфері підвищення

енергоефективності, поетапний підхід та якнайшвидший початок будуть набагато важливішими, ніж деякі технологічні прориви. Довгостроковий акціонерний капітал, наприклад в будівельному секторі, потребуватиме якнайшвидших дій для використання всіх існуючих можливостей.

### ***Підвищення ефективності в енергетичному секторі***

Вдосконалення технології, особливо в енергетичному секторі, в останні роки досягло значних успіхів. В наступні роки й десятиліття можна очікувати додаткових досягнень енергоефективності, особливо якщо прискорити наукові дослідження та розробку проектів. Порівняно до сьогоденної середньосвітової ефективності вугільних електростанцій 30-35%, в найближчому майбутньому її можна підвищити до 50%, а для електростанцій на природному газі – до 65% (ЕК 2002). У довгостроковій перспективі, газові турбіни комбінованого циклу могли б досягти ефективності близької до 70%, а нові суперкритичні парові турбіни можуть показати практичний коефіцієнт корисної дії в 55% уже в наступні 20 років.

Набагато більше вдосконалення у високоефективному виробництві енергії може бути досягнуто за рахунок комбінованого виробництва холоду, тепла та електроенергії. Використання надлишкового тепла від виробництва електрики для опалення, промислових потреб, навіть для охолодження, могло б підняти загальну ефективність станцій когенерації до 90%. Когенерація (комбіноване виробництво електроенергії та тепла) та тригенерація (комбіноване виробництво електроенергії, тепла і холоду) можуть застосовуватись на рівні великих установок потужністю в кількості мегават для постачання тепла на промислові підприємства та котельні централізованого теплопостачання. Однак мікроустановки когенерації потужністю в кілька кіловат (Pehnt et al.2005) також мають величезний потенціал теплопостачання для високоефективних технологій.

Хоча багато з перспективних оцінок “бізнесу як завжди” враховують стабільне удосконалення електростанцій, а додатковий потенціал зниження викидів є обмеженим, все ж таки потенціал когенерації, згідно з останніми прогнозами, далеко не вичерпаний. Спрощений підрахунок підкреслює важливий потенціал когенерації і тригенерації в інтегрованій стратегії зниження рівня викидів CO<sub>2</sub>.

Якщо прийняти додаткову когенерацію енергії за 20% глобального виробництва електроенергії об'ємом у 30 000 терават-годин в 2050 році (враховуючи суттєве підвищення ККД за рахунок поліпшеної енергоефективності), це призвело б до річного зниження викидів CO<sub>2</sub> на 2 000 Мт тільки за рахунок підвищення ефективності виробництва електроенергії і без урахування додаткових результатів переходу на інші види палива.

### ***Перехід на інші види палива в енергетиці***

Згідно зі сценарієм звичайного розвитку енергетики Міжнародного енергетичного агентства (IEA 2004), виробництво енергії за рахунок викопних видів палива залишиться основним компонентом електропостачання до 2030 року. У період з 2002р. по 2030р., як очікується, вугільні електростанції розширять свої потужності з 1 135 до 2 156 ГВт, а газові електростанції, як намічено, збільшать загальну потужність з 893 до 2 564 ГВт. Протягом всього згаданого періоду це дорівнюватиме середньому річному росту 36 ГВт для антрацитного вугілля і 60 ГВт для природного газу. Якщо згадати також, що протягом наступних тридцяти років близько половини існуючих потужностей треба буде замінити новими станціями (в 2002-2030рр.), тоді щорік необхідно здавати в експлуатацію в середньому 57 ГВт нових вугільних та 76ГВт нових газових електростанцій. Якщо продовжити цю тенденцію до 2050р., нові інвестиції у вугільні

електростанції матимуть результатом близько 2 700 ГВт нових потужностей для вугільних та 3600 ГВт - для газових станцій. Рішення про побудову нових вугільних електростанцій потужністю в 1 ГВт означає рішення про викиди в атмосферу близько 4,7 мегатон CO<sub>2</sub> щорік (середній ККД для нових станцій складає 40%, а коефіцієнт навантаження - 0,63) протягом терміну роботи станцій, який становить 40 років чи більше.

Згідно з подібною оцінкою для нових інвестицій в електростанції на природному газі, щорічні викиди складуть 1,3 Мт CO<sub>2</sub> на ГВт (якщо прийняти середню ефективність за 55%, а коефіцієнт завантаження за 0,40).

Через менший вміст вуглецю в паливі та значно вищу ефективність газових електростанцій, виробництво електрики на новій газовій станції створює на 57% менше CO<sub>2</sub>, ніж нова вугільна станція. Отже, додатковий перехід з вугілля на газ в енергетичному секторі міг би відкрити значний потенціал для зниження викидів. Pacala/Socolow (2004) вважають, що заміна 28 ГВт базисної електроенергії з вугілля на газ може сприяти подальшому зменшенню обсягів викидів. Це складає близько половини річного капіталовкладення в нову вугільну електростанцію, як показано вище. Якби 50% нових інвестицій у 2000 році було перенаправлено замість вугілля на природний газ, вугільні електростанції з загальними викидами CO<sub>2</sub> обсягом у 6 300 Мт до 2050р. були б замінені газовими електростанціями з загальними викидами в 2 700 Мт CO<sub>2</sub>. Якби всі нові інвестиції у вугільні електростанції були замінені інвестиціями в природний газ, рівень викидів подвоївся б: 12 700 Мт CO<sub>2</sub> - для вугілля і 5 500 Мт CO<sub>2</sub> - для природного газу. Якщо припустити заміну 50% нових інвестицій у вугільні станції, тоді щорічний потенціал скорочення викидів до 2050 року склав би 3 600 Мт CO<sub>2</sub>.

Звичайно, додаткові інвестиції у газові електростанції вимагатимуть додаткових поставок природного газу. За приблизними оцінками, які згадані вище, додаткова потреба в газі для виробництва електроенергії складе 29 екзаджоулей (ЕДж) на 2030р. та 49 ЕДж на 2050р. Потреба в газі згідно сценарію “бізнес як завжди” Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА 2004) становитиме 176 ЕДж в 2030р. Іншими словами, потреба в природному газі збільшилася б приблизно на 16% у порівнянні зі сценарієм “бізнес як завжди”. Додаткова потреба в газі на період до 2050р. ймовірно буде тієї ж величини. В рамках сталої енергетичної стратегії така кількість природного газу компенсується підвищенням енергоефективності в інших секторах (наприклад, на будівництві), або в тому ж таки енергетичному секторі. Ключова технологія для зменшення потреби в природному газі – це когенерація, тобто комбіноване виробництво тепла та електрики, або тепла, електроенергії та охолодження (тригенерація). Якщо одна третина нових газових електростанцій використовуватиме когенерацію, додаткова потреба в газі складе близько 7%.

### ***Відновлювана енергетика***

Глобальні потоки відновлюваної енергії є на три порядки більшими, ніж сучасна і прогнозована глобальна потреба в первинній енергії (Rogner 2000). Уже тепер існують різноманітні технології для використання відновлюваних джерел енергії, а багато інших технологій знаходяться в стадії розробки. Головними проблемами на шляху масового розширення відновлюваної енергетики є такі (Rogner 2000, WBGU 2004):

- існує замало технологій використання відновлюваних джерел, які були б економічно конкурентоздатними у порівнянні з енергопостачанням від викопного чи ядерного палива в рамках сучасної економічної системи (немає інтерналізації, тобто врахування зовнішніх витрат);
- використання і економічне управління відновлюваними джерелами залежать від кількох обмежень, наприклад, конфліктів щодо землекористування (біомаса), географічної широти

(сонячна енергія), розташування на місцевості (вітрова та геотермальна енергетика), охорони природи і соціальних обмежень (гідроенергетика);

- глобальний розподіл сучасного та майбутнього енергопостачання з відновлюваних джерел є нерівномірним; потенціал відновлюваних джерел в Європі (за виключенням колишнього Радянського Союзу) й Азії є набагато меншим, ніж в обох Америках та сонячних регіонах. Відновлювана енергетика вже тепер забезпечує значну частину глобального первинного енергопостачання. Однак зараз існують численні фактори невизначеності, через те що велику частину відновлюваних джерел, що використовуються у світі, складає традиційна біомаса, яка в багатьох регіонах світу не має виробничого призначення. Більш того, використання “традиційної біомаси” (тобто дров) не можна вважати сталим у багатьох регіонах через її роль у вирубуванні лісів та розширенні пустель. Міжнародне енергетичне агентство (IEA 2004) оцінює, що на долю біомаси в 2002 році припадало близько 10% загальної первинної потреби в енергії. IEA (2004) припускає, що близько 70% глобального використання енергії біомаси припадає на “традиційну біомасу”, що, з точки зору сталої енергетики, може призвести до серйозних проблем. Взагалі використання “сучасної біомаси” для сталого енерговиробництва могло б підвищитися в шість чи більше разів, зважаючи на наявний технологічний потенціал, який відповідає вимогам сталого розвитку (Rogner 2000, WGBU 2004).

Гідроенергетика є іншим джерелом відновлюваної енергії, який на сьогодні складає істотну частину глобального первинного енергопостачання. Гідроенергетика складає 16% сучасного всесвітнього виробництва електроенергії та близько 6% глобального первинного енергопостачання.

Хоча існує значний технічний потенціал для розширення використання гідроенергетики (Rogner (2000) вказує на технічний потенціал у п'ятеро вищий, ніж сучасне використання), але поміж усіх джерел відновлюваної енергії гідроенергетика має найменший потенціал для подальшого росту.

На додачу до згаданих, кілька інших джерел відновлюваної енергії можуть зіграти значну роль для первинного енергопостачання наступних десятиліть. Підставою для такого висновку є наступне:

По-перше, вітрова електроенергетика в останні роки показала значний ріст. В період від 1990 по 2002 виробництво енергії на вітроустановках збільшилось в середньому на 30% за рік як в країнах ОЕСР, так і поза її межами (Turkenburg 2000, IEA 2005). Що стосується технологічного потенціалу майбутнього використання вітроенергетики, Rogner (2000) наводить цифру в 640ЕДж, що в сто разів перевищує сучасний рівень.

Виробництво електрики від енергії Сонця досі знаходиться на ранній стадії розвитку. Хоча виробництво електроенергії від фотоелементів за останні роки зросло на 30% (Turkenburg 2000, IEA 2005), а сонячне теплове електропостачання, як очікується, в найближчі роки покаже ще більший ріст, доля сонячної енергетики поки що дуже мала. Однак величезний потенціал електропостачання від сонця та швидкий технологічний розвиток можуть призвести до значної долі сонячної енергетики в загальному первинному енергопостачанні уже в наступні п'ять років (van der Zwaan/Rabl 2004).

Найбільший технологічний потенціал серед відновлюваних джерел належить геотермальній енергії, яка вже використовується в електроенергетиці деяких регіонів світу. Rogner (2000) вказує на потенціал в 500 ЕДж, який може стати економічно вигідним в наступні 10 або 20 років, і потенціал 5 000 ЕДж, який може стати економічно вигідним через 40-50 років.

І нарешті, кілька слів про ще одне важливе джерело, яке могло б зробити величезний вклад у глобальне первинне енергопостачання в середній та довгостроковій перспективі: океанська енергія (енергія припливів, хвиль, термальна, градієнт солоності). Rogner (2000) оцінює технічний потенціал різних видів використання енергії океану в 7 400 ЕДж.

**Таблиця 6 Сучасна і майбутня вартість виробництва електроенергії від відновлюваних джерел енергії**

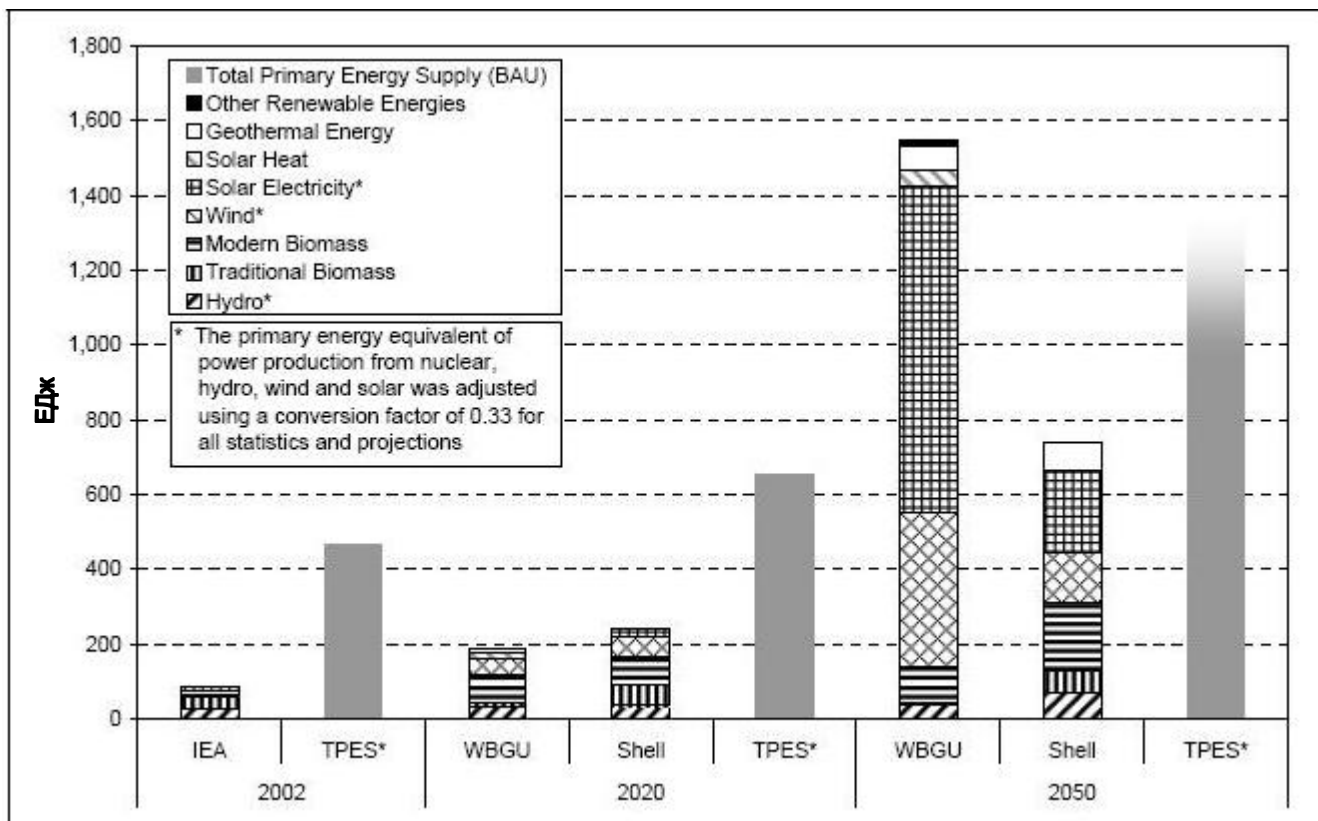
	UNDP (2000)		ICSEPT (2002)		Enquete-Kommission (2002)			
	поточна	майбутня	поточна	після 2020	поточна	2010	2020	2050
	цент/кВт-г				цент/кВт-г			
Гідроенергетика	2...10	2...10	2...10	2...10	5.5...15	-3...6	-3...6	-3...5
Берегова вітроенергетика	5...13	3...10	3...5	2...3	4.5...9	4...6	3...5.5	3...4.5
Прибережна гідроенергетика			6...10	2...5	6.3...10			
Фотоелектричні батареї	25...125	5...25	50...80a	~ 8a	50...100	29...58	12.5...25	9...18
			30...50b	~ 5b				
			20...40c	~ 4c				
Сонячні теплові електростанції	12...18	4...10	12...18	4...10	8...16		5...6	~ 4
Біомаса	5...15	4...10	5...15	4...10	3.5...30	-	-	-
Геотермальна енергія	2...10	1...8	2...10	1...8	-	-	-	-
Морська енергія	8...20	5...15						

Примітка: а 1 000 кВт-г/м<sup>2</sup> (Центральна Європа).  
 - б 1 500 кВт-г/м<sup>2</sup> (Південна Європа).  
 - с 2 500 кВт-г/м<sup>2</sup> (південні регіони).  
 -д в місцях з 2 500 кВт-г/м<sup>2</sup>

Джерело інформації: Turkenburg (2000), ICSEPT (2002), ЕК (2002).

Однак, хоча технічний потенціал використання відновлюваних джерел в електроенергетиці і є вражаючим, ключовий бар'єр на шляху більш широкого їх використання полягає в економічній конкурентноздатності. За винятком гідроенергетики та деяких видів використання біомаси, більшість технологій виробництва електроенергії з відновлюваних джерел знаходяться на ранній стадії розвитку. В тому разі, якщо дослідження й розробка таких технологій будуть прискорені, а раннє впровадження на ринок триватиме, фахівці очікують значного зниження їх вартості. Важливі висновки щодо раннього та широкого впровадження на ринок показані для багатьох варіантів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел (IEA 2000). В таблиці 5 вказані різні прогнози вартості для ключових технологій виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Цей огляд підкреслює, що в наступні два десятиліття варто очікувати значного зниження собівартості, особливо для вітрової енергетики, біомаси та геотермальної енергії. На середню й довгострокову перспективу (більш ніж 20 років) сонячна енергетика та виробництво електрики з енергії океану можуть показати особливо значне зниження вартості.

**Малюнок 6 Прогноз внеску відновлюваних джерел до загальносвітових первинних енергоресурсів, 2002-2050**



\* Еквівалент первинних енергоресурсів до виробництва електроенергії на АЕС, гідро, вітро- та сонячних установках був визначений з використанням коефіцієнту перетворення 0,33 для всіх статистичних даних та прогнозів

Джерело інформації: WBGU (2004), Shell (2002), IEA (2004), власні підрахунки.

Малюнок 6 містить огляд двох різних прогнозів майбутнього розвитку відновлюваної енергетики.<sup>9</sup> Обидва сценарії передбачають значне політичне втручання заради побудови сталої енергосистеми на глобальному рівні. В залежності від припущення щодо майбутнього загального обсягу первинних енергоресурсів, відновлювані джерела можуть забезпечити від 50 до 100% загального первинного енергопостачання. Однак це порівняння також наводить різні оцінки майбутнього внеску відновлюваних джерел. Тоді як Shell (2002) бачить порівнянний ріст використання біомаси, вітру й сонця в своєму сценарії “Дух майбутньої епохи”, WBGU (2004) припускає потенціал для набагато більш агресивного росту та технологічних проривів в сонячній та вітровій енергетиці, але менш значне зростання ролі біомаси в енергетиці. В обох прогнозах значна роль відводиться геотермальній енергії.

Підсумовуючи сказане, треба наголосити, що з технічної точки зору відновлювані джерела можуть повністю або в значній мірі забезпечити майбутню потребу в первинній енергії. Однак деякі технології, потрібні для більш широкого використання відновлюваних джерел, досі

<sup>9</sup> Для цілей даного документу дані з різних джерел були впорядковані за допомогою однієї методології. Широко використовувані статистичні дані Міжнародного енергетичного агентства беруть до уваги запас електричної енергії (3,6 Мдж/кВт-годин) гідро-, вітро- та сонячної енергії для перетворення в первинну енергію. Для атомної енергетики припускається коефіцієнт перетворення 33%, згідно з МЕА. На відміну від цього визначення, прогнози IPCC (2000) не використовують цього коефіцієнту перетворення для атомної енергії. Натомість вони використовують запас енергії. Для цілей даної роботи електрика, вироблена на ядерних, гідро-, вітрових та сонячних установках була перетворена в первинну енергію з коефіцієнтом перетворення 33% щоб уможливити справедливе порівняння внеску в первинне енергопостачання виробництва електрики від викопних видів палива, ядерної та відновлюваної енергетики.

знаходяться на ранній стадії розвитку. ІССЕРТ (2002) вказує на такі групи відновлюваних джерел для виробництва електрики:

- сформовані технології: біомаса (комбіноване спалення разом з іншими видами палива), великі та малі гідроелектричні установки, припливні загородження, автономні сонячні електроустановки;
- нові технології, що розвиваються та наближаються до статусу зрілих: берегові вітроелектростанції, фотоелектричні батареї для житлових будинків, біомаса (спалення);
- технології, що тільки створюються: прибережні вітроустановки, біомаса (газифікація);
- концептуальні технології, що існують на стадії первинного проекту: сучасні фотоелементи, енергія хвиль та припливних течій, біомаса (гідроліз), геотермальна (гаряче сухе каміння);
- концептуальні технології: фотосинтетичний водень.

Цей довгий список різних технологій пропонує достатню гнучкість для різних сценаріїв технологічного розвитку і прогресу на основі зниження вартості виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Найбільший внесок до 2020 року зроблять біомаса, вітер та гідроенергетика. На період після 2020 року ключовим питанням буде те, скільки електроенергії можна виробити завдяки сонячним технологіям, і в якій мірі можна використати вітер, геотермальну енергію та енергію океану.

Проте знадобляться великі зусилля для того, щоб покращити економічні показники різних технологій, досягти подальшого технологічного прориву та побудувати необхідну інфраструктуру. Ключове питання з точки зору інфраструктури – це переривчасте (нерівномірне) виробництво електроенергії на фотоелектричних і вітрових установках. Система електропостачання з великою долею переривчастого виробництва електрики створить кардинально нові вимоги до енергосистеми та гнучкості інших джерел енергії. Прогрес останніх років (досконалі прогностичні моделі, розвиток вискоелективних і гнучких технологій виробництва електрики на основі газу тощо) підкреслює, що інтеграцію переривчастих джерел енергії слід розглядати не як перешкоду на шляху використання широкого спектру відновлюваних джерел, а скоріше як задачу, яка потребує вирішення. Однак і для відновлюваних джерел необхідно брати до уваги екологічні та соціальні обмеження. В деяких регіонах світу існують обмеження щодо розташування вітроустановок, деяких океанських технологій (припливні загородження) чи гідроелектричних установок, оскільки можливий негативний вплив на навколишнє середовище та соціальну сферу.

На завершення теми необхідно підкреслити, що значні удосконалення технічних або економічних аспектів відновлюваної електроенергетики стимулюватимуть величезний електроенергетичний потенціал в порівняно короткий строк. Якщо істотні зниження собівартості сонячної чи навіть вітрової технології або біомаси, будуть досягнуті і якщо існуватиме необхідна інфраструктура, це призведе до дуже швидкої зміни в структурі енергосистеми. Іншими словами, внесок відновлюваних джерел до глобального первинного енергопостачання буде або і надалі залишатись на відносно низькому рівні, або у великій мірі домінуватиме в структурі первинної енергії, починаючи з середини поточного століття. Важко уявити собі “серединний шлях” для вкладу відновлюваних джерел.

### ***Поглинання та утримання вуглецю***

Однією з нещодавно винайдених технологій зменшення викидів парникових газів є поглинання та утримання вуглецю, “*carbon capture and sequestration*” (CCS). До CCS входять технології, які дозволяють збирати й концентрувати CO<sub>2</sub> з різних джерел, транспортувати його до придатних місць зберігання і тримати там протягом довгого часу. CSS може примінятись до CO<sub>2</sub> від

згоряння викопного палива або промислових процесів, з одного боку, і для викидів CO<sub>2</sub> від згоряння біомаси, з іншого. Останній варіант становив би собою чистий поглинач для викидів CO<sub>2</sub>, і має вважатися важливою частиною довгострокової кліматичної політики. Хоча деякі технології з поглинання і зберігання вуглецю вже існують, досягли стадії зрілості або економічно виправдані, необхідні подальший розвиток та вдосконалення технологій, потрібні великі зусилля для побудови комплексної системи CCS, технологічно й економічно надійної та прийнятної для громадськості. Поглинання й утримання вуглецю є об'єктом науково-дослідницької діяльності, і проходить глибокий аналіз та оцінку (див. IPCC 2005, IEA 2004b+2005b).

З економічної точки зору, поглинання CO<sub>2</sub> є ключовим для CCS. Головна проблема полягає в тому, що поглинання CO<sub>2</sub> потребує значної кількості енергії, а це знижує ефективність роботи електростанцій. Поглинання викидів CO<sub>2</sub> могло б знизити ефективність виробництва електроенергії приблизно на 10% та частково загальмувало б технічний прогрес останніх двох десятиліть. До того ж ефективне поглинання ще не означає електростанцію зовсім без викидів, тому що відсоток чистого зниження викидів CO<sub>2</sub> є між 80 і 90% навіть для найдосконаліших технологій (IPCC 2005). Поглинання вуглецю може здійснюватись на основі таких технологій:

- уловлення після згоряння,
- уловлення перед згорянням,
- поглинання за допомогою киснепаливної технології (спалення з чистим киснем),
- поглинання під час промислових процесів (наприклад, виробництва сталі чи аміаку).

В разі поглинання перед згорянням та киснепаливного поглинання технологія виробництва електроенергії повинна зазнати докорінних змін. Хоча ці технології уже існують у вигляді демонстраційних станцій (паро-газова установка з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля, ПГУ-ВЦГ) або запланованих демонстраційних проектів, поки що немає достатніх даних про те, чи виявляться ці технології успішними в промисловій експлуатації. Особливо протягом останніх двадцяти років ПГУ-ВЦГ прогнала змагання з паровими турбінами з критичними й позакритичними параметрами. Електростанції на пиловидному вугіллі зі стандартними паровими турбінами, як виявилось, набагато краще корелюють з вимогами повсякденного промислового виробництва, ніж більш новаторська й більш ефективна технологія ПГУ-ВЦГ. Для транспортування CO<sub>2</sub> можна було б розраховувати на існуючі технології (трубопроводи, вантажні перевози) і отримувати меншу собівартість, якщо відстань перевози не перевищуватиме 200 чи 300 км. Якщо необхідно покрити набагато більшу відстань між джерелом CO<sub>2</sub> та місцем його зберігання, вартість транспортування може призвести до значного подорожчання вартості виробництва енергії.

Для зберігання CO<sub>2</sub> є три основні варіанти. Поглинутий вуглекислий газ можна закачувати в геологічні утворення чи в океанські глибини (на глибину більше 1 км), або мінералізувати й зберігати на придатних для цього майданчиках. З трьох згаданих варіантів тільки зберігання в геологічних формаціях можна вважати прийнятним у світлі сучасних знань. Деякі дані свідчать про те, що закачування значної кількості CO<sub>2</sub> в океанські глибини може зашкодити морським екосистемам. Наслідки зберігання CO<sub>2</sub> в морських екосистемах для більших районів океану та на довший час в більшості своїй непередбачувані.

Насичення CO<sub>2</sub> призведе до величезних матеріалопотоків, до потреби у великомасштабному захороненні відходів та до інших екологічних проблем. Наприклад, процес карбонізації вимагав би від 1,6 до 3,7 тон силікатів на тону накопиченого CO<sub>2</sub> та виробив би 2,6-4,7 тон матеріалів, які необхідно захоронити. Ці потоки матеріалів та пов'язані з ними процеси (видобуток,

подрібнення, збагачення, транспортування і розміщення відходів) також спричинять відносно великі витрати.

В результаті, зберігання в геологічних формаціях (вичерпані нафтові та газові родовища, нерозроблювані вугільні шари, глибокі соляні шари) має розглядатись як ключовий варіант поглинання й утримання вуглецю в наступні десятиріччя. IPCC (2005) вказує, що економічний потенціал поглинання й збереження вуглецю у найближчі сто років складає від 200 до 2000 млрд. тон CO<sub>2</sub>. Нижня межа характеризується IPCC як “практично безсумнівна” (ймовірність не менше 99%), а більш висока цифра вважається значним вкладом в довгострокові зниження викидів. Однак, реальна ймовірність становить 66 – 90%, і тому поглинання й утримання вуглецю могло б скласти тимчасовий варіант пом'якшення кліматичної зміни, а місткість резервуарів повинна вважатися обмеженим ресурсом.

В таблиці 7 вказаний діапазон цін для різних компонентів системи поглинання і утримання вуглецю (CCS). У випадку зберігання в геологічних формаціях, поглинання CO<sub>2</sub> становитиме найбільш значну частину вартості. З одного боку, великі відстані для транспортування CO<sub>2</sub> можуть підвищити вартість систем CCS. З іншого боку, використання поглинутого CO<sub>2</sub> у видобутку нафти вторинним способом зі штучним підтриманням енергій родовища або видобування метану вугільного шару з використання методів інтенсифікації підвищують економічні вигоди, що може призвести до зниження вартості системи CCS. Однак можливості користуватися такими вигодами значно знизяться в рамках дуже амбіційної схеми зниження викидів. Загалом зниження витрат на CCS в межах 15-90 доларів за тону можна порівняти з багатьма відновлюваними джерелами енергії.

**Таблиця 7      Діапазон цін на компоненти системи CCS на нових великих установках**

Компоненти системи CCS		Діапазон цін	Примітки
	Поглинання з вугільної чи газової електростанції	15...75 US\$/т. CO <sub>2</sub> поглинутого газу нетто	Чиста вартість поглинутого CO <sub>2</sub> у порівнянні з того ж підприємства без поглинання
Поглинання	Поглинання з виробництва водню і аміаку чи переробки газу	5...55 US\$/т. CO <sub>2</sub> поглинутого газу нетто	Відноситься до джерел високої чистоти, що потребують простої сушки та ущільнення
	Поглинання з інших індустріальних джерел	25...115 US\$/т. CO <sub>2</sub> поглинутого газу нетто	Діапазон відображає використання ряду технологій і видів палива
Транспортування		1...8 US\$/т. CO <sub>2</sub> транспортовано	На 250км трубопроводу або перевезення для питомого масового потоку від 5 до 40Мт CO <sub>2</sub> /рік.
Зберігання	Геологічне сховище а	0.5...8 US\$/т. CO <sub>2</sub> закачаного газу нетто	Без потенціального прибутку від EOR чи ECBM
	Зберігання в геологічних формаціях: контроль і моніторинг	0.1...0.3 US\$/т. CO <sub>2</sub> закачаного газу	Включає моніторинг на всіх стадіях нагнітання, залежить від обов'язкових вимог
	Зберігання в океані	5...30 US\$/т. CO <sub>2</sub> закачаного газу нетто	Вкл. з транспортуванням на 100-50км від берега, не включає моніторинг і контроль
	Насичення вуглекислотою	50...100 US\$/т. CO <sub>2</sub> мінералізовано нетто	Включає додаткове енергоспоживання для карбонізації

Прим.: а протягом довгого часу можуть виникнути додаткові витрати на компенсацію збитків та грошову відповідальність

Джерело: IPCC (2005).

З системами CCS пов'язаний деякий ризик, особливо що стосується зберігання CO<sub>2</sub>. На глобальному рівні існує ризик потенційного витoku частини CO<sub>2</sub>, що зберігається, в атмосферу. Такий витік може додатково збільшити проблему глобального потепління. Вибір майданчиків для зберігання CO<sub>2</sub> має відбивати необхідність зберігання CO<sub>2</sub> в резервуарах на термін від 100 до 1000 років. Що стосується ризику на місцевому рівні, несподіваний і швидкий викид вуглекислого газу (в результаті аварії на свердловині тощо) може означати небезпеку для життя людей. Поступові, розсіяні витoki можуть зашкодити підземним водам та екосистемам, або викликати окислювання ґрунтів. Багато з цих видів ризику можна врахувати, належним чином вибираючи і проектуючи майданчики для зберігання, а також здійснюючи стратегію всебічного моніторингу та виправлення помилок.

Хоча вищезгаданий ризик і не слід недооцінювати, існують деякі шляхи його зниження. Проте необхідно розв'язати широке коло проблем, щоб зміцнити позиції CCS в якості ефективного варіанту амбіційного плану зі зменшення обсягів викидів. Крім технологічних, економічних аспектів та проблем із забезпеченням безпеки, необхідно також вирішити великі складнощі з відповідальністю, правом власності, правовими межами, моніторингом та контролем, перш ніж CCS можна буде вважати ефективним варіантом зниження рівня викидів.

Широко розрізняються оцінки вкладу CCS у глобальне зниження викидів на період наступних п'яти десятиліть. IPCC (2005) вказує на те, що більша частина CCS буде введена в дію у другу половину цього століття. Для порівняння, WBGU (2004) очікує від CCS значного щорічного внеску в зниження викидів (> 15 Гт CO<sub>2</sub>) уже в 2050 році. Pacala/Socolow (2004) припускає, що в середині поточного століття відбудеться зниження викидів на 3,7 Гт CO<sub>2</sub> з базисних вугільних електростанцій потужністю 800 МВт та електростанцій на природному газі потужністю 1600 МВт, обладнаних CCS.

Якщо технічний розвиток отримає масивний поштовх вперед, а добре знайомі проблеми (надійність резервуарів, інфраструктура, юридичні питання тощо) будуть розв'язані, CCS отримає широке визнання. Тоді ця технологія могла б додати кілька мільярдів тон до зменшення викидів вуглекислого газу до 2050 року. На початковій стадії введення в дію CCS відбудеться в індустріалізованих країнах; розповсюдження його у світі залежатиме від багатьох факторів (інфраструктура, організаційний фактор тощо). Однак необхідно врахувати, що CCS тільки починає свій розвиток у якості варіанту зменшення викидів, хоча він і заснований на зрілих компонентах.

### ***Попередні висновки***

Розуміння того, що жоден варіант пом'якшення проблеми глобального потепління не буде достатнім для досягнення необхідного зменшення викидів для стабілізації концентрації в атмосфері парникових газів на такому рівні, який обмежить глобальне потепління до прийнятної величини, є загальним для учасників кліматичних дебатів. Питання ж про те, чи можна усунути той чи інший варіант з комплексу заходів, є складним та спірним.

Якщо припустити, що розрив між тенденцією “бізнес як завжди” та необхідним зниженням викидів CO<sub>2</sub> (наприклад, для мети обмеження потепління до 2°C), який необхідно подолати, становитиме між 25 і 40 Гт CO<sub>2</sub> в 2050р., то приблизна оцінка різних варіантів пом'якшення покаже такі результати:

- близько 5 ГТ CO<sub>2</sub> в результаті розширення атомної енергетики втрічі у порівнянні з сьогоdnішнім рівнем потужності;
- близько 4 ГТ CO<sub>2</sub> як результат покращеної енергоефективності житла;

- близько 5 ГТ CO<sub>2</sub> через підвищення енергетичної й матеріальної ефективності у промисловому секторі;
- близько 7 ГТ CO<sub>2</sub> через покращення енергоефективності на транспорті;
- близько 2 ГТ CO<sub>2</sub> завдяки підвищенню енергоефективності в енергетичному секторі (не враховуючи переходу з вугілля на газ);
- близько 3,6 ГТ CO<sub>2</sub> від переходу з вугілля на газ в електроенергетичному секторі;
- близько 15 ГТ CO<sub>2</sub> (чи більше) від використання відновлюваних джерел (у виробництві як електрики, так і тепла);
- від 4 до 10 ГТ CO<sub>2</sub> від поглинання і зберігання вуглекислого газу.

В сумі це дає зменшення об'ємів викидів парникових газів в кількості між 45 та 55 ГТ CO<sub>2</sub> (у порівнянні зі звичайним розвитком подій) до 2050р. В таких умовах внесок атомної енергії не можна розглядати як незамінний, навіть в рамках дуже радикальної стратегії зниження викидів. Однак, будь-якому варіанту в різній мірі властиві невизначеність, ризик та взаємодія.

- Хоча глобальне потепління та ядерна енергетика пов'язані з різними видами ризику, між цими двома проблемами існує серйозне протистояння. Хоча необхідно констатувати деякий ризик для здоров'я та екосистем, властивий окремим варіантам зменшення викидів (від відновлюваних джерел до CCS), жоден інший варіант не несе такого ризику для здоров'я людей, екосистем, соціально-економічних систем, який доводиться визнати для атомної енергії.
- На противагу відновлюваним джерелам та CCS, варіант розвитку атомної енергетики має міцні зв'язки з системою енергопостачання такою як вона є сьогодні, принаймні на найближче майбутнє. Відновлювані джерела та CCS потребують фундаментальної зміни електросистеми (нові базові технології, істотна зміна географічної структури, інтеграція енергосистем тощо). Однак якщо ядерна енергія має зробити істотний внесок до зниження викидів, тоді за два-три десятиліття знадобляться значні зміни в технологічному ланцюгу (регенерація ядерного палива, реактори-розмножувачі). Залишається невизначеним, чи можливо це взагалі.
- Зміни в технологічному ланцюгу ядерної енергетики потребують тривалої підготовки (від видобутку палива до захоронення відходів), і для того, щоб вчасно підготувати всі ланки ланцюгу, необхідно спершу точно визначити всі невідомі фактори.
- Вимоги, які поставить значна доля відновлюваних джерел та CCS в енергопостачанні (підвищена маневреність, поєднання децентралізації з централізацією, управління переривчастим виробництвом електрики, покращення інфраструктури електроенергії та викидів) могли б вступити в конфлікт з вимогами розширеної атомної енергетики (великі установки, централізована структура енергосистеми, низька маневреність).
- Єдиний варіант пом'якшення проблеми зміни клімату, що має подібні зв'язки з існуючою системою енергопостачання, це перехід на інше паливо та підвищення ефективності в енергетичному секторі (включно з когенерацією). Хоча їхній внесок обмежений часом, ці два варіанти могли б зіграти ключову роль у початку зміни енергетичної системи.
- Найбільш ефективні з економічної точки зору варіанти пом'якшення (різні методи підвищення енергоефективності) потребують всестороннього політичного втручання, щоб прибрати численні бар'єри на шляху реалізації заходів з підвищення енергоефективності. Це відрізняється від короткострокової реалізації заходів енергетичного сектору. Достатній рівень цін на викиди CO<sub>2</sub> (а також відповідний дизайн схеми торгівлі відходами тощо) міг би призвести до необхідних заходів.
- Варіанти пом'якшення на середній термін (деякі відновлювані джерела, CCS) не є конкурентоздатними у порівнянні з ядерною енергією у короткий строк, якщо не приймаються до розрахунку зовнішні витрати ядерної енергії (фінансова відповідальність та страхування, кошти на вивід станції з експлуатації та інше) або якщо існують інші похибки (прямі та непрямі субсидії). Якщо ядерній енергетиці потрібно здійснювати прогрес протягом наступних десятиліть (а інакше її внесок в зниження викидів був би зовсім незначним), перед нею

постануть значні економічні проблеми, пов'язані з необхідністю змін у технологічному ланцюгу. З цієї точки зору ядерний шлях може виявитися хибним.

- Жодна інша технологія в портфелі варіантів пом'якшення проблеми не показує подібного потенціалу мобілізації.

В разі, якщо на ядерному підприємстві відбудеться одна чи більше аварій (це стосується заводів зі збагачення, переробки та захоронення ядерного палива), схвалення ядерного шляху буде визнано необґрунтованим у дуже короткий час. А це було б згубним для кліматичної політики, якщо ядерна енергія дійсно покликана зробити значний внесок у зменшення викидів.

Якщо врахувати всі ці складні взаємодії, то стає очевидною необхідність ретельного плану стратегії на короткий та довгий термін. Якщо не вважати ядерну енергію незамінною у короткий строк (що витікає з попереднього аналізу), то в наступні двадцять чи тридцять років необхідно зосередитись на переході з вугілля на газ у сполученні разом зі значними зусиллями підвищення енергоефективності на виробництві та у споживанні електроенергії. Це можна вважати перехідним періодом до того часу, коли досвід розвитку відновлюваних джерел допоможе значно знизити їхню вартість, а науково-дослідницькі роботи з поглинання і утримання вуглецю принесуть свої результати.

## **6 Ключові стратегії: вивчення німецького прикладу**

Для того, щоб оцінити розмаїття варіантів зниження викидів та стратегій для високорозвинених індустріалізованих країн, спеціальна комісія німецького Бундестагу (Enquete-Kommission) вивчала питання про “Сталу енергетику в рамках глобалізації та лібералізації” та замовила моделювання. Метою її було проаналізувати різні стратегії зниження викидів CO<sub>2</sub> на 80% (у порівнянні з рівнем 1990 року) до 2050 року (ЕК 2002).

Головна мета моделювання полягала в тому, щоб встановити модель енергопостачання та його наслідків в рамках радикальної цільової кліматичної політики. Під час проведення аналізу були розроблені чотири різні сценарії (які пройшли всебічний аналіз):

- В “Стандартному сценарії” була продовжена існуюча політика, і не було зроблено жодного кроку в бік радикальної кліматичної політики на період після 2012р.
- В сценарії під назвою “Відновлювані джерела та енергоефективність” було поставлене завдання знизити викиди CO<sub>2</sub> на 80% без допомоги поглинання і утримання вуглецю й атомної енергії (у відповідності до сучасної стратегії щодо виводу ядерної енергії з експлуатації в Німеччині).
- До сценарію „Центр уваги на енергетиці” був додатково включений варіант поглинання і утримання вуглецю.
- В сценарії “Енергетична суміш викопного палива і ядерної енергії” на додаток до інших варіантів вирішення проблеми була додана ядерна енергія.

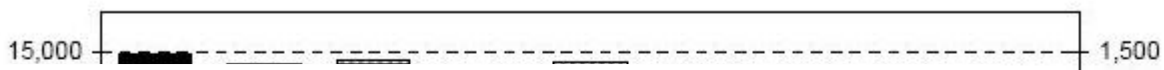
Вправа з моделювання виконувалась з використанням різних моделей імітацій та оптимізації, щоб гарантувати надійні результати. На мал.7 наводиться огляд результатів моделювання. В разі розвитку подій за сценарієм “бізнес як завжди” можна побачити невелике зниження первинного енергопостачання, а викиди CO<sub>2</sub> знижуються на 29% у порівнянні з рівнем 1990р., складаючи додаткове зниження викидів приблизно на 10% у порівнянні з 1998р. Структура первинного енергопостачання зберігається більш-менш незмінною, із зниженням споживання нафтопродуктів та невеличким збільшенням відновлюваних джерел. Ці тенденції розвитку впливають з демографічних тенденцій та закономірного покращення енергоефективності в національній економіці.

Якщо необхідно досягти зниження викидів на 80% (у порівнянні з рівнем 1990 року) за допомогою покращеної енергоефективності та підвищення використання відновлюваних джерел, первинне енергопостачання значно знизилося б. У порівнянні з контрольним сценарієм, ефективне використання енергії принесло б 13% зниження викидів. Близько 48% загального первинного енергопостачання забезпечувалось би відновлюваними джерелами. Найбільший внесок зробили би біомаса і вітрова енергетика. Використання вугілля (антрацит та лігніт) можна було б закінчити до 2030р., використання природного газу й нафти значно знизилися б. Однак природний газ і нафта все ще складали б 40% загального первинного енергопостачання в 2050р. Необхідно згадати, що через географічне розташування Німеччини, імпорт електроенергії з регіонів із більш привабливим потенціалом відновлюваних джерел склав би до 9% загального первинного енергопостачання.

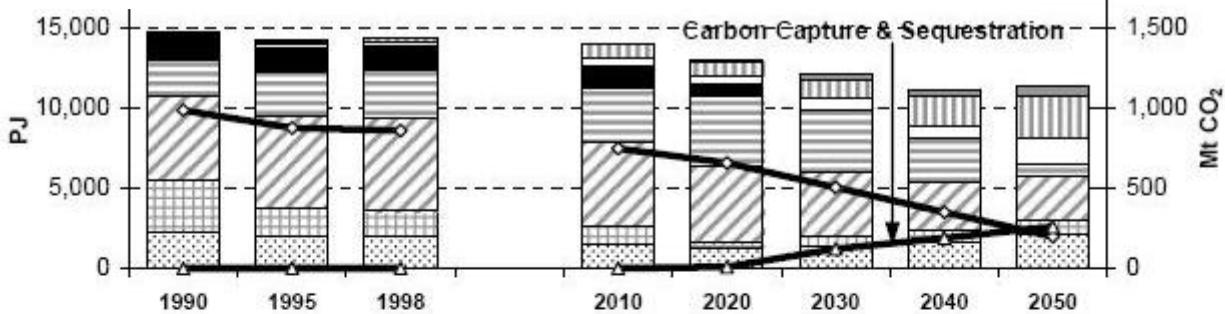
**Малюнок 7 Загальне первинне енергопостачання і викиди двоокису вуглецю, сценарії з дослідження на прикладі Німеччини**

a)

Reference Scenario

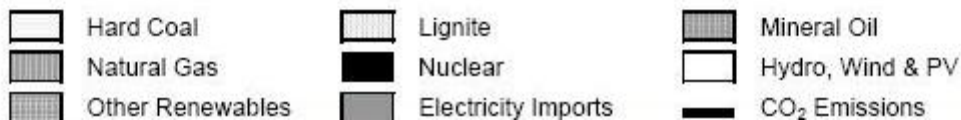
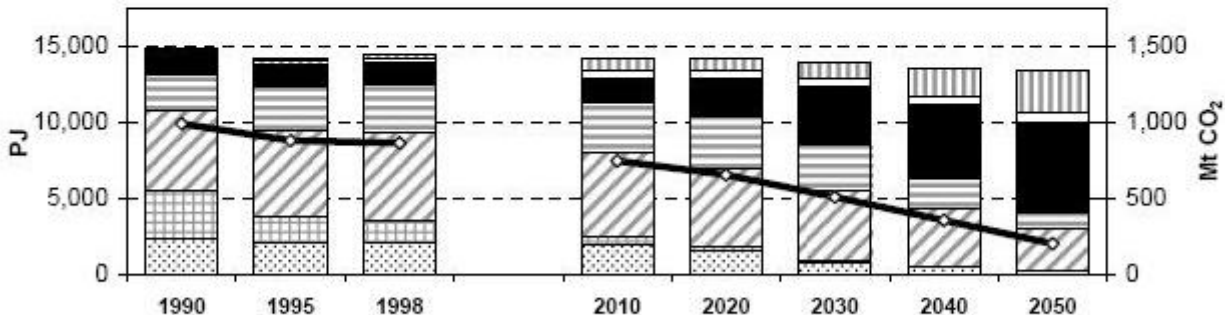


### с) Зниження викидів CO<sub>2</sub> на 80% - Focus: Поглинання й утримання вуглецю



d)

### 80% CO<sub>2</sub> Emission Reduction - Focus: Nuclear Energy



Джерело: ЕК (2002).

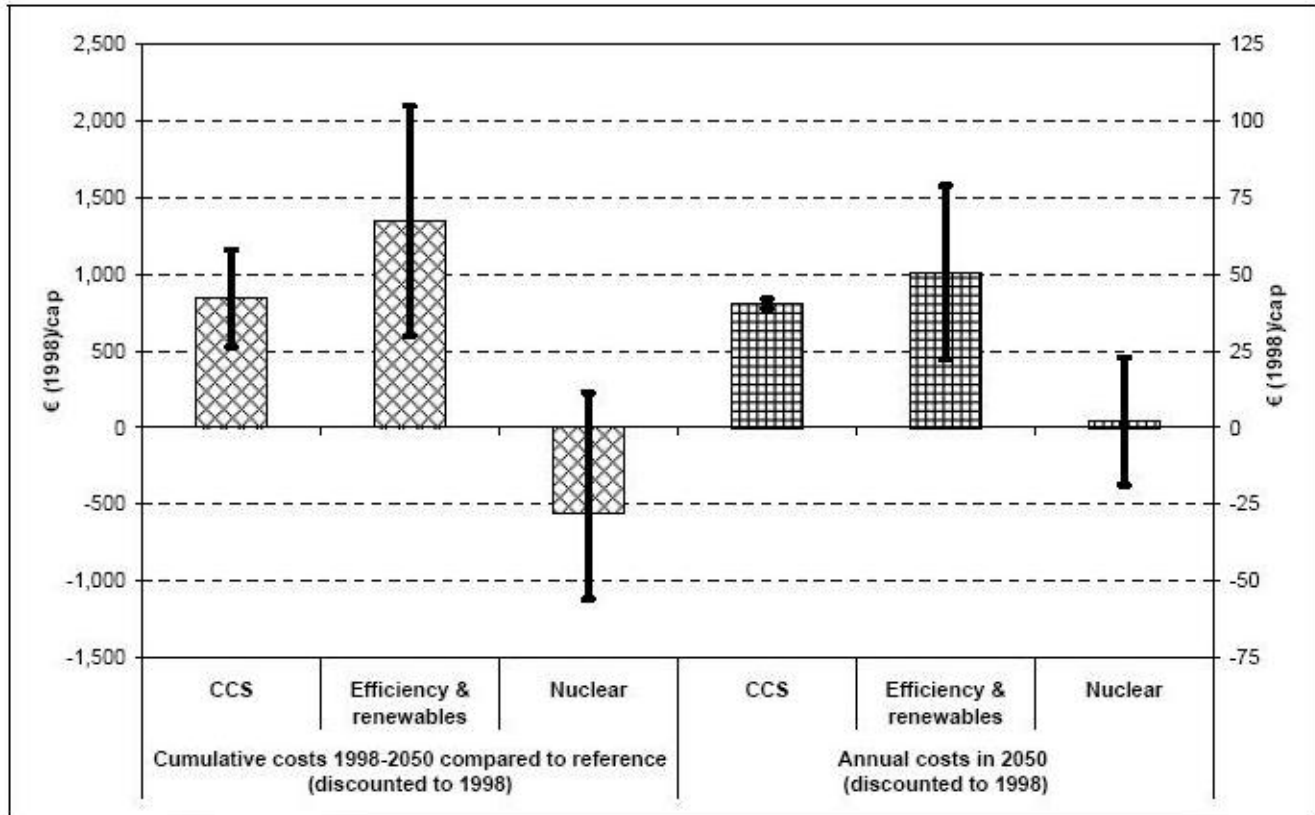
Якщо враховувати CCS, структура первинного енергопостачання буде зовсім іншою. Хоча зроблено припущення, що здійснені значні зусилля для підвищення ефективності в енергоспоживанні, рівень загального первинного енергопостачання лише на 4,5% нижчий, ніж у контрольному сценарії. Це пояснюється, головним чином, додатковим попитом на енергію в результаті поглинання й утримання вуглецю (CCS), яке почнуть вводити в дію у 2030 році, і яке могло б регенерувати близько 260 Мт CO<sub>2</sub> до 2050р. Однак, доля відновлюваних джерел згідно з цим сценарієм також значно виросте і досягне 38% в 2050р. Уважне ставлення до CCS поверне привабливість вугіллю як сировині для виробництва електроенергії. Значення природного газу в структурі первинного енергопостачання у великій мірі буде нівельоване енергоефективністю та відновлюваною енергією.

Якщо стратегія зниження викидів зосереджується в основному на ядерній енергії, у 2050р. цей вид енергії домінуватиме в енергопостачанні. Ядерна енергія повністю замінила б використання вугілля, а CCS не могло б з нею змагатись. По контрасту з CCS, деякі відновлювані джерела будуть привабливими (головним чином біомаса та вітроенергетика) та забезпечуватимуть 23% енергопостачання. Загальний рівень первинного енергопостачання є вищим, ніж у контрольному сценарії. Це пояснюється, головним чином, перетворенням електрики в первинну енергію з низьким переводним коефіцієнтом 33% (іншими словами, це статистичний феномен), але також тим, що не робилось жодних подальших політичних зусиль для підвищення енергоефективності в енергетиці та споживанні. Нафта і природний газ в цьому сценарії відіграють лише невелику роль, транспортний сектор у більшій чи меншій мірі перейшов на водень, вироблений на атомних станціях.

Як показано в аналізі сценаріїв, стратегія зниження викидів не дуже залежить від потенціалів

різних комплексів заходів з пом'якшення. Крім ядерного сценарію (де можна було б підняти серйозні питання незалежно від того, чи вважати такий розвиток подій можливим), розмаїття варіантів пом'якшення робить можливими різні інші стратегії. Іншими словами, комплекс шляхів зменшення викидів включає навіть більше варіантів, ніж необхідно для їх зменшення на 80% до 2050р.

**Малюнок 8 Кумулятивна вартість та щорічні витрати на душу населення для різних сценаріїв**



Джерело: ЕК (2002).

Стосовно витрат, пов'язаних з різними сценаріями (мал.8), можна зробити два основні висновки. По-перше, для всіх сценаріїв існують різні значні невизначені моменти. Через те, що різноманітні технології, використані в сценарії, сфокусовані на енергоефективності та відновлюваних джерелах енергії, розкид цін є ширшим за ті сценарії, в яких домінують одну технологію. По-друге, у порівнянні з загальною вартістю системи, вартість зниження атмосферного забруднення є немалою, але все ж таки прийнятною. У порівнянні з валовим внутрішнім продуктом (ВВП, в реальному обрахуванні), вартість пом'якшення в 2050р. досягне максимального рівня у 2%. Оцінка ядерного сценарію залежить у великій мірі від припущень щодо майбутньої вартості ядерних технологій. Якщо аналіз ґрунтується на доволі "оптимістичних" припущеннях, використання ядерної енергії є привабливим. Якщо обрати більш "песимістичні" параметри, то витрати будуть порівнянними з іншими сценаріями. Однак, якщо на додаток до проблеми зміни клімату врахувати ще й зовнішні витрати ядерної енергії (де існує широкий спектр припущень і немає консенсусу), різниця у вартості між ядерним та іншими сценаріями дуже скорочується або навіть свідчить про перевагу без'ядерних сценаріїв.

Хоча не всі результати німецького моделювання можна екстраполювати на інші країни та регіони, і такі довгострокові прогнози відрізняються невизначеністю та вразливістю для критики, все ж таки можна зробити деякі загальні висновки:

- Існує багато варіантів пом'якшення глобального потепління, які дозволяють відібрати найбільш життєздатні стратегії для амбіційного зниження викидів. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії зіграють свою роль в кожній стратегії, і немає жодної причини, з якої ядерна енергія була б незамінною.
- Вартість заходів зі зменшення забруднення є важливим фактором для досягнення радикальних цілей скорочення викидів, але тільки якщо в 2050р. вона не перевищуватиме 2% ВВП, ці витрати будуть прийнятними у порівнянні з вартістю наслідків глобального потепління. Рівень зменшення викидів матиме набагато більший вплив на загальну вартість зниження забруднення атмосфери, ніж конкретний склад комплексу шляхів пом'якшення глобальної зміни клімату.
- Крім ризику глобального потепління та вартості зменшення викидів, необхідно прийняти до уваги й інші ризики. Існує достатньо ступенів свободи, щоб втілити в життя загальну стратегію мінімізації ризику.

Тривала дискусія про величину зовнішніх витрат глобального потепління і ядерної енергії вказує, що суттю проблеми є питання ціни. Це повинно стосуватись не тільки проблеми глобального потепління. Стратегія мінімізації ризику з радикальними цілями щодо зниження викидів і виводом з експлуатації атомних станцій є можливою з точки зору потенціалу та прийнятною з точки зору вартості. Специфічна структура ризику, властивого ядерній енергії, зробить цільові кліматичні стратегії набагато більш вразливими щодо надійності та новаторства, необхідного для того, щоб ядерна енергія внесла значний вклад в дану стратегію.

## **7 Висновки**

Глобальне потепління є, ймовірно, однією з найбільш значних проблем XXI-го століття. Величина потенціальних збитків та довгостроковий характер наслідків і відповідних дій складають особливу модель ризику (тип "Касандра"). Однак зміна клімату є не єдиною великою небезпекою для здоров'я, екосистеми, соціальних та фінансових структур. Потенційні наслідки використання ядерної енергії (катастрофічні аварії, захоронення відходів, розповсюдження ядерної зброї тощо) відносяться до іншого типу ризику ("Дамокл"), і також мають вивчатися з усією серйозністю. Учасникам кліматичних дебатів вцілому притаманне розуміння того, що жоден захід із пом'якшення проблеми зміни клімату сам по собі не допоможе досягнути зниження рівня викидів, необхідного для стабілізації концентрації парникових газів в атмосфері на рівні, який дозволив би обмежити глобальне потепління до прийнятних масштабів. Набагато більш складним і неоднозначним є питання про те, чи можна і чи необхідно виключити з комплексу заходів з пом'якшення глобального потепління один окремих варіант, такий як ядерна енергія. Аналіз взаємодій між різними варіантами пом'якшення показує, що, крім того, що ядерна енергія не є незамінною в складі радикальних стратегій зі зменшення обсягів викидів, ядерний шлях може, до того ж, виявитись хибним шляхом і створити серйозні перешкоди:

- Деякі вимоги до інфраструктури та гнучкості електросистеми на основі відновлюваних джерел та CCS можуть конфліктувати з вимогами ядерної електроенергетики в разі її розширення.
- Хоча в середньостроковій перспективі можна очікувати технологічних вдосконалень та зниження вартості відновлюваних джерел і CCS, в той же час ядерна енергетика зіткнеться з додатковими фінансовими навантаженнями, якщо необхідні будуть фундаментальні зміни в ядерному ланцюгу через дефіцит ресурсів, невирішені проблеми відходів тощо.
- Найбільш важливі внески до істотного зниження викидів з точки зору економічної ефективності надійдуть від значного підвищення енергоефективності як у виробництві, так і в кінцевому споживанні електроенергії. Для подолання численних перепон та бар'єрів необхідні довгострокові політичні зусилля. Прихильники ядерної енергії часто замовчують цю необхідність.

Якщо врахувати всі ці складні взаємодії, стає потрібним та можливим ретельне планування стратегії на короткий, середній та довгий період часу. Якщо не вважати ядерну енергію незамінною протягом найближчого часу, то потрібно зосередитись на переході з вугілля на газ в електроенергетиці протягом наступних двох чи трьох десятиліть, в комбінації з підвищенням енергоефективності на виробництві та у споживанні електроенергії. Можна розглядати цей період як міст до того часу, коли прогрес у розвитку відновлюваних джерел енергії дозволить суттєво знизити їхню вартість, з одного боку, а науково-дослідницькі зусилля у відношенні до поглинання й утримання вуглецю принесуть свої результати, з іншого боку. Представлений в цій статті аналіз указує на те, що загальна стратегія максимального зниження ризику могла б бути розроблена і втілена в життя.

Радикальні цілі зі зниження викидів можуть бути виконані або за допомогою ядерної енергетики, або без неї, за рахунок витрат, які не перевищують можливостей сучасного суспільства. В рамках необхідної і фундаментальної трансформації глобальної енергетичної системи кліматична стратегія без ядерної енергії є, ймовірно, найбільш прогресивною і життєздатною з усіх.

## 8 Список літератури

- Blasing, T.J.; Jon, S. (2005): Current Greenhouse Gas Concentrations. Updated February 2005. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory ([http://cdiac.esd.ornl.gov/pns/current\\_ghg.html](http://cdiac.esd.ornl.gov/pns/current_ghg.html))
- Ecofys (2004): Options for the second commitment period of the Kyoto Protocol. Report for the German Federal Environmental Agency. Cologne, November 2004.
- EK (Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung" des 14. Deutschen Bundestages) (2002): Bericht der Enquete-Kommission. Bundestags-Drucksache 14/9400.
- Ewers, H.-J.; Rennings, K. (1991): Die volkswirtschaftlichen Kosten eines Super-GAUS' in *Biblis. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht*, 4/1991, 379-396.
- Ewers, H.-J.; Rennings, K. (1994): Economics of Nuclear Risks – A German Study. In: Hohmeyer/Ottinger: *Social Costs of Energy – Present Status and Future Trends*. Proceedings of an international Conference, Racine, Wisconsin, September 8-11, 1992.
- Frogatt, A. (2005): Nuclear Reactor Hazards. Nuclear Issues Paper No. 2. Berlin: Heinrich Böll Foundation.
- Hare, B., Meinshausen, M. (2004): How much warming are we committed to and how much can be avoided? PIK Report Nr. 93. Potsdam: PIK.
- ICCEPT (Imperial College Centre for Energy Policy and Technology) (2002): Assessment of Technological Options to Address Climate Change. A Report for the Prime Minister's Strategy Unit. London, December 20, 2002.
- IEA (International Energy Agency) (2000): Experience Curves for Energy Technology Policy. Paris: OECD/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2004a): World Energy Outlook 2004. Paris: OECD/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2004b): Prospects for CO<sub>2</sub> Capture and Storage. Paris: OECD/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2005a): Electricity Information 2005. Paris: OECD/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2005b): Legal Aspects of Storing CO<sub>2</sub>. Paris:

OECD/IEA.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000): Special Report Emissions Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): Climate Change 2001: Mitigation. A Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005): IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage.

Jochem, E. (2000): Energy End-Use Efficiency. In: UNDP/UNDESA/WEC: Energy and the Challenge of Sustainability. World Energy Assessment. New York: UNDP, 173-217.

Kreusch, J.; Neumann, W.; Appel, D.; Diehl, P. (2005): The nuclear fuel cycle. Nuclear Issues Paper No. 3. Berlin: Heinrich Böll Foundation.

Lovins, A.B. (2005): Nuclear power: economics and climate-protection potential. Rocky Mountain Institute ([www.rmi.org/sitepages/pid171.php@E05-08](http://www.rmi.org/sitepages/pid171.php@E05-08))

Marland, G.; Boden, T.A.; Andres, and R. J. (2005): Global, Regional, and National CO<sub>2</sub> Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

Meinshausen, M. (2005): On the risk of overshooting 2°C. Scientific Symposium “Avoiding Dangerous Climate Change” Exeter, Met Office, UK, 2 February 2005.

Meinshausen, M.; Hare, B.; Wigley, T.M.L.; van Vuuren, D.; den Elzen, M.G.J., and Swart, R. (2005): Multi-gas emissions pathways to meet climate targets. Climatic Change, forthcoming.

Nassauer, O. (2005): Nuclear energy and proliferation. Nuclear Issues Paper No. 4. Berlin: Heinrich Böll Foundation.

NERAC (Nuclear Energy Research Advisory Committee) (2002): A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Washington, D.C.: US DOE NERAC.

Pacala, S.; Socolow, R. (2004): Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. Science 305 (2004) 968-972.

Pehnt, M.; Cames, M.; Fischer, C.; Praetorius, B.; Schneider, L.; Schumacher, K.; Voß, J.-P. (2005): Micro Cogeneration. Towards decentralized energy systems. Berlin/Heidelberg: Springer.

Price, R.R.; Blaise, J.R.; Vance, R.E. (2004): Uranium production and demand. Timely mining decisions will be needed. NEA News 2004 – No. 22.1.

Rogner, H.-H. (2000): Energy Resources. In: UNDP/UNDESA/WEC: Energy and the Challenge of Sustainability. World Energy Assessment. New York: UNDP, 135-171.

Rothwell, G.; van der Zwaan, B. (2003): Are light-water reactor energy systems sustainable? The Journal of Energy and Development 29 (2003) No. 1, 65-79.

Sailor, W.C.; Bodansky, D.; Braun, C.; Fretter, S., and van der Zwaan, B. (2000): A Nuclear Solution to Climate Change?. Science 288 (2000) 1177-1178.

Schrattenholzer, L.; Miketa, A.; Riahi, K.; Roehrl, R.A. (2004): Achieving a Sustainable Global Energy System. Identifying possibilities using long-term Energy Scenarios. ESRI Studies on the Environment, Cheltenham: Edgar Elgar.

Shell (2002): Energy Needs, Choices and Possibilities Scenarios to 2050. Scenarios to 2050. Shell International.

Thomas, S. (2005): The economics of nuclear power. Nuclear Issues Paper No. 5. Berlin:

Heinrich Böll Foundation.

Turkenburg, W.C. (2000): Renewable Energy Technologies. In: UNDP/UNDESA/WEC: Energy and the Challenge of Sustainability. World Energy Assessment. New York: UNDP, 219-272.

UNDP (United Nations Development Programme)/UNICEF (United Nations Children's Fund) (2002): The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident. A Strategy for Recovery. A Report Commissioned by UNDP and UNICEF with the support of UN-OCHA and WHO. New York: UNDP.

van der Zwaan, B.; Rabl, A. (2004): The learning potential of photovoltaics: implications for energy policy. Energy Policy 32 (2004) 1545-1554.

van der Zwaan, B.C.C. (2002): Nuclear energy: Tenfold expansion or phase-out? Technological Forecasting & Social Change 69 (2002) 287-307.

WBGU (German Advisory Council on Global Change) (2000): Strategies for Managing Global Environmental Risks. Berlin/Heidelberg: Springer.

WBGU (German Advisory Council on Global Change) (2003): Climate Protection Strategies for the 21st Century: Kyoto and beyond. Special Report. Berlin: WBGU.

WBGU (German Advisory Council on Global Change) (2004): Towards Sustainable Energy Systems. London: Earthscan.

## СКОРОЧЕННЯ

CCS	поглинання і утримання вуглецю (carbon capture and storage)
CO <sub>2</sub>	вуглекислий газ, двоокис вуглецю
ECBM	добування метану вугільного шару з використання методів інтенсифікації (enhanced coalbed methane recovery)
EOR	видобуток нафти вторинним способом зі штучним підтриманням енергій родовища (enhanced oil recovery)
IEA	Міжнародне енергетичне агентство (МЕА)
IPCC	Міжнародна група експертів з питань змін клімату (МГЕЗК)
SO <sub>2</sub>	сірчистий газ, двоокис сірки
UNFCCC	Рамкова Конвенція ООН зі зміни клімату (РКЗК ООН)
WBGU	Німецька консультативна рада з глобальних змін
ВВП	валовий внутрішній продукт
Вт	Ват
Гт	гігатона (мільярд тон)
км	Кілометр
м <sup>2</sup>	квадратний метр
Мт	мегатона (мільйон тон)
ОЕСР	Організація економічного співробітництва і розвитку
ПГУ-ВЦГ	паро-газова установка з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля
р.	Рік

CCS	поглинання і утримання вуглецю (carbon capture and storage)
t	Тона
TВт-год	терават-годин (мільярд кіловат-годин)

## ***Фундація Генріха Бьоля***

Розташована в центрі Берліну Фундація Генріха Бьоля, що належить до Партії зелених Німеччини, є юридично незалежним політичним фондом, який працює в дусі інтелектуальної неупередженості.

Основною метою фундації є підтримка політичної освіти як в Німеччині, так і за її межами, заради розвитку демократії, соціально-політичного активізму та взаєморозуміння між різними культурами.

Фундація також надає підтримку мистецтву і культурі, науковим дослідженням та співпраці у сфері розвитку. Фундація керується у своїй діяльності такими фундаментальними політичними цінностями, як екологія, демократія, солідарність та ненасильство.

З допомогою міжнародної співпраці з великою кількістю партнерів по проектах (наразі в майже 60 країнах виконуються близько 100 проектів) Фундація намагається зміцнити екологічний та громадський активізм на світовому рівні, поглибити обмін ідеями та досвідом, а також залишатись відкритими до змін.

Співробітництво Фундації Генріха Бьоля із закордонними партнерами в рамках соціально-політичних освітніх програм триває протягом довгого часу. Додаткові важливі інструменти міжнародної співпраці включають програми візитів, які посилюють обмін досвідом та політичні зв'язки, а також початкові та поглиблені навчальні програми для активістів.

Персонал Фундації складається з близько 180 осіб. Існує також коло підтримки з 320 осіб, які надають як фінансову, так і нематеріальну допомогу. Ральф Фюкс і Барбара Унмюсиг складають раду директорів, а доктор Біргіт Лаубах є головним адміністратором фонду.

Ще дві організації, що входять до фундації, займаються освітньою роботою. Це “Зелена академія” та “Феміністичний інститут”.

На даний час фонд утримує офіси в США, на арабському Близькому Сході, в Афганістані, Боснії-Герцеговині, Бразилії, Грузії, Індії, Ізраїлі, Камбоджі, Кенії, Лівані, Мексиці, Нігерії, Пакистані, Південній Африці, Польщі, Росії, Сальвадорі, Сербії, Таїланді, Турції, Хорватії, Чехії, та в штаб-квартирі ЄС в Брюсселі. На 2005р. у розпорядженні фонду є майже 36 мільйонів євро з недержавних фондів.

[www.boell.de](http://www.boell.de)

ЯДЕРНА ЕНЕРГІЯ: МІФ І РЕАЛЬНІСТЬ - Публікація Фондацією Генріха Бюлля шести тематичних досліджень з питань ядерної енергії є внеском у дебати щодо майбутнього ядерної енергії. Публікація співпадає з двадцятою річницею Чорнобильської аварії. Проблемні статті дають найсучасніший огляд недавніх подій і дискусій, які торкаються використання ядерної енергії у глобальному масштабі. Їх метою є надання кваліфікованого аналізу для осіб, які приймають рішення, журналістів, активістів і широкої громадськості.

***Проблеми ядерної енергії***

*Серія тематичних досліджень*

***( Nuclear Issues Paper Series )***

Редактор: Фелікс Крістіан Маттес

*Атомна енергія: міф і реальність.* Г. Розенкранц

*Небезпека ядерних реакторів.* Е. Фроггатт

*Ядерний паливний цикл.* Й. Кройш, В. Нойман, Д. Аппель, П. Диль

*Ядерна енергія та розповсюдження ядерної зброї.* О. Нассауер

*Економіка ядерної енергії.* С. Томас

*Ядерна енергія та зміна клімату.* Ф. Маттес