

# I. УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ, ДОБРО УПРАВЛЕНИЕ И ПОЛИТИКИ ЗА СМЕКЧАВАНЕ НА КЛИМАТИЧНИТЕ ПРОМЕНИ

## 1. СОЛИДНА СТРАТЕГИЯ ЗА УСТОЙЧИВА ЕНЕРГИЯ\*

Клаус Лакнър  
Джефри Сакс  
Колумбийски университет

За пореден път се разгоря дебатът за това, дали енергията като стока е пред изчерпване. Преди едва шест-седем години изглеждаше, че светът се къпе в нефт, а днес много експерти прогнозираят края на нефта и като цяло края на ерата на изкопаемите горива<sup>1</sup>. С последното си сливане с калифорнийската петролна компания Unocal Chevron заложи на постоянно увеличаващи се цени на петрола (Голд, 2005). Два други петролни гиганта – British Petroleum и Exxon Mobil – от друга страна, публично заявиха, че запасите от петрол изглеждат изобилни<sup>2</sup>.

Въпреки че световните нефтени запаси действително са изобилни, световното предлагане на енергия остава доста ограничено. Докато населението на Земята, което е на път да достигне 9 млрд. души, се стреми към стандарт на живот, считан от развитите държави за даденост, потреблението на енергия ще се увеличава с бързи темпове. Това ще окаже натиск върху цялата верига на доставките – от проучванията до рафинирането. Допълнително усложняващ фактор

е, че залежите от нефт и природен газ са концентрирани в малка част от света, а това води до по-уязвима и нестабилна система на търгуване, която показва силни тенденции към монополизация. Освен това екологичните съображения представляват може би най-сериозното от всички ограничения.

Прогнозите за бъдещото потребление на енергия и за тенденциите в развитието на енергийната инфраструктура са изпълнени с огромна доза несигурност<sup>3</sup>. Стратегиите за дългосрочно енергийно планиране трябва да са устойчиви спрямо непредвидимите изменения в динамиката на световното развитие. Тази статия разглежда устойчиви стратегии за поддържане на икономическия растеж и световното развитие и същевременно за преодоляване на недостига на някои суровини, както и на дължащите се на екологичните съображения ограничения в предлагането, заплашващи да блокират достъпа до повечето конвенционални енергийни източници.

\* Статията е публикувана в *Brookings Papers on Economic Activity*, 2005, vol. 36, issue 2005-2, pages 215-284.

<sup>1</sup> Вж. заглавната статия „Давене в петрол“ и последвалата широка дискусия за пресищането с петрол в списанието *The Economist*, 4 март 1999 г., която предвижда цена от 5 щ. дол. за барел петрол. Книгата на Дефейес (2001) за пика на Хъбърт (бел. ред. Хъбърт предвижда пик в световния добив на петрол) е добър пример за това, как много хора през последните години предвиждат края на петролната ера. Гудстейн (2004) е особено песимистично настроен в предположенията си, че петролът се изчерпва и че останалите изкопаеми горива не са особено вероятни негови заместници.

<sup>2</sup> Вж. Статистически преглед на световната енергия на British Petroleum (БП, 2005), който разглежда петролните резерви като увеличаващи се в абсолютни стойности въпреки рязкото покачване на потреблението на петрол. „Енергийни перспективи“ на Exxon Mobil (ЕксънМобил, 2005) твърди, че все още съществуват големи неизползвани залежи на петрол.

<sup>3</sup> Вж. огромния диапазон на прогнозите, обобщени в доклада на Междуправителствената група за промените в климата за възможните варианти (Накиченевич и др., 2001).

Статията ще приведе доказателства за това, че базата на познатите енергийни ресурси е повече от достатъчна, за да осигури на растящото население на Земята енергия в мащаби, с които развитите страни отдавна са свикнали и към които се стремят развиващите се страни – но само в случай, че бъдат направени далновидни и навременни инвестиции. Екологичните ограничения ще бъдат по-трудни за преодоляване, но и за тях има многообещаващи решения, за които също ще бъде необходимо доста време за изпълнение. Ключът и към проблемите с предлагането, и към екологичните съображения ще бъде *навременността*, с която се вземат решенията.

Съвременната технологична база не е достатъчна за осигуряване на чиста и изобилна енергия за 9 млрд. души. За да бъдат задоволени бъдещите енергийни потребности, няма да бъде достатъчно просто да се прилагат настоящите добри практики. Вместо това нови технологии, особено улавянето и съхраняването на въглерод (УСВ) в големите промишлени заводи, ще трябва да достигнат зрелост. За радост УСВ и някои други необходими технологии вече са в начален етап на внедряване. Въпреки това без значителен напредък в начина, по който енергията бива откривана, преобразувана и транспортирана, светът наистина ще попадне в сериозна енергийна криза.

Основните доводи на статията могат да бъдат формулирани по следния начин:

- Използването на големи количества енергия е от огромно значение за функционирането на една развита икономика. Дори в дългосрочна перспектива има големи ограничения върху пестенето на енергия. Глобалният икономически растеж ще доведе до значително увеличаване на потреблението на първична енергия.
- Енергийните ресурси са взаимно заменяеми, особено що се отнася до изкопаемите горива. Например въглищата могат да бъдат превърнати в течни горива като бензин при ниски разходи. Същото може да се направи и с неконвенционални изкопаеми горива като битуминозни пясъци и шисти, а евентуално и с метановите хидрати, които са в изобилие на морското дъно. Невъглеродните енергийни източници като ядрената енергия и енергията от слънчева светлина биха могли да осигурят значителна част от дългосрочните енергийни потребности, но и двата източника създават проблеми в краткосрочна перспектива.
- Не се наблюдава сериозен недостиг (в рамките на столетие) в предлагането на изкопаемите горива, след като бъде взета предвид взаимната заменяемост между нефта и другите изкопаеми горива. Дори настъпването на т.нар. „пик на нефта“ – моментът, в който производството на петрол ще достигне максимално равнище – няма да означава глобален недостиг на енергия при днешните цени. Преходът от петрол към други източници на течни горива обаче ще изисква повече време за изпълнение, като проектирането на този преход трябва да е част от публичната политика.
- Вероятно е по-големите ограничения да дойдат от екологичните съображения, особено като резултат от повишаващата се концентрация на въглероден диоксид в атмосферата, който действа като парников газ. Емисиите на въглерод ще трябва да бъдат неутрализирани, тъй като курсът „запазване на статуквото“ е изпълнен със сериозни глобални рискове. Ограниченията върху глобалното предлагане на петрол няма да намалят рисковете от въглеродния диоксид, тъй като така или иначе въглищата и другите евтини изкопаеми горива ще компенсират намаляващото предлагане на петрол и природен газ, а техните емисии на въглероден диоксид няма да са по-ниски, а по-високи.
- Реално приложимите технологии, които могат да спомогнат за превъзможването на въглеродното предизвикателство до средата на това столетие при умерени разходи, са почти готови за внедряване. Ключовият елемент в тази стратегия най-вероятно ще бъдат УСВ в електроцентралите и в другите големи промишлени обекти, като фабриките за производство на стомана и цимент. Разходите за мащабното внедряване на тези технологии най-вероятно ще са под 1 % от брутния световен продукт, ако бъдат реализирани с предвиден дълъг период за изпълнение. В допълнение към УСВ изключително вероятно е преминаването на автомобилния транспорт към хибридни и други технологии с по-слабо използване на въглерод да бъде рентабилно и да възвърне направените инвестиции.
- Разширяването на тези технологии към приложения, които са по-екзотични, но въпреки това доста вероятни, може допълнително да

понижи емисиите през втората половина на столетието и да доведе до енергийна инфраструктура, която до края на века би могла да генерира нулеви нетни емисии на въглерод в околната среда.

- Тези преходи трябва да бъдат изпълнени в световен мащаб, което ще окаже сериозен натиск върху държавите с настоящи ниски доходи. Съображенията за справедливост предполагагат богатите страни да поемат значителни разходи по управлението на въглерода, което трябва да бъде внедрено на местата с ниски доходи.
- В рамките на столетието настоящите световни енергийни технологии са неадекватни. Дори със стратегия за УСВ и големи подобрения на енергийната ефективност в транспорта продължителният икономически растеж вероятно ще изтласка концентрациите на въглерод в атмосферата доста над разумните равнища. Затова фундаментални изследователски дейности по нови, невъглеродни енергийни системи са необходими успоредно с по-практичните вече посочени мерки през първата половина на столетието.

## РОЛЯТА НА ЕНЕРГИЯТА В СВЕТОВНАТА ИКОНОМИКА

Технологията като цяло и енергията в основата си в крайна сметка определят способността на Земята да поддържа своето население. Днешната гъстота на населението значително надвишава равнищата, които биха могли да се поддържат посредством естествени методи. С оглед на физическите размери на човешкото тяло и емпирично наблюдаваните закономерности, управляващи гъстотата на популациите на животински видове с подобни размери, биологично поносимата гъстота на човешката популация трябва да бъде около трима души на квадратен километър<sup>4</sup>. Фактът, че човешките популации значително

надхвърлят този брой, със сигурност е свързан със способността на човечеството да осигурява енергия, значително надвишаваща способностите на човешкия метаболизъм. Един подходящ пример е енергията, необходима за производството на азотни торове, които изиграха решителна роля за повишаване производството на храни през миналия век (Смил, 2001).

Обемът първична енергия, консумирана от среднестатистическия американец или европейец в наши дни, е около 100 пъти повече от способностите на неговия метаболизъм. При гъстота на населението над 100 пъти по-голяма от очакваното естествено равнище и енергийно потребление около 100 пъти по-голямо от метаболитното ниво европейците и американците навлизат в екосистемата с потребление на енергия на единица площ, което надвишава потреблението на другите видове четирикратно<sup>5</sup>. Поддържането на такава повишена способност за издържане на населението изисква постоянен достъп до лесно-достъпна енергия.

Енергийното потребление е неизбежно при поддържането на организирано състояние извън термодинамичното равновесие: прахосването на енергия в крайна сметка ще доведе до разпадането на такава система, освен ако на енергията не се даде възможност да тече през нея. По тази причина всяко високоорганизирано общество ще употребява големи количества енергия. Колко точно ще бъде енергията зависи от дейностите, които обществото извършва. Общество, което например разчита на интензивно пътуване, ще изисква повече енергия от общество, което използва телекомуникации за по-голямата част от взаимодействията си. Моделите на енергийно потребление зависят също от способността да се сведе до минимум прахосването на енергия, а не да го компенсират с допълнителна енергия. Това е ролята на подобряването на енергийната ефективност.

<sup>4</sup> Дамът (1991) разработва закони за подобие за максималната гъстота на населението и метаболитните енергийни нужди на животните като функция от тяхното телесно тегло.

<sup>5</sup> Това следва от законите за подобие за гъстотата на популациите и потреблението на енергия за метаболизъм, открити от Дамът (1991). Според законите за подобие потреблението на енергия на единица площ е еднакво за всички животински видове. На база калориен входящ ресурс от 2000 kcal на ден или 100 W на ден за енергийното потребление за човешкия метаболизъм и потребление на първична енергия от 10 000 W на човек от населението в САЩ (данни от Управлението за енергийна информация) коефициентът на търговско спрямо метаболитно енергийно потребление е около 100. Гъстотата на населението в градска среда обикновено е няколкостотин души на кв. км (в щата Ню Джърси е 437 души на кв. км според Бюрото за преброяване на населението на САЩ), от което идва вторият коефициент 100.

Световното потребление на първична енергия понастоящем е около 14 TW или около 2,2 kW на човек. САЩ разходват около 11 kW на човек, докато в най-бедните държави потреблението на търговска енергия не се различава много от продукцията от човешкия метаболизъм от около 100 W (Фигура 1.1). Около 86 % от цялата енергия, употребявана понастоящем на пазарите в САЩ, се извличат от изкопаеми горива. Годишното потребление на въглерод<sup>6</sup> в САЩ възлиза на около 5,5 тона на човек, или общо 1,6 млрд. тона (т.е. 1,6 гигатона въглерод или GtC)<sup>7</sup>. Общото световно потребление е 6,8 GtC<sup>8</sup>.

Ако целият свят употребяваше въглерод на нивото на САЩ на човек от населението, потреблението и емисиите на въглерод щяха да са шест пъти по-големи, отколкото са сега. Това по-голямо потребление не само би изчерпало наличния нефт до края на века (а вероятно и по-рано), но също така би предизвикало заплахата от огромни вреди за околната среда. По този начин основното енергийно предизвикателство е да се приеме повишаващото се енергийно потребление като част от глобалното икономическо развитие в рамките на ограниченията върху петрола и климата.

Слънчевата светлина определено е най-големият краен източник на енергия, който е на разположение на човека (други източници са геотермалната и ядрената енергия). Земята поема 170 000 TW енергия от слънцето<sup>9</sup>; този слънчев енергиен поток надвишава човешкото потребление на първична енергия приблизително четирикратно<sup>10</sup>. Биологичните системи – растенията – улавят чрез фотосинтеза по-малко от 0,1 % от тази енергия (еквивалентно на 100 GtC<sup>11</sup>, или около 130 TW) и я преобразуват в химична енергия. Въпреки че по-голямата част от тази енергия се употребява от самите растения, малка част от енерго-

съдържащата биомаса остава за потребление от животните и хората като източник на метаболитна енергия и за хората, които да генерират топлинна енергия или електроенергия чрез неметаболитно горене. Слънчевата енергия е също така крайният източник на изкопаеми горива, които са вкаменените останки от енергия, акумулирана чрез фотосинтеза в геологичното време, както и източник на вятърна енергия (около 200 TW в целия свят) и хидроенергия (задвижвана от причиненото от слънцето изпаряване на водата и валежите в хидроложкия цикъл на планетата).

Използването на много по-голяма част от слънчевия поток с търговска цел, например чрез фотоволтаичното преобразуване в електроенергия, най-вероятно ще е основното дългосрочно решение с ниска себестойност на проблема с доставянето на устойчива, възобновяема енергия (като ядрената енергия е възможна дългосрочна алтернатива). Повечето форми на слънчева енергия обаче, все още са прекалено скъпи, за да предоставят изобилна, евтина енергия в мащабите на текущото потребление на изкопаеми горива. Голямо, а защо не и най-голямото енергийно предизвикателство през идните десетилетия е да се намали стойността на енергията, добита от слънчева светлина. Междувременно трябва да бъде осигурен и поддържан достъпът до изкопаеми горива.

## ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТ НА ЕНЕРГИЙНИТЕ ИЗТОЧНИЦИ И ЕНЕРГОНОСИТЕЛИТЕ

Различните форми на енергия в голяма степен са взаимозаменяеми. Петролът, въглищата и природният газ са почти изцяло заменяеми, а преминаването от една форма в друга добавя сравнително нисък разход. Южноафриканската енергийна

<sup>6</sup> На всеки тон изгорен въглеродород в атмосферата се емитират средно 3,7 t въглероден диоксид.

<sup>7</sup> Тази цифра се основава на данните за емисиите на въглероден диоксид и данните за населението от Управлението за енергийна информация (2005б).

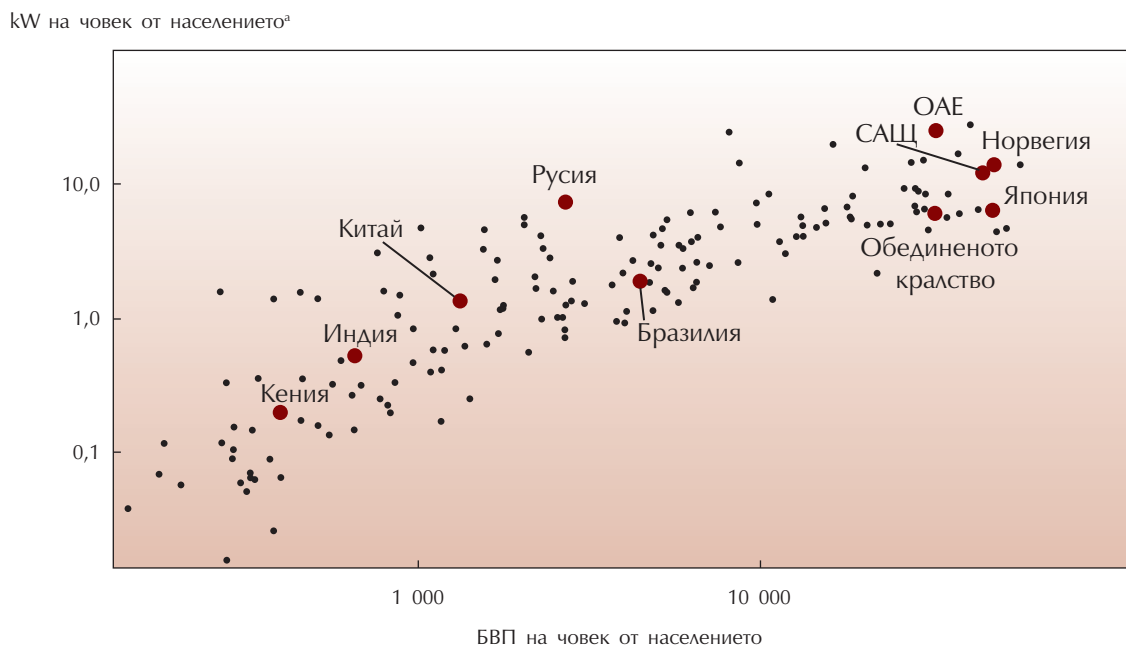
<sup>8</sup> Данни на Управлението за енергийна информация за 2003 г.

<sup>9</sup> Въз основа на справочните стойности на соларния енергиен поток близо до орбитата на Земята от 1379 W/m<sup>2</sup> и радиуса на Земята от 6370 km.

<sup>10</sup> Въз основа на данни, публикувани от Управлението за енергийна информация.

<sup>11</sup> За общото производство на въглерод от фотосинтезата например виж прегледите на Шимел и др. (1995), които разглеждат естествения цикъл на въглерода. Преобразуването в енергиен еквивалент се основава на приблизителното изчисление на енергията, съдържаща се в биомаса от 500 kJ на въглеродна молекула.

ФИГУРА 1.1. ПОТРЕБЛЕНИЕ НА ПЪРВИЧНА ЕНЕРГИЯ И БРУТЕН ВЪТРЕШЕН ПРОДУКТ



a. Мащабите и по двете оси са логаритмични.

Източник: Данни от VЕИ (2002 г.).

компания SASOL превръща въглищата в ЮАР в бензин и дизел при цени, конкурентни с цените на суровия петрол – около 35-50 щатски долара за барел (по-малко от стойността на суровия петрол при текущите цени по време на написването на тази статия)<sup>12</sup>, използвайки метода, известен като процеса на Фишер-Тропш. Някои инженерни проучвания в наши дни предполагат, че това преобразуване може да се постигне дори при по-ниски разходи<sup>13</sup>.

Входният материал в процеса на Фишер-Тропш е синтетичен газ, смес от въглероден оксид и водород. Водородът се свързва с въглерода и кислорода и образува течни въглеводороди и вода. Продуктите варират от метанол през алкални вериги като октан и декан (съставните части

на бензина и дизеловото гориво) до парафинени восъци, като конкретният продукт се определя предимно от налягането и температурните условия по време на реакцията и от избора на катализатори. Синтетичният газ може да се произвежда от практически всякакъв въглероден входящ поток. Може да се получи като резултат от частично окисляване и преобразуване на пара на природен газ, но също така може да бъде произведен при газифицирането на въглища (както прави SASOL) или биомаса. Освен това може да се използва при производството на други химикали.

Ако нефтът се изчерпи, втечняването на въглища би било очевиден кандидат за запълване на празнината, като такъв кандидат би могъл да

<sup>12</sup> Истинската цена на синтетичния петрол може само да бъде предполагана. Лъмкин (1988), без дори да посочи успешните нововъведения в Южна Африка, твърди, че текущата цена към тогавашния момент е била 35 щ. дол. за барел. Фабриците на SASOL все още произвеждат 30 % от транспортните горива на Южна Африка и печелят пари без държавна помощ. През 1999 г. SASOL оценяваха разхода за един барел от техния продукт на 18 щ. дол., без капиталовите разходи (Канеко и кол., 2002). Капиталовите разходи обаче са високи; те се изчисляват на 30 000 щ. дол. за възможността да се произвежда един барел на ден (Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2000, статията „Горива“). При приемане на 20 % годишен разход за възвръщане на капитала това би добавило 16 щ. дол. към цената на един барел.

<sup>13</sup> Например вж. Щайнберг и др. (1999).

бъде и процесът на превръщане на катран в синтетичен суров петрол. Друг вариант би било втечняването на природен газ или метан, получаван от метанови хидрати. Много вероятно е промяната на броя на заводите за превръщането на въглища в течности от няколко, построени досега, до хилядите заводи, които ще са необходими за заместване на петрола, да доведе до значителен спад на разходите за получаване на единица обем, но това ще изисква доста време за изпълнение. Досегашният опит предполага, че би било доста изненадващо, ако стойността не спадне минимум с коефициент 2 при такива условия. По тази причина дългосрочната цена на течните въгледородни горива може да се окаже по-ниска от сегашната, дори и при толеранс за най-песимистичните прогнози за запасите от нефт и газ. Дори при най-консервативните предположения за кривите на ученето изглежда напълно безопасно да се прогнозира, че стойността за получаване на синтетичен петрол от въглища или други процеси, след преодоляване на първоначалните проблеми на прехода, ще бъде под 30 щатски долара за барел.

Въпреки че изобилието от залежи на въглища и наличието на евтини процеси за преобразуването на въглища поставят горен праг на вероятната дългосрочна стойност на петролоподобните въгледороди, това не гарантира, че бъдещото развитие действително ще гравитира около въглищата. Възможно е в крайна сметка нефтът и природният газ да не се изчерпят или пък други варианти като битуминозни пясъци и нефтени шисти да се окажат по-конкурентни. Конкретно битуминозните пясъци се оказаха конкурентни при цени на петрола под 30 щатски долара за барел, но изграждането на необходимия капацитет ще отнеме време<sup>14</sup>. Въпреки че все още не са конкурентни, метановите хидрати, открити под вечната ледена покривка в Арктика, а което е по-важно – и на океанското дъно, потенциално може да осигурят практически неограничен източник на метан.

Цялостната замяна на изкопаеми въглероди също може да се окаже подходящ вариант. Ядрената

енергия вече може да осигурява електроенергия с конкурентна цена. Вятърната енергия и енергията от слънчевата светлина също могат да допълнят фонда на неизкопаемите източници на енергия. Въглеродът от биомаса може да замени поне някои изкопаеми горива – например в транспортния сектор, като на практика се използват същите технологии, които дават възможност за замяна на отделните изкопаеми горива.

Точно както различните енергийни източници могат да се заместват помежду си, така и различните енергоносители могат взаимно да се конкурират. Преобладаващият енергоносител в наши дни е електроенергията, следвана от течните горива (бензин, дизел и реактивно гориво) за транспортния сектор и газообразни горива (природен газ и в ограничена степен изкуствен газ или „битов газ“) за промишлена употреба и за сектора на битово-търговско отопление. Твърдите горива играят много по-малка роля като енергоносители. Тяхната полезност изглежда ограничена в определени отрасли като производството на стомана и цимент, както и генериране на електроенергия<sup>15</sup>. Малка част от енергията се доставя пряко на потребителя като топлина.

Замениемостта между енергоносителите обаче има своите ограничения. Електроенергията обикновено изисква кабели и поради това е най-подходяща за стационарни приложения. Термопомпите не са достатъчно рентабилни, за да може електроенергията да замени химичните горива за отопление на помещения въпреки ефективното им действие при охлаждането на помещения. С термопомпите електроенергията може да осигури топлина с ниска термичност по-ефективно от горенето на химически горива. В миналото бе обсъждан преносът на електроенергия чрез микровълни (Браун, 1984), но той не успя да се наложи в съвременната икономика. Интересно възможно приложение на тази технология би бил преносът на къси разстояния на енергия от пътните платна до автомобилите. Разбира се, възможно е и в транспортния сектор да се използва кабелно електричество, свидетелство за което са железопътните системи по света. Въпреки че идеята из-

<sup>14</sup> За икономическите разчети на битуминозните пясъци например вж. Националния енергиен съвет на Канада (2004).

<sup>15</sup> Производството на стомана е отговорно за около 6 % от световните емисии на въглероден диоксид (Идалго и др., 2005), а производството на цимент – за около 5 % (Уоръл и др., 2001). В САЩ електроцентралите на въглища произвеждат 31 % от всички емисии на въглероден диоксид според Управлението за енергийна информация.

глежда футуристична, няма видима причина автомобилите да не се задвижват от електроенергия, доставяна от външен източник, а ако хибридните автомобили на бензин и електричество се окажат успешни, те могат да предложат ефективно средство за съчетаване на външен електрически заряд (чрез щепсели у дома или презареждане от пътни установки) със съхраняването на батерии в превозното средство.

Други начини на пренос не разчитат на смяната на една енергийна форма с друга, а на замяната на потреблението на енергия с други алтернативи. До голяма степен повишаването на ефективността в крайна сметка попада в тази категория. По-големите инвестиции в енергоефективния дизайн на автомобилите например е начин за намаляване на техните емисии. Чрез използване на компютри за оптимизиране на маршрутите и умни алгоритми за ценообразуване с цел намаляване на незаетите места браншът на въздушните превозвачи може да намали общия брой прелетени мили или да увеличи броя прелетени пътничкокилометри за конкретни обеми горива, като по този начин ще се намали потреблението на енергия.

По-високите цени на енергията също понижават потреблението. Но ценовата еластичност на търсенето на първична енергия изглежда учудващо ниска и обикновено се измерва в диапазон от -0,1 до -0,5 в дългосрочна перспектива и по-близо до -0,1 в краткосрочна перспектива (Дал, 1992, 1993). Намирането на заместители за енергията е трудно, а рентабилните варианти за увеличаване на енергийната ефективност са по-ограничени, отколкото обикновено се предполага.

## ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ЕНЕРГОСНАБДЯВАНЕТО

През последните години се направи много по въпроса за вероятното изчерпване на световните енергийни ресурси. Това притеснение обаче произтича от погрешното възприемане, че петролът и природният газ представляват цялата първична енергия. Макар че те могат да бъдат изчерпани сравнително скоро, общото количество световни енергийни ресурси ще бъде достатъчно за зна-

чителен по-дълго време. По-конкретно огромните залежи на въглища и подобни на въглищата ресурси гарантират, че въгледородните горива в различните си форми – твърди, течни и газообразни – ще бъдат в изобилие при настоящите или при по-ниски цени в рамките на повече от столетие<sup>16</sup>.

## Нефт и природен газ

В наши дни суровият нефт е може би най-интензивно използваният енергиен ресурс в света и по тази причина може би ще бъде изчерпан първи. Признаците за това, че запасите от нефт постепенно се изчерпват, могат да бъдат открити в една обща тенденция към по-малки и отдалечени нефтени залежи с по-нискокачествен нефт (Дефейес, 2001). От друга страна, според годишното проучване на ВР (БП, 2005 г.) общите доказани резерви са се увеличавали постоянно през последните двадесет години, а съотношението на доказани резерви спрямо годишното производство се е увеличило от около 30 през 1984 г. до 40 през 2004 г. Дори при текущите високи цени, които са показателни за намаляване на предлагането, доказаните резерви останаха същите през 2004 г. Съотношението резерви спрямо производство обаче намаля поради значително нарастване на търсенето.

Намира ли се производството на петрол близо до връхната си точка, както твърдят някои наблюдатели? Ако изразим извличането на петрол чрез логистична крива, максималното производство ще бъде достигнато, когато бъде изразходван половината петрол. Въз основа на тази логика М. Кинг Хъбърт правилно предвиди през 1956 г., че производството на петрол в континенталната част на САЩ ще достигне връхната си точка в началото на 70-те години (Хъбърт, 1956). Твърди се, че тъй като в наши дни световните доказани резерви изглеждат сравними по размери с целия вече употребен петрол, връхната точка на глобалното производство трябва да е близо (Дефейес, 2001).

При оценките на петролния пик обаче, съществува риск от попадане в затворен логически кръг, който се свежда до значението на „доказани

<sup>16</sup> Рогнер (1997) показва, че само доказаните резерви от въглища надвишават потребностите за XXI в.

резерви". До голяма степен доказаните резерви са тези, които петролните компании се избрали да включат в своята счетоводна отчетност като дългосрочни материални запаси. Ако запасите се поддържат пропорционално на очакваните продажби, както и трябва да бъде, ако това е минималното количество, необходимо за поддържане на текущите нива на добив, съотношението на доказаните резерви спрямо производството ще бъде постоянна стойност, което действително е било така в по-голяма или по-малка степен през последните тридесет години. Тъй като историческото потребление е добре представено от геометрични темпове на ръста, количеството вече употребен петрол също е постоянно кратно от текущото производство. Вследствие на това пикът на Хъбърт винаги ще изглежда намиращ се на точно определено време от настоящето, а с оглед на това, че двете постоянни времеви стойности са сравними, пикът на Хъбърт винаги ще изглежда близо.

### **Физически ограничения при производството на петрол**

Оценките на общите световни запаси от нефт се обсъждат разгорещено. Например може да се направи сравнение между становището на Матю Симънс и на Ханс Холгър Рогнер (Симънс, 2005; Рогнер, 1997). Симънс твърди, че голяма част от огромните саудитски резерви всъщност не е на разположение за добиване. Рогнер приема, че доказаните резерви през 1996 г. са възлизали на около четиридесет години при текущото производство (150 Gt петролен еквивалент, приблизително сходство с отчета на БП), но добавя към това почти равно количество възможни (61 Gt петролен еквивалент) и спекулативни резерви (84 Gt петролен еквивалент) плюс допълнително сравнимо количество, което е на разположение при подобро добиване (138 Gt петролен еквивалент). Резервите в битуминозни пясъци и шисти добавят още 380 Gt към общото количество. Действително се наблюдават признаци на изчерпване. Откриването на наистина големи залежи на практика спря, а от огромния си скок през 60-те години досега обемът на откритите количества не може дори да се доближи до тогавашния. Тези открити залежи обаче отразяват почти случайни допълнения към резервите в Близкия изток, които досега не са били разработени. Когато тези

находища на практика изглеждаха недостъпни по време на петролното ембарго, те бяха заместени от по-малки, но повече находища на други места. Някъде през 70-те години добивът на петрол влезе в режим, в който резервите, добавяни чрез изследвания, успяват само да поддържат запасите. Преди това петролът, точно както въглищата в наши дни, се радваше на допълнения на запасите, надвишаващи търсенето. За разлика от това в наши дни проучвателните екипи трябва системно да търсят из цялата планета, за да могат да добавят нефт и газ към общия ресурсен пул. При наличните данни надеждни прогнози за бъдещите резерви от нефт са на практика невъзможни.

Една солидна глобална енергийна стратегия не трябва и няма нужда да разчита на нефта. Тя обаче трябва да може да обхваща нефта и природния газ, в случай че запасите издържат по-дълго от очакваното. Евентуалният възможен вариант е нефтените ресурси да останат повече или по-малко постоянни, докато подобрените техники на производство компенсират постепенното изчерпване. Този изход обаче би бил трудно различим от друг, при който битуминозните пясъци и въглищата компенсират видимия недостиг на нефт и природен газ.

### **Географска концентрация на нефта и природния газ**

Предизвикателството при предлагането на нефт и природен газ идва не само от изчерпването на резервите, а и от неравномерното им разпределение в световен мащаб. По-голямата част от днешните доказани резерви са концентрирани в една сравнително малка част от света. Поради изключително неравномерното разпределение държавите в тази част до голяма степен се радват на силна позиция при ценообразуването. Освен това почти целият произвеждан в света петрол в крайна сметка преминава през малък брой петролни гиганти, които точно както и страните производителки имат интерес цените да се държат високи.

Подобна позиция при ценообразуването допълнително се подсилва от факта, че в енергийния сектор тенденцията е да се работи с големи заводи, които изискват огромни инвестиции в почти постоянни нови строителни дейности. Результа-



тът е висока цена на влизането в пазара. Затова голямо предизвикателство при подхода към евтините енергийни системи на изкопаеми горива е как да се насърчи конкуренцията. Разработването на алтернативни ресурси би помогнало на приложимостта на този подход. Намаляването на зависимостта от големите заводи би съдействало за създаване на конкуренция.

### **Въглища и неконвенционални изкопаеми горива**

Когато обаче се разглеждат сумарно всички изкопаеми горива, положението с ресурсите се променя рязко. За разлика от нефта, където доказаните резерви на практика са инвентар, положението с резервите на въглища повече прилича на конкретния случай със саудитските нефтени находища. Понеже количествата въглища, за които вече се знае, че съществуват, ще стигнат за повече от столетие дори при вариантите за бърз растеж, проучванията за находища на въглища в момента не са печеливши дейност.

Въглищата сами по себе си няма да стигнат за енергийните потребности на XXI в.; действително на цената на по-голяма заплаха за околната среда въглищата могат да се окажат реална предпазна мрежа в енергийния сектор. Както вече бе обсъдено, въглищата могат да бъдат превърнати в синтетичен петрол чрез реакциите на Фишер-Тропш. Освен това лигнитите и други нискокалорични въглища, които са в още по-голямо изобилие в сравнение с висококалоричните, са много подходящи за създаване на синтетични горива. Това има значение например за Германия, където висококалоричните въглища са малко, но нискокалоричните кафяви въглища са в огромни количества – достатъчни за около 230 години при сегашните темпове на производство<sup>17</sup>.

Залежите на нефтени шисти също са много големи, но все още не съществува процес за рен-

табилното добиване на нефт от тях, макар и периодично процесите да се подобряват. Изглежда, че нефтените шисти могат да се конкурират със суровия петрол при цени между 30 и 100 щатски долара за барел петролен еквивалент<sup>18</sup>. Разработването на нова технология, какъвто е обсъденият по-долу случай с битуминозните пясъци, може драстично да намали тази цифра. Текущата разлика в цената между двата енергийни източника може би се дължи поне отчасти на предходна решителна държавна подкрепа за битуминозните пясъци в Канада.

Битуминозните пясъци са огромен ресурс и вече започват да навлизат на пазара. Канадските битуминозни пясъци са сравними по енергийно съдържание със саудитските нефтени полета и са поне равни на ресурсите, за които се знае, че съществуват във Венецуела. Канадският синтетичен петрол от битум вече започва да играе важна роля в канадските доставки на петрол<sup>19</sup>.

Дали тези нискокалорични енергийни ресурси ще бъдат използвани рационално през следващото столетие до голяма степен ще зависи от реалната наличност на нефт и природен газ. Твърде възможно е сегашното песимистично становище на някои експерти за наличните запаси от природен газ да бъде опровергано и запасите да се окажат достатъчни за покриването на енергийните нужди на увеличаващото се световно население за десетилетия напред. След това обаче, ще бъде необходим начин за рентабилното транспортиране на това гориво по света. През следващите петдесет години може реално да започне добиването на метанов хидрат в големи количества. Ако това се окаже по-евтино от преработката на въглища, светът няма да има нужда да преминава към нискокалорични въглеродороди, а вместо това ще използва тези сравнително чисти ресурси от изкопаеми въглероди. Във всеки случай изкопаемите горива – независимо дали висококалорични или нискокалорични, вероятно ще осигуряват дългосрочна енергийна

<sup>17</sup> Въз основа на сведенията от Асоциацията на германския бранш на лигнитните въглища Bundesverband Braunkohle ([www.braunkohle.de](http://www.braunkohle.de)). В сайта се твърди, че има 41 млрд. тона резерви в сравнение с годишното производство от 182 млн. тона. Обемът на ресурсите е потвърден от данните, предоставени от Министерството на външните работи на Германия ([www.tatsachen-ueber-deutschland.de](http://www.tatsachen-ueber-deutschland.de)).

<sup>18</sup> Скорошно проучване на RAND Corporation (Бартис и др., 2005) твърди, че увеличаващите се разходи от предишни проекти за добив на нефт от шисти води до оценки на разходите между 75 и 95 щ. дол. на барел еквивалент. Схемите за добиване на място може да са с доста по-ниски разходи – може би под 30 щ. дол., но тези технологии все още не са утвърдени.

<sup>19</sup> Вж. доклада на Националния енергиен съвет за битуминозните пясъци в Канада (National Electric Board, Canada, 2004).

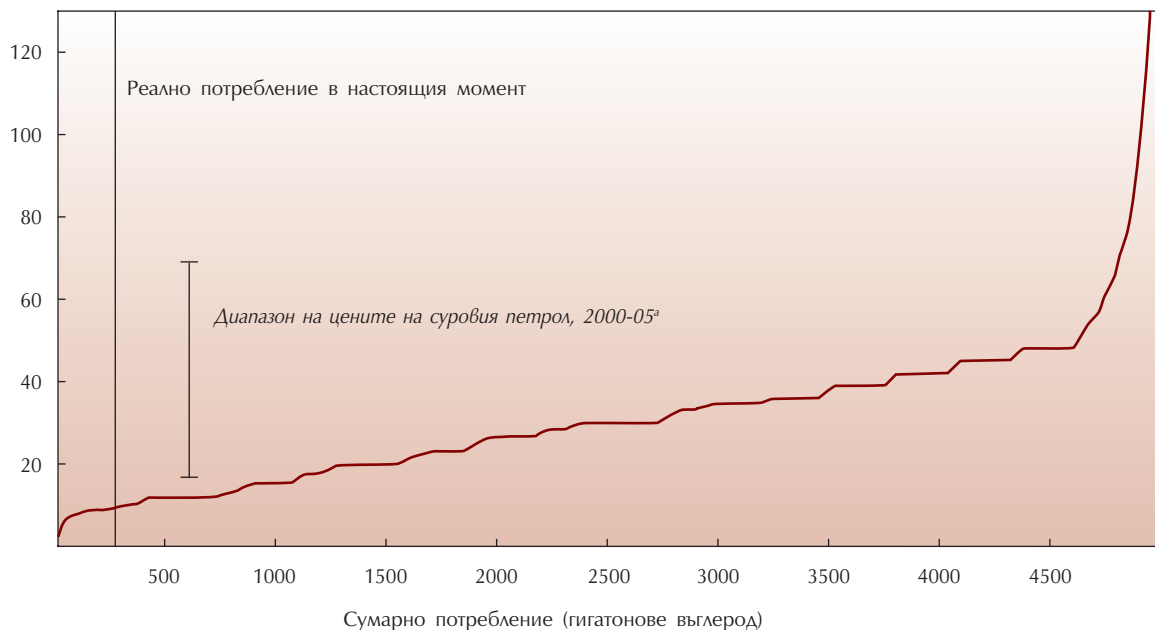
подкрепа и през текущото, и през следващото столетие, при цена около 50 щатски долара, а съществува вероятност дори тази цена да бъде по-ниска (ако се предположи, както е обсъдено по-долу, че УСВ е практически осъществимо при скромни разходи).

Накратко наличието на огромни запаси от изкопаеми горива навежда на мисълта, че те могат

да доминират енергийното снабдяване на света през XXI век. Фигура 1.2 показва как производствените разходи за енергията от изкопаеми горива могат да останат достъпни, докато сумарното потребление на изкопаеми горива надвиши сегашните стойности с коефициент около 15. Дори при толеранс за големите неясноти при такива прогнози прекалено рано е да се прогнозира края на ерата на изкопаемите горива.

**Фигура 1.2. РАЗХОД ЗА ДОБИВА НА ВЪГЛЕРОДНИ ГОРИВА КАТО ФУНКЦИЯ ОТ СУМАРНОТО ПОТРЕБЛЕНИЕ**

Константна стойност 2000 щатски долара на барел петролен еквивалент



а. В долари по текущи цени, до ноември 2005 г.

**Източник:** Изчисления на авторите, използващи данни от Рогнер (1997, графика 8) и Департаментът за енергийна информация.

Въпреки че не прогнозираме незабавен преход към въглища, дългосрочната база на енергията от изкопаеми горива е доминирана от въглищата, освен ако източниците на метанови хидрати не се окажат в дори още по-големи количества.

### Ограничения при възобновяемата и ядрената енергия

Енергийните източници, различни от изкопаеми горива – хидроенергия, вълни, приливи, вятър,

геотермална, ядрена и слънчева – са потенциално важни, но е малко вероятно да заместят огромното и растящо потребление на изкопаеми горива за десетилетия напред. В някои случаи (хидроенергия, вълни, приливи, геотермална енергия) мащабите на самия енергиен източник са физически ограничени. При ядрената енергия ограниченията са свързани предимно с безопасността (рискове от разпространяване на ядрени оръжия). При енергията от слънчева светлина основното ограничение е цената.

Хидроенергията е голям източник на евтина енергия, но не може сама по себе си да задоволи световния енергиен пазар. Един нагледен пример – при средната височина и количества на валежите за САЩ – голям производител на хидроенергия – може да се изчисли теоретично максималното количество енергия, което може да бъде добито, като се изчисли потенциалната енергия в приблизителните валежи. При обичайните количества на валежите максималният хидропотенциал е около 140 GW, което е по-малко от общата електроенергия, произвеждана понастоящем от САЩ<sup>20</sup>. Реалното изпълнение ще бъде доста под тази амбициозна граница: данни от Службата за енергийна информация на САЩ показват, че се използват около 20 %. Във всеки случай строителството на язовири за ВЕЦ в САЩ на практика е спряло.

Точно както при хидроенергията, вълните, приливите и океанските течения не могат да покрият енергийното потребление, нито разглеждани поотделно, нито заедно (Фалнес и Ловсет, 1991; Мънк, 1997). Действително на тези източници не може да се разчита да осигуряват дори голяма част от бъдещото потребление на енергия, макар че в някои райони могат да представляват евтино решение.

Системите за вятърна енергия се доближават до ниските разходи, необходими за превръщането им в сериозен конкурент на световните енергийни пазари. Настоящото световно енергийно потребление обаче, вече представлява значителна част от цялата енергия, вложена от слънцето, за задвижване на глобалното вятърно поле<sup>21</sup>. Меж-

дуременно се очаква енергийното потребление да се увеличи четири или повече пъти през този век и е трудно да се предвиди как ще бъде възможно да се извличат от 10 до 20 % от енергията, която движи ветровете, без това да окаже сериозно въздействие върху климата<sup>22</sup>.

Понастоящем по данни на Службата за енергийна информация ядрената енергия осигурява около 18 % от световното предлагане на електроенергия. Тя се използва почти изключително за генерирането на електроенергия, макар че по принцип може да се използва и за доставяне на топлоенергия. Потенциалът за ядрена енергия е голям, но текущите оценки на достъпните залежи на уран са прекалено малки, за да поддържат световна енергийна инфраструктура, основана се предимно на конвенционална (т.е. без реактори-размножители) ядрена енергия<sup>23</sup>. Има предположения, че уранът в морските води може да навакса разликата, но самият обем морска вода, който ще трябва да бъде филтриран, отново повдига въпроси, свързани с екологичната жизнеспособност<sup>24</sup>.

Една алтернатива е преходът към реактори-размножители, работещи или на уран-238, или торий-232; тези реактори създават допълнително гориво в хода на работата си. Това би увеличило предлагането на гориво с около два пъти и по този начин би елиминирало всички тревоги за ограниченията на ресурса за цялото столетие<sup>25</sup>. Обаче, за да се поддържа достатъчно предлагане на гориво, успоредно с увеличаването на производството на ядрена електроенергия светът ще трябва скоро да реализира мащабна програма

<sup>20</sup> За изчисляването на тази цифра вж. Хоуз и Файнберг (1991). Резултатът ясно показва, че електроенергията, добита от вода, не може да задоволи световното енергийно потребление.

<sup>21</sup> Осигуряването на цялото настоящо потребление на енергия в САЩ от вятърна енергия ще изисква ежедневното улавяне на цялата кинетична енергия от вятъра върху площ с размери 500 на 500 km. Покриването на световното потребление ще изисква около четири пъти по-голяма площ. Това изчисление се основава на общата кинетична енергия в атмосферата, която е около 1,3 MJ/m<sup>2</sup> (Хотън, 2001); общото потребление на първична енергия, което е около 4 TW за САЩ и около 14 TW за света според Службата за енергийна информация.

<sup>22</sup> Това въздействие е изтъкнато от Кийт и др. (2004).

<sup>23</sup> Хоферт и др. (2002) изтъкват, че световните доказани уранови ресурси ще бъдат изчерпани за няколко десетилетия, ако цялата енергия се доставя от конвенционални реактори, работещи на уран.

<sup>24</sup> Настоящото потребление на уран (приблизително 70 000 t годишно, Комисия по урана, 2005) би наложило обработката на почти 1 млн. куб. метра морска вода в секунда, за да се извлекат 65 % от 3 mg уран, налични във всеки кубически метър; това би означавало прихващане на водно течение, равняващо се на Гълфстрийм във Флоридския пролив. Един разчитащ на ядрена енергия свят с лекота би могъл да употребява 30 пъти повече уран (Стюарт, 2005). Прихващането на поток с такива мащаби очевидно ще има последици върху околната среда.

<sup>25</sup> Например вж. Хоферт и др. (2002).

за реактори-размножители или най-малкото – да съхранява отпадъците от конвенционалните реактори по такъв начин, че да могат да бъдат възстановени и обработени повторно на по-късен етап. Освен това рискът от разпространяване на дялящи се материали, подходящи за ядрени оръжия, масово се възприема като задължително техническо и политическо ограничение. Технологиите за реактори-размножители създават такива материали и по този начин увеличават риска.

Накратко ядрената технология, макар и донякъде ограничена в развитието си от наличността на уран-235, няма фундаментални ограничения поради лимит на ресурсите, при условие че бъде отворена вратата към програмите за реактори-размножители. Всяка енергийна технология, основаваща се на ядрен синтез, ще бъде напълно освободена от ресурсни ограничения, а рисковете от разпространяване и проблемите със съхраняване на отпадъците също биха били значително по-малко. До този момент обаче енергията от ядрен синтез остава единствено теоретична възможност.

Геотермалната топлоенергия е друг източник на първична енергия. Запасите от топлоенергия под земята и в океана са много големи. Обаче инсталациите, проектирани да улавят тези резерви, в повечето случаи ще трябва да работят с много малки температурни разлики, което предполага големи разходи и обемни машини. Само някои части на света като Исландия имат висококалорични източници на геотермална топлоенергия. По този начин геотермалната енергия може да бъде много ефективен нишов играч там, където има големи температурни разлики, но не е вероятно да осигури основната част от енергия-

та, необходима за функционирането на растяща световна икономика<sup>26</sup>.

За разлика от другите описани възобновяеми енергийни ресурси слънчевата светлина е на практика неограничена. Средната стойност на енергията от слънчева светлина, падаща върху квадратен метър от земната повърхност, е около 300 W<sup>27</sup>. (Това число варира през деня и нощта, но предполага ясно небе и сух въздух.) Реалните оценки за това, до каква степен тази енергия всъщност може да бъде уловена са малко пониски, но все пак далеч надвишават настоящото енергийно потребление. Едно поле с площ 1 млн. кв. километра със соларни панели (площ, равностойна на 10 % от Сахара) при КПД 10 % би уловило количество, приблизително двойно по-голямо от настоящото световно потребление на енергия<sup>28</sup>. При КПД 15 % около половината от средното количество електроенергия, генерирана в САЩ, би могло да бъде произвеждано в рамките на ракетната база Уайт Сандс в щата Ню Мексико<sup>29</sup>.

Така че недостиг на слънчева енергия няма. Проблемът е в стойността. Понастоящем енергията от слънчевата светлина е прекалено скъпа, за да бъде нещо повече от нишов играч в световната енергийна инфраструктура. Стойността на енергията от слънчевата светлина е около 4 щатски долара за инсталиран ват пикова мощност<sup>30</sup>; при подходящ климат това означава грубо 16 щатски долара средно на ват. Цената на киловатчас електроенергия е около 20-30 цента; стойността на съхраняването на тази енергия приблизително удвоява цената. И това в сравнение с около 3 цента за киловатчас в електроцентра на въглища<sup>31</sup>. Има основание да се очаква, че стойността

<sup>26</sup> За добра дискусия по въпросите на геотермалната енергия вж. Хоуз и Файнберг (1991).

<sup>27</sup> Тъй като повърхността на една сфера е четири пъти по-голяма от нейното напречно сечение, средният входящ поток е 340 W/m<sup>2</sup>. С толеранс за отражателната способност на Земята потокът, достигащ повърхността, е малко по-малък и зависи от географската ширина на обекта. За подробна информация вж. справочни данни (например Наръчника на CRC). Средната цифра за ширините около тридесетия градус е 300 W/m<sup>2</sup>. Климатичните условия допълнително намаляват тази цифра дори в пустиня до около 200 W/m<sup>2</sup> (Например вж. Хоуз и Файнберг (1991)).

<sup>28</sup> Тези изчисления се основават на времево осреднено КПД на улавянето от 30 W/m<sup>2</sup>.

<sup>29</sup> Обектът Уайт Сандс има площ 3200 кв. мили. При КПД на улавянето от 30 W/m<sup>2</sup> тази площ би уловила 250 GW слънчева светлина, или около 2200 TWh годишно в сравнение с електроенергията в размер 3900 TWh, генерирана в САЩ през 2003 г. (данни на Службата за енергийна информация).

<sup>30</sup> За данни за стойността на енергията от слънчевата светлина вж. например сайта [www.solar-buzz.com](http://www.solar-buzz.com), изготвен от консултантска фирма, следяща цените на енергията от слънчевата светлина.

<sup>31</sup> Вж. Например: „Формата на нещата, които ще се случат?“ в списанието The Economist от 9 юли 2005 г., където се посочва цена от 2 цента за електроенергията от въглища в САЩ и около 4 цента за киловатчас в Германия.

на енергията от слънчевата светлина ще спадне. Масовото производство и натрупването на опит в други производствени дейности доведоха до още по-големи съкращения на разходите, когато са налице подходящите икономически стимули. Например стойността на компактдисковете намаля с коефициент около 100 след внедряването на технологията; подобно намаление на стойността на фотоволтаиците може да окаже низходящ натиск върху цената на енергията от слънчевата светлина до по-малко от 1 цент за киловатчас. Предизвикателството е да се разработят необходимите стимули за подобен преход.

Тъй като енергията от слънчевата светлина вероятно ще идва от фотоволтаици, тя от само себе си ще се ориентира към производство на водород, който да се използва като гориво. Ако цената на електроенергията от преобразуването на слънчевата светлина спадне до 1 цент за киловатчас, би било най-рентабилно електроенергията да се използва за производство на водород. Дори ако само една трета от нея бъде реално възвърната, тя пак би била конкурентна на днешния пазар. По този начин, макар и енергията от слънчевата светлина да остава неикономична в наши дни, не бива да се изключва възможността евтина електроенергия от слънчевата светлина да навлезе в големи количества на пазара в някакъв момент през този век. Това ще направи възможна замяната на енергията, произвеждана от изкопаеми източници или ядрената енергия, а ако може да се постигне намаление на стойността с коефициент около тридесет, енергията от слънчевата светлина действително би представлявала жизнеспособна алтернатива. Една програма за разработване на евтина енергия от слънчевата светлина трябва да цели стойност 1 цент за киловатчас, момент, в който проблемите с прекъсването (т.е. това, че през нощта или в облачно време не се генерира електроенергия) могат успешно да бъдат преодоляни. Ако успее, енергията от слънчевата светлина сама по себе си би била достатъчна за напълно индустриализирано световно общество.

В обобщение обосновано е да се очаква енергийните алтернативи, различни от изкопаемите горива, да осигурят някаква част от бъдещото световно предлагане на енергия. Вятърът, хидроенергията, океанските вълни и геотермалната

енергия вероятно ще са изключително конкурентни в някои райони, но основната част от енергията ще идва от изкопаеми горива, ядрена енергия или енергия от слънчевата светлина. Всеки от тези варианти би могъл самостоятелно да осигури достатъчно енергия за задоволяването на световното потребление поне за обозримото бъдеще. Всеки от тях обаче се сблъсква с различни проблеми. Енергията от изкопаеми горива задължително трябва да преодолее екологичните ограничения (основно от емисиите на въглерод), ядрената енергия трябва да се справи с предизвикателствата за неразпространение и безопасност, а енергията от слънчевата светлина трябва да намали високата си настояща стойност.

## **ЕКОЛОГИЧНИТЕ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРЕД ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ИЗКОПАЕМИ ГОРИВА**

Според Службата за енергийна информация на САЩ изкопаемите горива понастоящем осигуряват 85 % от енергията, употребявана в целия свят. Както бе отбелязано по-горе, изкопаемите горива не са заплашени от изчерпване, но на всеки изгорен тон въглерод в атмосферата се емитират 3,7 t въглероден диоксид<sup>32</sup>. Бързият ръст в световното потребление на енергия, което трябва да бъде задоволено, ако икономическото развитие продължи, прави извеждането от употреба на горивата на въглеродна основа практически невъзможно. Все пак общият обем въглероден диоксид, който може безопасно да бъде емитиран в атмосферата, е ограничен – а колко точно е ограничен, е предмет на дебати. Тук ще приведем доводи, че независимо от избрания подход, ще бъде трудно да се спрат емисиите на въглероден диоксид във времето, а усилията за насочване към икономика с нулеви нетни стойности на въглерод трябва да започнат в скоро време.

### **Рисковете от емисиите на въглероден диоксид**

Вече е наложено разбирането, че продължаващите големи емисии на въглероден диоксид, ко-

<sup>32</sup> Въз основа на коефициента на теглото на въглеродните молекули (12) и на молекулите на въглеродния диоксид (44).

ито са следствие от използването на изкопаеми горива, ще имат сложни, крайно несигурни и потенциално много сериозни последици върху човешкото общество и глобалните екосистеми (Хотън и др., 2001). Тези последици често биват обобщавани като „глобално затопляне“, но това представяне е прекалено опростено. Промяната на концентрациите на въглероден диоксид в атмосферата ще промени не само температурите, но и много други страни на химическите, климатичните и биологичните процеси на Земята. Мащабът на тези последици е крайно неясен, но трябва да се знае, че те действат в глобален мащаб. Също така има големи неясноти и по отношение мащаба на последиците, свързани с дадена времева крива (ходограф) на концентрацията на въглероден диоксид в атмосферата, както и по отношение на положителните (и отрицателните) ответни реакции, които биха произвели много по-големи промени в концентрациите на въглероден диоксид, както и промени в климата и екосистемите. Следват някои от по-важните последици от увеличаването на концентрациите на въглероден диоксид:

- *Промени в климата.* Покачващите се концентрации на въглероден диоксид, съчетани с други парникови газове като водна пара и метан, ще повишат температурите на повърхността на сушата и водата и вероятно ще причинят големи промени във ветровете, валежите и океанските течения.
  - *Промени в химичния състав на океаните.* Покачващите се концентрации на въглероден диоксид ще окислят повърхностните води на океана. Теоретичните съображения и експерименталните и други емпирични доказателства неизменно предполагат, че настъпилите промени в химичния състав на океаните ще забавят растежа на коралите, което вероятно ще доведе до измирането на тези важни екосистеми<sup>33</sup>.
  - *Унищожаване на жизнена среда.* Промените в климата и химичния състав на различните жизнени среди вероятно ще доведат до масово измиране на уязвими видове с ограничен
- диапазон на жизнената среда или ограничена мобилност.
  - *Засилен пренос на болести.* Много болести се регулират от климата, включително средната температура и валежите. Тези климатични последици често са сложни и си взаимодействат. Например намаляването на валежите може да доведе до увеличаване на някои вирусни заболявания, като насочи животните в по-ограничени пространства за водопой и размножаване. Географският обхват на болести като маларията може да се разшири чувствително.
  - *Промени в земеделската производителност.* Повисоките температури, променящите се вегетационни периоди, промените в състава на видовете и променените модели на валежите могат да изменят земеделската производителност на местно равнище. Повишаващите се концентрации на въглерод в атмосферата потенциално могат да увеличат добивите чрез прякото действие на „въглеродно наторяване“, макар че това е предмет на оживени дискусии. В някои места е възможно производителността да се повиши (например в местата с по-голяма географска ширина чрез по-дълги вегетационни периоди и вероятно чрез въглеродно наторяване), но на други места, особено в по-топлите части на света, е вероятно да се отбележи спад на производителността. Дори ако нетното глобално въздействие е слабо, въздействието в регионален мащаб може да бъде значително.
  - *Повишен брой природни бедствия.* Смята се, че екстремалните събития, предизвикани от природни явления, вероятно ще се увеличат вследствие на по-високите температури. Съществува впечатление за увеличаване на енергията, освобождавана при разразяването на урагани. Вероятно е наводненията и засушаванията в някои части на планетата да се увеличат.
  - *Повишаващи се нива на океаните.* Нивата на океаните вероятно се повишават по две причини: топлинното разширяване на водата от нагриването ѝ и топенето на снеговете в Гренландия и Антарктика. Повишаващото се ниво

<sup>33</sup> Широка дискусия за последиците от въглеродните химични промени, предизвикани от концентрациите на въглероден диоксид в атмосферата, е изложена в Клейпас, Будемайер и Гатусо (1999) и в Клейпас и др. (2001). Струва си да се отбележи, че обсъденото тук въздействие върху кораловите рифове не се дължи на температурни промени, а на промени във въглеродния химичен състав на океанската вода, които на свой ред са предизвикани от увеличеното парциално налягане на въглеродния диоксид върху водата.

на океаните ще доведе до потопяване на крайбрежните райони, до силно вълнение по време на бури и ще причини проникване на сол във водоносните пластове на подземните води в крайбрежните райони. Някои малки островни народи могат да се окажат напълно потопени.

- *Положителни обратни реакции и внезапни промени.* Има няколко възможни канала, по които слаби увеличения на концентрациите на въглероден диоксид могат да доведат до внезапни и големи последици. Те включват бързото свличане на ледените пластове при Гренландия и Антарктика в океана<sup>34</sup>, което значително ускорява повишаването на нивото на океаните; топенето на вечния лед и газовите хидрати, което може да освободи метан от тундрата и да доведе до огромно увеличаване на концентрациите на парникови газове; внезапното спиране на термохалинната циркулация на океанските течения с последващи едромасщабни промени в топлинните трансфери от екваторите до полюсите; както и намаляването на отражателната способност на повърхността (белота), например чрез топене на морския лед, което води до рязко покачване на поглъщането на слънчевата радиация.

## Неясноти и последици

Има огромна несигурност по отношение на връзката между концентрациите на въглероден диоксид и климата. Сам по себе си въглеродният диоксид не може да създаде парников ефект, достатъчен да увеличи температурите значително, но дори съвсем повърхностни изчисления, както и по-сложните климатични модели показват, че затоплянето, дължащо се на въглеродния диоксид, увеличава съдържанието на водни пари в атмосферата. Тъй като водните пари са още по-силен парников газ, това причинява допълнително затопляне. То има ефекта на въглероден диоксид като парников газ плюс непрякото действие на

въглеродния диоксид върху водните пари, което носи общия ефект.

За да се достигне до първата приблизителна стойност на размерите на бъдещото затопляне, може да се предположи, че сравнителната влажност на атмосферата остава постоянна, като в този случай прогнозираното затопляне значително надвишава това, което е усетено. Затова симулациите на модела трябва да обяснят защо ефектът на затопляне през ХХ в. бе по-малък от очакваното, а не по-голям. Стандартното обяснение, което е възприето от Междуправителствената група за промените в климата, се позовава на допълнителните последици от антропогенните аерозоли във въздуха. (Аерозолите, произведени при процесите на горене и други промишлени дейности, имат тенденцията да отразяват слънчевата светлина и по този начин охлаждаат Земята.) Ако това действително е така, пълната сила на парниковото затопляне, причинено от предходни емисии на въглероден диоксид, тепърва трябва да се усети.

Критиците изтъкват, че динамиката на водния цикъл в атмосферата е много сложна и не е добре уловена от съвременното поколение модели. Въздействието на антропогенните парникови газове е доста малко в сравнение с предизвикания от водата парников ефект и зависи от тънки подробности в разпределението на водата между облаците и водните пари, а при последното – между горната и долната тропосфера. Промените в тези параметри могат принципно да обяснят защо повишаването на температурите е под очакваното, като в този случай глобалното затопляне може и да не е толкова голямо, колкото се предполага.

Колкото и да са правдоподобни такива алтернативни обяснения<sup>35</sup>, те не предоставят нещо повече от още един възможен начин за сверяване на простите изчисления по модела с действителните наблюдения. Освен това струва си да се отбе-

<sup>34</sup> Нашият колега Джим Хансен от института „Годард“ за космически изследвания в НАСА изтъкна, че простичката концепция за това, че ледниците се топят от върха надолу, вероятно е грешна и че в действителност ледниците се разпадат много по-бързо отвътре и в основата на ледника. Водата, която се образува на върха, е по-тежка от леда и след като се получи достатъчно от нея, за да достигне основата на ледника, тя ще го дестабилизира и ще ускори изчезването му. Щом ледът попадне в океана чрез охлаждането му, той допринася за положителна обратна реакция, като намалява загубите от излъчването от океана към небето.

<sup>35</sup> Линдзен, Чу и Ху (2001) дават алтернативно обяснение за отрицателната обратна реакция върху глобалната средна температура, като внимателно отбелязват, че техният механизъм е само правдоподобен.

лежи, че глобалната средна температура не е особено добър параметър за описване въздействието на климатичните промени. Те могат да се проявяват в някои части на света не чрез температурни промени, а например като промени в хидроложкия цикъл (изпаряване и валежи)<sup>36</sup>.

Освен последиците върху климата на сушата и в океаните има химични промени, дължащи се на въглеродния диоксид. Евтрофикацията (хранително обогатяване, което благоприятства развитието на растения, особено на конкретни растения) с въглероден диоксид в естествените екосистеми може да окаже сложно въздействие, а тъй като тези системи са постигнали крехък баланс при съществуващите концентрации на въглероден диоксид, промените в него имат склонността да нарушават техния баланс. Като пример може да се разгледа проявлението на факта, че тъй като пълзящите растения в тропическите гори се възползват от прекалено високите нива на въглероден диоксид повече от дърветата, тежестта на по-бързо растящите пълзящи растения се увеличава дотам, че поддържащите ги дървета биват увредени (Филипс и Кол, 2002). Въздействията на прекомерното количество въглероден диоксид върху горите са сложни и могат да предизвикат обратни реакции, трудни за прогнозиране. Например изглежда, че горите при умерените географски ширини в Европа и Северна Америка реагират на прекомерното количество въглероден диоксид, като увеличават своето общо поглъщане на въглерод, докато горите при големите географски ширини отделят въглерод, тъй като уловеният в студена или замръзнала почва въглерод се освобождава по-лесно<sup>37</sup>.

Освен самото затопляне може би най-голямото проявено въздействие на повишените концентрации на въглероден диоксид е химическата промяна в повърхностните води на океаните. Повърхността на океана се стреми към химически баланс с атмосферата. С увеличаването на парциалното налягане във въздуха над водата разтвореният в океана въглероден диоксид се увеличава пропорционално. В *Биосфера 2* бе показано, че тези промени водят до намаляване

на въглеродната фиксация между варовитите организми като коралите: удвояването на въглероден диоксид във въздуха би намалило кораловия растеж с около 40 %<sup>38</sup>. Предполагайки, че рифът първоначално е повече или по-малко баланс между растеж и унищожаване, намаляването на растежа с около 40 % почти гарантира сериозното намаляване на рифа.

По този начин само с няколко моделни предположения може да се получи почти пълна сигурност за това, че въздействието върху кораловите рифове от удвояването на въглеродния диоксид е голямо. Действително много вероятно е кораловите рифове да се разпаднат при такива условия<sup>39</sup>. Тъй като те са важни центрове на биоразнообразие в тропическите океани, тук също може да се твърди, че въздействието на подобна промяна върху местните екосистеми и човешките общности, живеещи върху или близо до рифовете, ще бъде огромно. По този начин кораловите рифове дават подходящ пример за екосистема, която би била засегната от увеличените концентрации на парникови газове по няколко начина: чрез затопляне, чрез повишаване нивата на океаните и чрез окисляване на океаните.

### Опасна антропогенна намеса

Стандартният икономически подход към проблема с въглеродния диоксид е да се сравняват разходите по намаляване на въглеродните емисии с очакваните ползи (избегнати опасности за околната среда). След това намаляването на емисиите се търси до точката, при която неговата пределна себестойност е равна на пределната полза. Трето измерение е да се вземе предвид потенциалът за адаптиране, при което се предприемат мерки за „живеене с въглеродния диоксид“ – например чрез укрепване на бреговете зони, изграждане на изкуствени коралови рифове или планиране, съобразено с по-високи температури. По подобен начин инвестициите в адаптиране се правят до точката, при която неговата пределна себестойност е равна на пределната полза.

<sup>36</sup> Скорошен доклад на Робърт Д. Кес (2005) представя доказателства, които противоречат на твърденията на Линдзен, Чу и Ху.

<sup>37</sup> За резюме вж. Слайсингер и Андрюс (2000).

<sup>38</sup> Експериментите в *Биосфера 2* и техните последици са разгледани в Лангдън и др. (2000).

<sup>39</sup> Възможността за голям срив на кораловите рифове е разгледана от Клейпас, Будемайер и Гатусо (2001).



Световната общност обаче предприе друг подход, ако не на практика, то поне на теория. Приложимото международно законодателство за климата е Рамковата конвенция на ООН по изменение на климата от 1992 г. РКООНИК задължава всички подписали държави – САЩ и 188 ратифицирали държави – със „стабилизирането на концентрациите на парникови газове в атмосферата до ниво, което би предотвратило опасна антропогенна намеса в климатичната система” (член 2, курсивът е на авторите). Освен това според този член стабилизирането „трябва да бъде постигнато в такава времева рамка, че да се даде възможност на екосистемите да се адаптират по естествен начин към промените в климата, да се гарантира, че производството на храни не е застрашено и да се даде възможност на икономическото развитие да продължи по устойчив начин” (член 2). Договорът за климата не призовава за балансиране на разходите и ползите по предотвратяване на климатичните промени, а по-скоро призовава за избягване на опасна антропогенна намеса. Договорът обаче отбелязва, че мерките за избягване на опасна антропогенна намеса трябва да бъдат осъществени рентабилно, като се сведат до минимум разходите по постигане на целта:

*Страните трябва да вземат предпазни мерки за предвиждане, предотвратяване или свеждане до минимум на причините за климатичните промени и за смекчаване на техните неблагоприятни последици. Когато има опасности от значителни или необратими увреждания, липсата на пълна научна сигурност не бива да се използва като основание за отлагането на такива мерки, като се има предвид, че политиките и мерките, занимаващи се с климатичните промени, трябва да бъдат рентабилни, за да осигурят глобални ползи при най-ниските възможни разходи.*

Договорът също така определя какво се има предвид под неблагоприятни последици върху климата:

*„Неблагоприятни последици от климатичните промени” означава промени във физическата среда на флората и фауната, следствие от климатични промени, които имат значителни вредни последици за състава, устойчивостта или производителността на естествените и изкуствените екосистеми, върху функционирането на обществено-икономически-*

*те системи или върху човешкото здраве и благосъстояние (член 1).*

Накратко казано, РКООНИК призовава за подход с минимални разходи за ограничаване на значителните вредни последици върху естествените и изкуствените екосистеми, а не за балансиране на общите разходи и приходи по смекчаването (и адаптацията). Това е разумен подход към ситуация, при която големи промени в екосистемите, дължащи се на антропогенни климатични промени, се възприемат като имащи значителни, но също така неизмерими последици за глобалното общество. На практика обаче САЩ и някои други страни (например Австралия) не спазиха този подход, а вместо това прибягнаха до анализ на разходите и ползите. Администрацията на Буш твърди, че разходите по смекчаването ще надвишат ползите и затова отхвърли всякакви конкретни климатични цели.

Сред европейските правителства и анализатори идеята за поставяне на лимити върху въглеродния диоксид с цел избягване на опасна антропогенна намеса е много по-популярна. Предложени са два вида ограничения. Първият вид установява стандарт за общото увеличаване на температурите (например максимум 2 °C), след това се стреми да намали предположеното увеличаване на въглеродния диоксид и други парникови газове, което с малко не би позволило температурите да се повишат над определената горна граница. Вторият директно се занимава с целите по въглеродния диоксид, като отчита, освен всичко останало, че той засяга екосистемите чрез химичните, както и чрез климатичните си въздействия. И при двата подхода общата цел е да се постигне максимална концентрация на въглероден диоксид в атмосферата между 460 и 560 части от милиона в единица обем (ppm) в сравнение с настоящата концентрация от 380 ppm и прединдустриалната начална позиция от 280 ppm. Много други експерти призовават за лимит при или под 560 ppm (т.нар. „2x” стандарт, тъй като 560 ppm би представлявало удвояване на прединдустриалната концентрация на въглероден диоксид). В занимаващата се с климата научна общност има почти пълно единодушие, че утрояването на прединдустриалната концентрация (до 840 ppm) ще представлява катастрофален риск с оглед на настоящите научни познания, включително голяма вероятност за стопяване на ледените пластове в Гренландия и

Антарктика, с придружаващото голямо покачване на морското ниво, както и сериозната вероятност от предизвикване на обратни реакции, които да доведат до резки климатични промени.

Каквато и да бъде конкретната цел, факт е, че неограниченият икономически растеж през следващите сто години вероятно ще достигне тези високи стойности и дори ще ги надмине. Затова е важно да бъдат осигурени алтернативи на настоящата енергийна инфраструктура, като това трябва да стане в скоро време. Симулационният модел, представен по-нататък в тази статия, показва, че неограниченото потребление ще доведе до въглеродни емисии от около 1 600 Gt през този век, а концентрацията на въглерод ще достигне около 900 ppm, много над почти всички оценки за горния праг на опасната антропогенна намеса.

### Към солидна политика по климата

Ключовият избор за политиката по климата е дали, с колко и от кого ограничените икономически ресурси да бъдат изразходвани за смекчаване на емисиите парникови газове. Трябва ли да бъде консервирана енергията? Да бъдат ли улавяни и складирани въглеродните емисии? До каква степен и на каква стойност? Една солидна стратегия по смекчаването трябва да постигне четири цели:

- Да избегне нарушаването на зоната на необратима опасност, като определи достатъчно ниска цел за избягване на непоправимите последици от въглеродния диоксид като значително измиране на видове или резки климатични промени. Целта трябва редовно да бъде преразглеждана с оглед на новите научни доказателства.
- Да приложи *глобална* стратегия за смекчаване, тъй като въглеродните концентрации зависят от обема на глобалните емисии, а не от тяхното разпределение.
- Да сведе до минимум настоящата дисконтирана стойност на разходите, като разпредели усилията по смекчаване за дълъг период.
- Да бъде справедливо разпределена между богатите и бедните държави.

С оглед на неяснотите и инерцията на увеличаване на въглеродните концентрации при дългосроч-

ната енергийна инфраструктура в наши дни и нарастващото глобално търсене на енергийни услуги има смисъл да се определи цел като 450 до 500 ppm до 2050 г., а горната граница да бъде 560 ppm (въглеродният „2x“ стандарт) през останалата част на столетието. Най-доброто сегашно доказателство е, че нивата между 450 и 560 ppm са заплаха от опасна антропогенна намеса в екосистемите, но допълнителното изследване ще хвърли повече светлина върху конкретните опасности и горните прагове.

Противопоставянето на САЩ на тези широко предлагани лимити би било разбираемо (и вероятно ще надделее в политически аспект), ако икономическата стойност на постигането на тези цели наистина се окаже астрономическа. За щастие изглежда случаят не е такъв. Въпреки че технологичните варианти и разходите по тях са неясни, има основания да се смята, че в крайна сметка икономическите разходи ще се окажат доста скромни. Целеви нива от 450 до 500 ppm към 2050 г. най-вероятно могат да се постигнат при стойност доста под 1 % от глобалния брутен продукт, ако целевото ниво бъде възприето достатъчно рано, за да може да се разпределят във времето периодите за научноизследователска и развойна дейност.

За да се намали общата стойност на смекчаването, процесът на адаптация трябва да включва ниски по стойност инвестиции в смекчаването където и да е по света при еднакво третиране на богатите и бедните държави. Настоящата стойност на смекчаването трябва да бъде изравнена в различните части на света с течение на времето. В действителност голяма част от адаптацията ще бъде в бързоразвиващата се Азия. Богатите държави трябва да помогнат за покриване на тези разходи въз основа на принципа на справедливост. Инвестициите за намаляване на въглерода (например чрез електроцентрали, снабдени с VCB) трябва да бъдат извършвани постепенно, с инсталирането на новите съоръжения, тъй като смекчаването в новите инсталации като цяло е много по-евтино от модернизиранието. Именно защото модернизиранието е толкова скъпо, смекчаването ще отнеме десетилетия, а не просто години, и трябва да бъде въвеждано с много дълъг период за изпълнение, ако целевите въглеродни концентрации няма да бъдат нарушавани.

Най-обещаващите евтини варианти включват преминаването на глобалния автомобилен транспорт към автомобили с ниски емисии – например чрез поетапната смяна на сегашните автомобили с хибридни, както и въвеждането на УСВ във всички електроцентрали и други големи промишлени обекти, работещи с изкопаеми горива.

## **ВАРИАНТИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ВЪГЛЕРОДА С ПРОМЕНЛИВИ МАЩАБИ**

Въпреки че в момента много технологии се конкурират за дял от бъдещия енергиен пазар, много малко от тях могат да функционират при необходимите мащаби, които ще се измерват с десетки теравата. Има три технологични опции, които поотделно могат да осигурят принципно решение на проблема с климатичните промени и да задоволят енергийното потребление на света. И трите обаче не са доказани в необходимите мащаби, а също така изискват допълнително разработване. Първият вариант, който е най-съвместим със сегашните енергийни системи, е въвеждането на УСВ в действащия режим на използване на изкопаеми горива с цел предотвратяване на натрупването на въглеродния диоксид в атмосферата. Другите два са ядрената енергия и енергията от слънчевата светлина.

Пълният преход към ядрена енергия и енергия от слънчевата светлина очевидно ще отстрани проблема с въглерода. Поради това тази част от статията се концентрира върху технологиите, необходими за превръщането на сектора на енергия от изкопаеми горива в сектор с въглеродно неутрална инфраструктура. Въглеродно неутралната технология за изкопаеми горива е важна, тъй като съвременната енергийна инфраструктура на света почти изцяло е основана на изкопаем въглерод. Отстраняването на най-големия към настоящия момент играч вероятно ще причини сериозни смущения в предлагането на енергия. По-добра алтернатива е разработването на средства за УСВ.

Повечето експерти в бранша считат улавянето на въглерод за по-трудната част от проблема с УСВ. Тук обаче започваме дискусия за предизвикателството, което представлява съхраняването

на въглерода, тъй като в крайна сметка съхраняването е задължително ограничение при потреблението на изкопаеми горива. Освобождаването от няколко милиона тона въглероден диоксид не е проблем с настоящата технология. Но за постигането на световна икономика с нулево нетно съдържание на въглерод, и то докато все още се работи с изкопаеми горива, са необходими технологии за освобождаване от хиляди гигатонове въглероден диоксид през столетието. По тази причина предизвикателството, което представлява съхраняването на въглерода, е в мащаба и времевия аспект на наличните варианти за съхраняване (Лакнер, 2003).

Разбира се, преди да бъде съхраняван, въглеродният диоксид трябва да бъде уловен, което се постига най-лесно при големи, концентрирани източници на въглероден диоксид, каквито са електроцентралите. Затова са необходими технологии за рентабилното му улавяне в електроцентралите, в заводите за производство на водород и в други големи, концентрирани източници като фурни за стомана и пещи за цимент (Мец и др., 2005).

Третата ефективна технология ще направи възможно улавянето на въглеродния диоксид пряко от въздуха. В наши дни това може да се постигне чрез отглеждане на биомаса, но си струва да се вземат предвид химични системи, които могат да постигнат същия ефект. Наличието на ефективно средство за улавяне на въглеродния диоксид в атмосферата би променило картината рязко, защото би позволило продължителното използване на горива на въглеродна основа в сферата на малки, разпръснати и мобилни приложения като автомобили и самолети без притеснения за последиците от въглеродния диоксид (Лакнер, Зиок и Граймс, 1999).

### **Варианти за съхраняване на въглерод**

Съхраняването на въглерод в биомаса е предложено като един от вариантите за съхраняване. Въпреки че подобно съхраняване е практически възможно, в основата си то е ограничено по обхват. Съществуващата в света биомаса съдържа 600 GtC (еквивалент на 2200 Gt въглероден диоксид) и всеки опит за увеличаване на тази цифра в общи линии ще бъде ограничен от последи-

ците за околната среда<sup>40</sup>. Дори увеличаването на световната биомаса със 100 GtC ще бъде много сериозна промяна, а поддържането на запасите от биомаса на такива равнища ще изисква постоянни усилия. Дори без активна намеса произведената биомаса ще се превърне обратно във въглероден диоксид за няколко години или най-много (при твърдата дървесина) за няколко десетилетия. Затова съхраняването в биомаса не е достатъчно дългосрочно, за да бъде дори разглеждано като решение на проблема с улавянето на въглеродния диоксид.

Във всеки случай отглеждането на биомаса с цел улавяне на въглеродния диоксид, а след това съхраняването на ценната биомаса изглежда контрапродуктивно освен в районите с голямо биоразнообразие, в които основната цел е биологичното консервиране, а не управление на въглерода. В други райони има повече смисъл биомасата да бъде превръщана в гориво. Това обаче ще има за резултат използването на ценна земеделска земя за производство на гориво с по-ниска стойност в сравнение с културата, която ще замести.

Други варианти за съхраняване на въглеродния диоксид включват освобождаване в океана, подземно инжектиране в геоложки формации и химическата фиксация като твърд карбонат<sup>41</sup>. Освобождаването в океана на практика прескача естествения цикъл на въглерода: около 70 до 80 % от емитирания въглероден диоксид в крайна сметка ще попадне в океана<sup>42</sup>. Затова инжектирането на въглеродния диоксид в океана вместо освобождаването му в атмосферата намалява временния излишък във въздуха, който създава парниковия ефект. Освобождаването в океана се възползва от по-големия резервоар, който може да се справи с по-големи количества въглероден диоксид, а това от своя страна намалява мащаба на проблема. Световният океан може да съхранява още 1200 GtC, преди да достигне баланс с атмосферата, която съдържа

двойно повече въглероден диоксид в сравнение с преиндустриалната ера<sup>43</sup>. Това е много по-малко от 39 000 GtC, които вече са разтворени в океана<sup>44</sup>, но би представлявало доста голяма част от общите емисии. Този вариант обаче означава удвоено съдържание на въглероден диоксид в атмосферата за хиляди години.

Няма практически начин за постигане на изцяло еднакво разтваряне на инжектирания въглероден диоксид в световния океан. Затова задължително трябва да бъдат взети предвид последиците за околната среда от причиненото от въглеродния диоксид окисляване, където се достигне до такова. Промяната на съдържанието на въглероден диоксид в горната част на океана, за да постигне баланс с удвоеното парциално налягане на въглеродния диоксид в атмосферата, значително ще промени химичния състав на повърхностните води. Вече бе показано, че подобна промяна ще затормози растежа на коралите. Последиците върху дълбочинните екосистеми са по-слабо известни.

Докато атмосферата остане в химичен баланс с океана, инжектираният въглероден диоксид ще остане там за безкрайно дълго време. Ако обаче стане така, че океанът съдържа повече въглероден диоксид от необходимото за баланс с атмосферата, той ще се върне в нея, дори да е инжектиран на голяма дълбочина, за по-малко от времето за пълно обръщане на океана, което е по-малко от 1000 години<sup>45</sup>. За въглерода, съхраняван на средна дълбочина, времето за съхраняване е едва няколкостотин години. Изводът е, че екологичното въздействие от съхраняването в океана, съчетано с краткото време за това, прави съхраняването в океана вариант, който трябва да се използва единствено в краен случай. Освен това този вариант не е особено привлекателен.

Метод за съхраняването на въглероден диоксид с по-дълготраен ефект би бил инжектиране в подземни резервоари. Това вече се прави в срав-

<sup>40</sup> Например вж. резюме на науката за цикъла на въглерода в Шимел и др. (1995).

<sup>41</sup> Скорошен доклад на Междуправителствения панел по измененията в климата за улавянето и съхраняването на въглерода подробно обсъжда последните постижения в тази област (Мец и др. 2005).

<sup>42</sup> Например вж. Кешги и Арчър (2004).

<sup>43</sup> Тази цифра е обяснена първо от Такахаша, а след това е обсъдена донякъде подробно в Лакнер (2002).

<sup>44</sup> Подробности за мащабите на потъванията са дадени в Шимел и др. (1995).

<sup>45</sup> Например вж. Арчър, Кешги и Раймер (1997).

нително малки мащаби с цел подобряване на извличането на нефт. Въглеродният диоксид от газовите кладенци в Колорадо се транспортира по тръбопровод до Западен Тексас, където се инжектира в нефтените полета с цел увеличаване на добива<sup>46</sup>. Петролните компании са плащали по 15 щатски долара на тон за този въглероден диоксид в миналото; текущите пазарни условия позволяват по-високи цени. Част от инжектирания въглероден диоксид остава под земя, а този, който се върне на повърхността, се усвоява и използва наново. На практика никаква част от вкарания в полетата въглероден диоксид не се изпуска.

Докато в Колорадо и Западен Тексас самият въглероден диоксид е газ от изкопаеми горива, извлечен под земя, в бъдещите подобрени дейности за добив на нефт въглеродният диоксид може да бъде отпаден поток от потреблението на изкопаеми горива. Използването на отпаден поток въглероден диоксид в подобрените дейности за добив на нефт може да отстрани излишния въглерод от околната среда, въпреки че подпомага изваждането на нов въглерод на повърхността. Предимството на този вариант за съхраняване е, че всъщност носи икономическа полза, която може поне частично да компенсира разходите по улавяне на въглеродния диоксид. Оценките на капацитета за съхраняване, свързан с подобрения добив на нефт, варират, но са от порядъка на 60 до 200 Ст въглероден диоксид, което е по-малко от необходимото в крайна сметка. Все пак този процес е отправна точка за геолошко съхраняване, което ще позволи постепенното въвеждане на новата технология (Мец и др., 2005).

Могат да се вземат предвид и други резервоари на изкопаеми горива. Икономически ползи биха донесли и поддържането на налягане в залежите на природен газ или инжектирането на въглероден диоксид във въглищните пластове, разположени на прекалено голяма дълбочина, за да бъдат добивани, с цел отстраняване на намиращия се във въглищата метан<sup>47</sup>. През последните 20 години тези въглищни пластове се превърнаха в

значително находище за производството на метан в района на Скалистите планини. Извличането на метан от дълбочинни въглищни пластове с помощта на въглероден диоксид обаче, все още е в начална фаза и трябва да преодолее няколко препятствия, преди да се превърне в обичайна практика.

След като бъдат запълнени всички подземни находища, в които инжектирането на въглероден диоксид осигурява икономически ползи, той може да бъде инжектиран в други обекти, които дават възможност само за съхраняване. По света има множество изоставени нефтени и газови полета, някои от които могат да поемат големи количества въглероден диоксид. Трудността при този подход е, че много налични сондажи трябва да бъдат обезопасени и запечатани, за да се избегне връщането на въглеродния диоксид на повърхността.

Най-големите места за съхраняване на въглероден диоксид са дълбочинните солени водоносни пластове, които не са били сондирани и по тази причина представляват ниска заплаха за изтичане. Норвежката компания Statoil вече използва такъв резервоар в платформа за сондиране в Северно море за освобождаване от въглеродния диоксид, отстранен от природния газ, добиван от находището (природният газ от тези кладенци съдържа около 10 % въглероден диоксид, който трябва да бъде отстранен, за да може газът да отговаря на промишлените стандарти). В миналото този въглероден диоксид просто би бил изпуснат в атмосферата, но Норвегия вече начислява такса от около 50 щатски долара на тон за такива емисии<sup>48</sup>. В отговор на това Statoil е избрала да отстранява въглеродния диоксид от природния газ не в отдалечена станция на сушата, а направо на платформата, като инжектира въглеродния диоксид в солен водоносен пласт на 800 метра под морското дъно (Мец и др., 2005).

Тази платформа, която функционира от 1996 г., инжектира около 1 млн. тона въглероден диоксид годишно. Изглежда, че газът е останал на място, като постепенно се разпределя по върхното уп-

<sup>46</sup> Подробни сведения могат да бъдат открити в Мец и др. (2005).

<sup>47</sup> Метанът от въглищни пластове е дискутиран в Мец и др. (2005).

<sup>48</sup> Действителната цена се определя в норвежка валута и затова има леки колебания спрямо долара. За подробности вж. Херцог, Елиасон и Карщад (2000).

лътнение на пласта. Редица подобни обекти ще влязат в действие през идните няколко години. Техническите проблеми с безопасността и дългосрочната стабилност все още се дискутират в научната общност. Въпреки това ясно е, че тези образувания имат голям капацитет, който е безопасен и може да задържа инжектирания въглероден диоксид за неопределено време.

Стойността на инжектирането е малка: обичайните оценки, давани в доклада на Междуправителствения панел по измененията в климата, варират от 0,50 до 8 щатски долара на тон въглероден диоксид, което при описаното норвежко находище би добавило 2,5 до 40 цента към стойността на гигаджаул природен газ<sup>49</sup>. Стойността на отстраняването на въглеродния диоксид от потока природен газ е по-висока, но във всички случаи трябва да бъде заплатена.

По този начин подземното инжектиране осигурява опция за въглеродно съхраняване с капацитет, достатъчен за десетилетия. С увеличаване на съхраняваните количества обаче ще нарастват опасенията от изтичане. Например, ако от 1000 Gt складиран въглероден диоксид изтече една част на хиляда годишно, получената се годишна емисия на 1 Gt е значителна. Предизвикателствата за безопасността, постоянността и стойността ще определят ефективния мащаб на наличния капацитет за складиране. Колкото по-големи са ограниченията, толкова по-малък ще бъде броят резервоари, които ще изпълняват необходимите критерии. В резултат на това е трудно да се предвиди какъв капацитет реално ще бъде на разположение. Простият пространствен анализ обаче предполага, че наличният капацитет ще изпита затруднения при поемането на целия въглероден диоксид, който вероятно ще бъде произведен. Трябва да се има предвид, че в течна форма целият въглероден диоксид, който вероятно ще бъде произведен в САЩ през идните 50 години, би покрил цялата сухоземна част на САЩ с дълбочина около 5 cm. Съхраняването на такъв огромен обем действително ще представлява предизвикателство.

Последният вариант за освобождаване от въглероден диоксид е химичното превръщане в твърди карбонати. Въпреки че този процес по принцип е по-скъп, защото се нуждае от химична база, спрямо която въглеродната киселина, образувана от въглеродния диоксид и водата, да бъде неутрализирана, той решава проблемите с постоянността, безопасността и капацитета. След образуването им карбонатите са стабилни и няма да изпуснат въглеродния диоксид обратно в атмосферата. Освен това те са екологично безвредни и се срещат в големи количества в природата. Ресурсната база за образуване на карбонати далеч надвишава наличните изкопаеми горива и затова не може да бъде изчерпана.

Реакцията при карбонизация прилича на химичното изветряване, при което магнезиевите и калциевите силикати се преобразуват в стабилни, твърди карбонати. Карбонизацията не изисква висока температура; в действителност тя настъпва спонтанно при нормални температури на околната среда, но скоростта на реакцията е много бавна, а технологията за ускоряване на реакцията все още се разработва (Лакнер, 2002).

Минните дейности, необходими за осигуряване на суровинната база, ще бъдат едромасщабни, но не повече от тези, свързани с добива на въглища. Предизвикателството е стойността на самото химично преобразуване. Настоящата технология би определила цената на около 80 щатски долара за тон въглероден диоксид, но химичните подобрения могат да окажат натиск върху цената в низходящ аспект. За да бъде практично съхраняването в минерална форма, стойността за освобождаване не бива да надвишава 30 щатски долара за тон, като при това ниво тя ще стане сравнима със стойността на другите етапи от процеса. Цената няма да може да бъде снижена значително, защото минните дейности и освобождаването от отпадъците, отработени технологии с малко възможности за подобрения, ще добавят около 10 щатски долара на тон въглероден диоксид<sup>50</sup>.

<sup>49</sup> Мец и др. (2005, с. 33). Разходите по мониторинга добавят към стойността на инжектирането 10 до 30 цента на тон въглероден диоксид.

<sup>50</sup> Съхраняването под минерална форма е обсъдено подробно, включително ценовия диапазон, в доклада на Междуправителствения панел по измененията в климата за улавянето и съхраняването на въглерод. Мец и др. (2005).

В обобщение съхраняването на въглерод може да започне сега с подземно инжектиране, чиято стойност в много случаи би била повече от компенсирана от ползите, получени от допълнително добития нефт или газ. След изчерпването на тези резервоари от странични продукти е на разположение голям обем за съхраняване, като при него стойността на съхраняването и следенето на въглеродния диоксид е много ниска. Дали тези резервоари имат достатъчен капацитет да посрещнат нуждите на идното столетие, все още не е ясно, но зад този вариант стои друг – съхраняването в минерална форма. При него обаче, стойността на химичната обработка трябва да намалее при коефициент около 4 или 5, за да се поддържа енергийният разход в рамките на 30 % от сегашната стойност. Но тази степен на подобрене е много малка в сравнение с това, което би било необходимо за въвеждане на горивни или соларни клетки, чиито разходи са около един или два пъти по-високи от конкурентните равнища. Всъщност УСВ е толкова атрактивен вариант, че изпитването на неговата осъществимост в много райони на света трябва да е между водещите приоритети на съответните политики. Ако могат да бъдат открити дългосрочни и евтини варианти за съхраняване, което в момента изглежда обосновано предположение, много вероятно е УСВ да осигури важна стратегия за смекчаването на последиците за десетилетия напред.

### Улавяне на въглерод при големи източници

Преди освобождаването на въглеродния диоксид той трябва да бъде уловен и транспортиран до обекта за освобождаване. Транспортът не създава допълнителни предизвикателства, но улавянето ще изисква нови технологии. Очевидното място за улавянето на въглеродния диоксид е там, където той се произвежда в големи, концентрирани количества. Най-големите подобни източници са електроцентралите, работещи с изкопаеми горива.

По принцип най-лесният начин за улавянето на въглеродния диоксид, произведен от горенето на

изкопаеми горива, е отстраняването му от отработения газ. Този вариант е добре проучен и обикновено води до 30 % увеличен разход на енергия<sup>51</sup>; т.е. дейността по самото отстраняване. Добавката в цената на електроенергията би била подобна. Основният недостатък на тази технология е, че когато бъде инсталирана като модернизация, централата работи далеч под оптималното си КПД. Тъй като стойността на отстраняване на въглеродния диоксид далеч надвишава стойността на входящите въглища, електроцентрала, която сама събира своя въглероден диоксид, трябва да бъде повторно оптимизирана в значителна степен с цел повишаване на КПД. Вследствие на това модернизацията на технологията за улавяне е много по-скъпа на единица произвеждана енергия в сравнение на инсталирането на същата технология в нова централа.

Като алтернатива електроцентрала може да работи с чист кислород вместо с въздух. В такъв случай отработеният газ е смес от въглероден диоксид и вода, които лесно могат да се разделят. Рециклирането на отработения газ би поддържало температурата в котела на поносими нива. Такива централи могат да постигнат малко по-голямо КПД, но и те ще трябва да отделят 24 до 40 % от своето производство на електроенергия за отделянето, в този случай на кислорода от въздуха<sup>52</sup>. Разходите са сходни с тези, описани в горния случай.

Допълнителният енергиен разход е много по-нисък в централите с интегриран комбиниран цикъл с газификация (ИКЦГ), а в някои случаи допълнителният разход дори може да бъде отстранен. В тези централи въглищата се превръщат в горивен газ, който гори, за да задвижва турбина, а отпадната топлина се използва за създаване на пара. Възможно е газът да бъде преобразуван над турбината в поток водород, а въглеродният диоксид да се улавя над турбината, където вече е подложен на налягане.

Завършеният проект на електроцентрала, работеща на изкопаем въглерод, би съчетавал голямо КПД, улавяне на въглероден диоксид и чисто

<sup>51</sup> Мец и др. (2005, с. 25). Цитираната цифра за нов завод за прахообразни въглища е 24 до 40 % увеличение на енергийните потребности поради улавянето с представителна стойност 31 %.

<sup>52</sup> Шведската електроенергийна компания Vattenfall строи такъв завод южно от Берлин (фирмено съобщение за пресата от 19 май 2005 г.) За описание на технологията вж. Андерсън, Джонсън и Стрьомберг (2003).

функциониране. Такава централа би използвала горивни клетки за окисляване на горивния газ във въглероден диоксид и вода (Йегулалп, Лакнер и Зиок, 2001). Тя би могла да газифицира въглища и да улавя въглеродния диоксид над горивната клетка, докато произвежда водород, или да отстранява въглеродния диоксид отдолу, след като въглеродният газ е бил окислен в твърдооксидна горивна клетка. Във всеки отделен случай или при хибриден проект, който използва и двата варианта, е възможно постигането на изключително високо КПД при преобразуването на енергията и същевременно елиминирането на емисиите на всички замърсители в атмосферата. Тъй като азотът във въздуха не се свързва с продуктите на горенето и освобождаването от въглеродния диоксид е постоянно, не остава газообразен отпадъчен флуид. По тази причина е възможно коминът за отпадъчни газове да бъде затворен и да се използва предимството от синергията между отстраняване на замърсяването и избягването на емисиите на въглероден диоксид.

По този начин е възможно при допълнителен разход на енергия и допълнителна стойност от 30 % да се изградят нови електроцентрали, които улавят целия въглероден диоксид, произведен от тях, но иначе са много сходни с проектите на сегашните централи. Стойността на модернизацията винаги ще бъде значително по-висока от монтирането в нови централи, тъй като старите централи просто не са били проектирани за такива промени. С течение на времето КПД на новите централи с улавяне на въглероден диоксид ще се повиши, а бъдещите централи, работещи с въглища като гориво, почти сигурно ще включват газификация на въглищата и постепенна декарбонизация на горивния газ преди изгарянето му в газова турбина. На практика подобни централи произвеждат водород, преди да произвеждат електроенергия. Чрез производството на водород, а не на електроенергия те също отварят вратата към декарбонизацията на останалите сектори от енергийната икономика.

### **Справяне с емисиите на въглероден диоксид от децентрализирани източници**

При разпръснатите и често мобилни източници на въглероден диоксид улавянето при източника обикновено не е вариант. Това се вижда най-

добре при автомобилите. Изгарянето на 1 kg бензин произвежда около 3,1 kg въглероден диоксид. Тъй като въглеродният диоксид е газ при обичайни температури и налягане, улавянето му изисква или резервоар под налягане, или абсорбиращ материал, към който да се прикрепят. Всеки вариант увеличава теглото на автомобила, което прави това решение доста непрактично.

Оставащите варианти са три. Първо, може да се намали потребността от въглеродни горива в сектора на разпределяната енергия чрез значително подобряване на ефективността. Второ, тези горива могат да бъдат заменени с носители, свободни от въглерод, като електроенергия и водород. На последно място, емитирането на въглероден диоксид от тези източници може да се компенсира с отстраняването на равностойно количество въглероден диоксид от въздуха.

Най-големият източник на разпределени емисии е транспортният сектор. Употребата на малки котли, пещи и други енергийни приспособления в промишлеността, както и потреблението на енергия за битови нужди също представляват около 50 % от енергийния сектор, който не подлежи на улавяне на въглероден диоксид при източника.

**Автомобили с ниски емисии.** В транспортния сектор преходът към по-голяма икономия на горивата вече е в ход. В наши дни хибридните автомобили на бензин и електричество в Япония и САЩ и дизеловите автомобили в Европа са много по-икономични в сравнение с предишните поколения автомобили. В крайна сметка хибридите предлагат голям потенциал за подобрене, тъй като електрическите двигатели са много по-икономични при променливо натоварване. Те също така могат да осигурят висок въртящ момент при ниски скорости, което е трудно за двигателя с вътрешно горене. Новото поколение хибриди показва, че енергийната неефективност, възникваща от двойния източник на задвижване, е повече от преодоляна от повишената ефективност на самия двигател. С течение на времето и с усъвършенстването на батериите ефективността на хибридите вероятно ще нарасне, а зареждането на автомобилите с електроенергия в разпространяващите се станции значително ще понижи необходимостта от бензин. В наши дни много пътувания са на къси разстояния, което прави технически осъ-



ществимо зареждането на батерията преди потегляне и повторното ѝ зареждане при пристигане. По този начин емисиите на въглерод от такъв автомобил може да намалеят повече, отколкото предполагат подобренията в пробегата. Цените на бензина вече изглеждат достатъчно високи, за да стимулират прехода към хибриди и дизели, което повдига въпроса дали този преход не трябва да бъде считан за част от постоянните вътрешни процеси в икономиката, целящи намаляване на емисиите въглерод. Във всеки случай хибридите и дизелите на практика имат потенциала значително да намалят емисиите на въглероден диоксид в транспортния сектор без допълнителна цена за потребителя.

**Електрификация на търговския и жилищния сектор.** Електроенергията е най-често използваният енергоносител, свободен от въглерод. Използването ѝ е ограничено до приложенията с по-висока стойност, понеже като цяло тя е по-скъпа от химическите горива, които често се използват в жилищния и търговския сектор за генериране на топлина. (Сегашните пазарни условия в САЩ, където природният газ стана скъп, колкото електроенергията, са или отклонение, или отражение на ограничеността на природния газ.) Замяната на природния газ и течните горива с електроенергия би елиминирала разпръснатите източници на въглероден диоксид. Преобразуването на електроенергията директно в топлина обаче е неикономична употреба на този висококачествен енергиен ресурс. По-подходящ начин на употреба на електроенергията при нагряване е да задвижва термopомпа, която използва електроенергията за пренос на топлина от резервоар с ниска температура към резервоар с висока температура. Използвана по този начин, тя може да осигури повече енергия под формата на топлина на една сграда в сравнение с използваната електроенергия за нейното генериране. Дали подобни стратегии ще станат общоприети, до известна степен ще зависи от подобренията в термopомпите и тяхната рентабилност. Когато потребностите от топлина бъдат задоволени или чрез възобновяема енергия, или посредством електроенергия, генерирана по въглеродно неутрален начин, става възможно на практика да се елиминират всички емисии на въглерод от търговския и жилищния сектор. Подобна стратегия ще помогне в много отрасли на промишлеността.

**Водород.** Това, което остава, е употребата на котли и пещи, които често са трудни за замяна с електрическо отопление. Тук е възможно да се обмисли изпомпването на водород от голяма централа, произвеждаща евтин водород от въглища или други евтини въглеродороди. Това концентрира емисиите на въглероден диоксид в малко на брой места и така прави възможно улавянето му.

По принцип водородът може да навлезе и в транспортния сектор, но неговото съхраняване в автомобилите създава сериозно предизвикателство. Дори при използването на високо налягане технологията на работещите на водород автомобили трябва доста да се форсира, за да постигне висока ефективност на горивото, което да даде възможност за преминаване на приемливи разстояния между станциите за зареждане. Такива подобрения в ефективността биха помогнали и на автомобилите, работещи на въглеродородни горива, и по този начин биха запазили съотношението в тяхна полза. Водородът като енергоносител е по-подходящ за стационарни приложения; след това остава чисто икономическият въпрос, дали електроенергията или водородът предлагат по-евтина алтернатива.

**Извличане на въглероден диоксид от въздуха.** Последната алтернатива е улавянето на въглероден диоксид от въздуха. Показано бе, че концентрацията на въглероден диоксид в атмосферата е достатъчно голяма, за да даде възможност за неговото ефективно извличане. Действително едно устройство за улавяне на въглероден диоксид може да бъде сто пъти по-малко от вятърен генератор и да елиминира същото количество въглероден диоксид, каквото би било емитирано от двигател, работещ на изкопаеми горива, което би заменило генератора. Като пример осигуряването на 10 kW първична енергия от вятър (приблизително количеството енергия, употребявана на човек от населението в САЩ от изкопаеми горива) изисква вятърен генератор с работна площ около 80 m<sup>2</sup>. Обаче въглеродният диоксид, емитиран при производството на 10 kW енергия от изкопаеми горива, би бил уловен от колектор с работна площ под 1 m<sup>2</sup> <sup>53</sup>.

<sup>53</sup> За повече подробности вж. Лакнер, Зиок и Граймс (1999).

Стойността на улавяне на въглероден диоксид от въздуха се определя не от машините, които събират въглеродния диоксид, а от процеса на рециклиране на сорбента, към който се прикрепва въглеродният диоксид. Термодинамиката показва, че процесът на възвръщане трябва да е само малко по-скъп от еквивалентния процес в електроцентрала. Като последица изглежда осъществимо, но все още не е доказано, че улавянето на въглероден диоксид от въздуха може да компенсира емисиите на въглероден диоксид от разпръснати източници като автомобилите и самолетите. Настоящите оценки на стойността за този подход към улавянето показват, че той може да се извършва с текущо наличните, немодифицирани процеси за по-малко от 100 щатски долара на тон въглероден диоксид (Земан и Лакнер, 2004). Уместна цел за стойността на този процес би била около 30 щатски долара на тон, което би добавило около 25 цента към цената на галон бензин<sup>54</sup>.

## УСТОЙЧИВИ ЕНЕРГИЙНИ ПОЛИТИКИ

Тук представяме прост цифров вариант, който демонстрира пет солидни извода. Първо, ако се предположи, че глобалният икономически растеж продължи, светът все повече ще разчита на нискокалорийни въглеродни източници като въглища и вероятно на технологии за преобразуване на въглища в течности (процеса на Фишер-Тропш и евентуално други). На второ място, ще бъде невъзможно да се предотврати удвояването на въглеродните емисии през този век, ако стопанската дейност продължи, както обикновено: темповете на глобалния икономически растеж с лекота ще надделят над намаленията на енергоемкостта в обичайния ход на стопанската дейност. На трето място, икономическите разходи за поддържане на атмосферните концентрации на въглероден диоксид под 500 ppm между сегашния момент и 2050 г. няма да са големи в сравнение с мащабите на световната икономика, ако се предположи, че разходите са разпределени във времето и че обещаващите технологии (УСВ и хибриди) се окажат ефектив-

ни в големи мащаби. На четвърто място, през втората половина на това столетие ще са необходими в големи размери все още недоказани технологии като енергия от слънчева светлина и ядрена енергия в съчетание с енергоносители, свободни от въглерод (например водород) за промишлеността, транспорта, жилищна и търговска употреба. На пето място, при вероятността да се достигне удвояване на въглеродните лимити, ако стопанската дейност продължи както обикновено, има сериозни основания за ранни действия чрез всички евтини възможности.

Четири ключови предположения при проектиране на възможен сценарий са следните:

- Световната икономика може да бъде представявана от осем икономически района, в които доходите на човек от населението постепенно се доближават до тези в САЩ.
- Тенденцията реалният икономически растеж в САЩ да продължи при темп 1,7 % годишно.
- Световното население се увеличава според средносрочната прогноза на демографския отдел на ООН.
- Основните печалби от енергийна ефективност от 1,5 % годишно се постигат във всички сектори.

Непосредствените политически рецепти са:

- Суровият петрол постепенно ще трябва да бъде заместен от въглища, преобразувани в течни горива при използване процеса на Фишер-Тропш.
- Политиките по смекчаване на въглерода, особено насърчаването на УСВ и хибридните автомобили, ще трябва да бъдат внедрени своевременно.

Основните заключения на нашия анализ са:

- Концентрациите на въглерод трябва да бъдат задържани задължително под 500 ppm към 2050 г.
- Разходите за смекчаване ще бъдат много под 1 % от brutния световен продукт към 2050 г.

<sup>54</sup> Тази цел се основава на наблюдението, че апаратът за улавяне е малък и вероятно ще добави ниска стойност, и че стойността на необходимите входни материали (кислород и въглища) е значително под 30 щатски долара.

- След 2050 г. ще бъдат необходими допълнителни политики по смекчаването.

## Варианти

Разделяме света на осем района: САЩ, Западна Европа, други развити икономики (ДРИ), икономики в преход, Китай, Индия, други развиващи се азиатски икономики (ДРАИ) и всички останали развиващи се икономики (ОРИ). За удобство в общи линии следваме географските разделения, използвани от Службата за енергийна информация. При всички райони брутният продукт се измерва по отношение на паритета на покупателната способност в международни долари към 2002 г. Всеки район включва четири енергопотребяващи крайни сектора: жилищен, търговски, транспортен и промишлен. Всеки сектор използва първична енергия пряко и електроенергия, която на свой ред се базира на първична енергия. Тези структурни разделения следват тези на Службата за енергийна информация на САЩ. Първичната енергия е разделена на пет вида: нефт, газ, въглища, ядрена и възобновяема.

За САЩ се предполага, че ще бъде наблюдаван ръст при основен темп на реалния растеж от 1.7 % годишно, дългосрочна тенденция, наблюдавана при американската икономика от началото на XIX в. Този темп на растежа е малко под наблюдавания през периода 1950 – 1998 г., измерен от Ангъс Мадисън (Мадисън, 2001). САЩ действат като технологичен лидер в света, а за доходите във всички други държави се приема, че се доближават до дохода на човек от населението в САЩ при стандартен модел на конвергенция.

Конкретно нека  $Y(t)$  да бъде реалният доход на човек от населението в САЩ, получен от  $Y(t) = Y(0)(1,017)^t$ . За доход във всеки друг район  $Y^*$  дефинираме първоначалната разлика в нивото на доходите спрямо САЩ в логаритмично отношение като  $g^*(0) = \ln[Y(0)/Y^*(0)]$ , след което предполагаме постепенна конвергенция, както следва:  $g^*(t) = 0,98t g^*(0)$ . За всеки период  $t$ ,

$Y^*(t) = Y(t) \exp[-g^*(t)]^{55}$ . При тази спецификация  $t \rightarrow \infty$ ,  $g^*(t) \rightarrow 0$ , и  $Y^*(t) \rightarrow Y(t)$ . Можем леко да подобрим това, като приемем, че  $Y^*$  се доближава не до  $Y$ , а до някаква част  $\beta$  от  $Y$ . В такъв случай разликата се дефинира като  $g^*(t) = \ln[\beta Y(t)/Y^*(t)]$ . Предположението, че  $\beta < 1$  отчита всякакви съществуващи проблеми с управлението, географията или институционални фактори, които в дългосрочна перспектива биха довели до пропорционална разлика между  $Y$  и  $Y^*$ .

Избираме стойност на  $\beta < 1$  за всеки район  $i$ , различен от САЩ<sup>56</sup>. Това предположение води до непълна конвергенция на доходите на човек от населението и до забавяне на ръста на глобалното производство, отколкото ако  $\beta_i = 1$ . Две от нашите ключови констатации – че глобалните доставки на петрол ще бъдат вече подложени на напрежение от глобалния растеж и че емисионната крива при стопанска дейност, както обикновено, ще надвиши разумните лимити на въглерод в атмосферата – биха били още по-силни, ако вместо това възприемем  $\beta_i = 1$  за всички райони. Затова, макар че предпочитаме да грешим от предпазливост при прогнозиране на глобалния растеж, все пак можем да направим силно обосновани и солидни твърдения за необходимостта от алтернативни горива и контрол на емисиите на въглерод.

При прогнозирането на световното население, вместо да използваме оценките на ООН с петгодишен интервал, пригаждаме средносрочната прогноза на ООН, като вземаме данните на ООН за 2002 г. (базовата година), 2025 г., 2050 г. и 2100 г., след което напасваме гладък темп на растежа при геометрична прогресия между тези точки. Това пригаждане се прави за простота, но има слабо въздействие върху резултатите.

На последно място правим модел на базовия вариант за потребление на първична енергия и електроенергия, както следва. Нека  $S_{ij}$  да е потреблението на първична енергия в район  $i$ , сектор  $j$ . Приемаме, че потреблението на първична енергия ще расте пропорционално на ръста на производството във всеки район минус икономии

<sup>55</sup> Това предположение за годишно намаляване на разликата в размер 2 % съответства на оценките на Баро и Сала-и-Мартин (1995, с. 38).

<sup>56</sup> Основните стойности за  $\beta$  са: Западна Европа 0,8; ДРИ – 0,9; икономики в преход – 0,75; Китай – 0,8; Индия – 0,8; ДРАИ – 0,75 и ОРИ – 0,5.

от енергийна ефективност 1,5 % годишно. По този начин  $S_{ij}(t) = S_{ij}(0)[GNP_i(t)/GNP_i(0)](0,985)^t$ . Потреблението за всеки вид първична енергия (нефт, газ, въглища, ядрена, възобновяема и електрическа) се разглежда като фиксирано съотношение на  $S_{ij}$  въз основа на действителните съотношения през 2002 г., която е базовата година за модела на Службата за енергийна информация. По този начин във всеки сектор потреблението на всеки вид първична енергия и електроенергия се предполага, че ще расте пропорционално на общото потребление на енергия в сектора<sup>57</sup>.

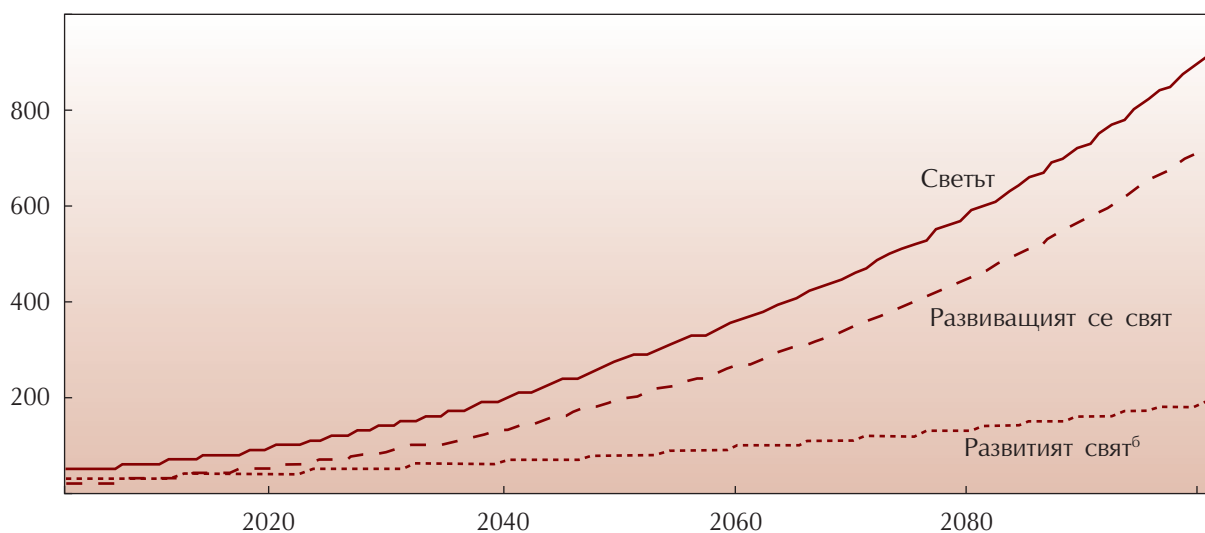
Прогнозите „стопанска дейност, както обикновено“, са оптимистични, понеже предполагат гладък, постоянен растеж на световната икономика за десетилетия напред, без глобални или регионални сътресения и кризи. Питаме дали конвергентният глобален растеж, в който икономиката на САЩ расте при историческите темпове, а останалите икономики постепенно се доближават до нея, съответства на енергийното предлага-

не и климатичните ограничения при непроменен състав на използваните горива и непроменени емисии на единица употребявана енергия. Отговорът е отрицателен. Други горива ще трябва да заменят петрола (а вероятно и природния газ), а въглеродните емисии на единица употребявана енергия (и на единица от БНП) ще трябва да спаднат значително.

В основния вариант, показан във Фигура 1.3, глобалният брутен продукт расте от 46,3 трилиона щатски долара през 2002 г. до 277,5 трилиона щатски долара през 2050 г. (отново в постоянни долари от 2002 г. при паритет на покупателната способност) и 910 трилиона щатски долара през 2100 г. Това е следствие от увеличаването на дохода на човек от населението от средна стойност за света около 7500 щатски долара през 2002 г. до 31 000 щатски долара през 2050 г. и увеличаване на световното население от 6,2 млрд. през 2002 г. до 8,9 млрд. през 2050 г. Фигура 1.3 показва също прогнози-

**Фигура 1.3. ГЛОБАЛЕН БРУТЕН ПРОДУКТ ПРИ БАЗОВИЯ ВАРИАНТ, 2002 – 2100 г.**

Трилиони щ. дол. от 2002 г.<sup>а</sup>



**Източник:** Данни на демографския отдел на ООН; прогнози на авторите.

а. Корижирани за паритет на покупателната способност.

б. Включва икономиките в преход.

<sup>57</sup> Данните за употребата на енергия по райони и сектори са взети от Службата за енергийна информация (2005б) и от помощни документи на Службата.

те за развитите и развиващите се райони (като икономиките в преход са включени заедно със САЩ и Западна Европа в предходната група). Понастоящем производството в развиващите се райони, които представляват около пет шест от световното население, изпреварва производството в развитите райони при настъпване на конвергентен икономически растеж. Докато през 2002 г. развитите райони са имали 60 % от глобалния брутен продукт, към 2025 г. този дял спада на 41 %, а към 2050 възлиза на едва 29 %. Към 2100 г. в базовия модел дялът на днешните развити държави в света в глобалния брутен продукт е намален до 21 %.

При предположен ръст в потреблението на енергия във всеки район с темповете на ръст на производството на района минус годишна печалба от енергийна ефективност 1,5 % в края на първата половина на века тази печалба от енергийна ефективност съвкупно възлиза на около 50 % намаление на потреблението на енергия на долар производство. По този начин при почти шесткратно увеличаване на глобалния брутен продукт към 2050 г. световното потребление на първична енергия нараства приблизително 2,8

пъти през 2050 г. и 4,3 пъти към 2100 г., както е показано във Фигура 1.4.

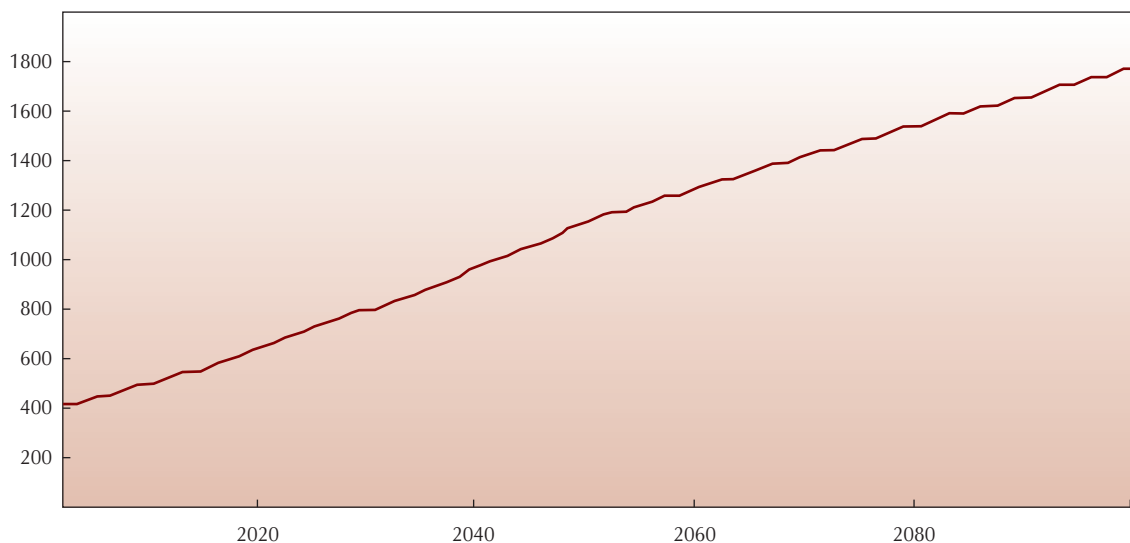
Разбира се, тази гладка траектория на растежа може и да не се осъществи. Тя определено предполага глобален мир, сравнително добро управление в дългосрочна перспектива в развиващите се държави, широка глобална стабилност и налично предлагане на необходимите енергийни и други природни ресурси (като вода, обработваема земя и полезни изкопаеми) при икономическа стойност, която е достатъчно ниска, за да не задушават растежа. Тази траектория предполага, че самата промяна на климата няма да наруши кривата на растежа чрез начало на сериозни сризове в реколтите на хранителни култури или други природни катастрофи. Тя предполага, че голяма пандемия няма да наруши общата крива на демографските и икономическите промени.

### Увеличаване на въглерода в атмосферата при базов сценарий

За да бъдат разбрани последиците от увеличаването на енергийната употреба за глобалния климат,

**ФИГУРА 1.4. СВЕТОВНО ПОТРЕБЛЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯ ПРИ БАЗОВИЯ ВАРИАНТ**

Квадриллиона ВТУ (Британски термични единици)



Източник: Прогнози на авторите.

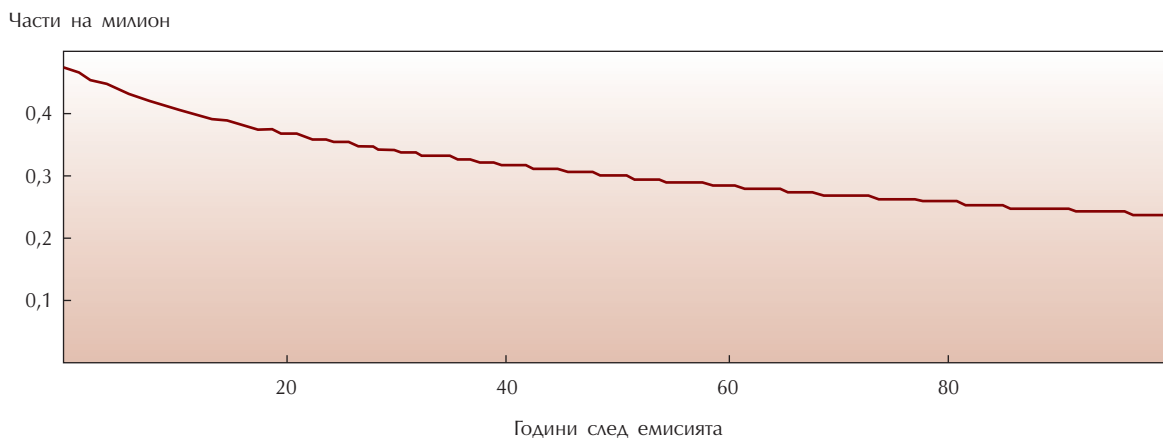
трябва да превърнем предположената енергийна употреба в общи годишни емисии на въглероден диоксид. Тази последна стъпка изисква допълнителен набор изчисления. Според базовата геохимия на въглеродния цикъл част от ежегодните въглеродни емисии ще остава в атмосферата, част ще се разтваря в океана, а трета част ще бъде поета от земната флора, фауна и почвите. Необходим е формален едромасщабен модел „океан-атмосфера-земя“, който да вземе под внимание сложността на въглеродния цикъл, като дори при такива модели остават големи неясноти. За целите на изложението простите изчисления при използване на основната физическа логика на дифузионния обмен между атмосферата и океана могат да дадат приблизителна представа за последиците от трикратното увеличение на въглеродните емисии. Формалните изчисления са описани в приложение, което е на разположение при авторите.

Фигура 1.5 показва моделните предположения за въглеродните концентрации в атмосферата, които биха били наблюдавани в течение на столетие, следвайки емисия с определена величина през първата година. Емисията от 1 GtC през първата година има като непосредствено последствие повишаването на въглеродния диоксид в атмосферата с 0,47 ppm. Тъй като част от този въглерод се поглъща от океана и част от сушата, увеличаването на концентрацията в атмосферата

при това нарастване с 1 GtC впоследствие намалява, както е показано във фигурата. До петдесетата година увеличаването на концентрацията в атмосферата е спаднало до 0,30 ppm, а към стотната година – до 0,24 ppm (половината от първоначалния импулс).

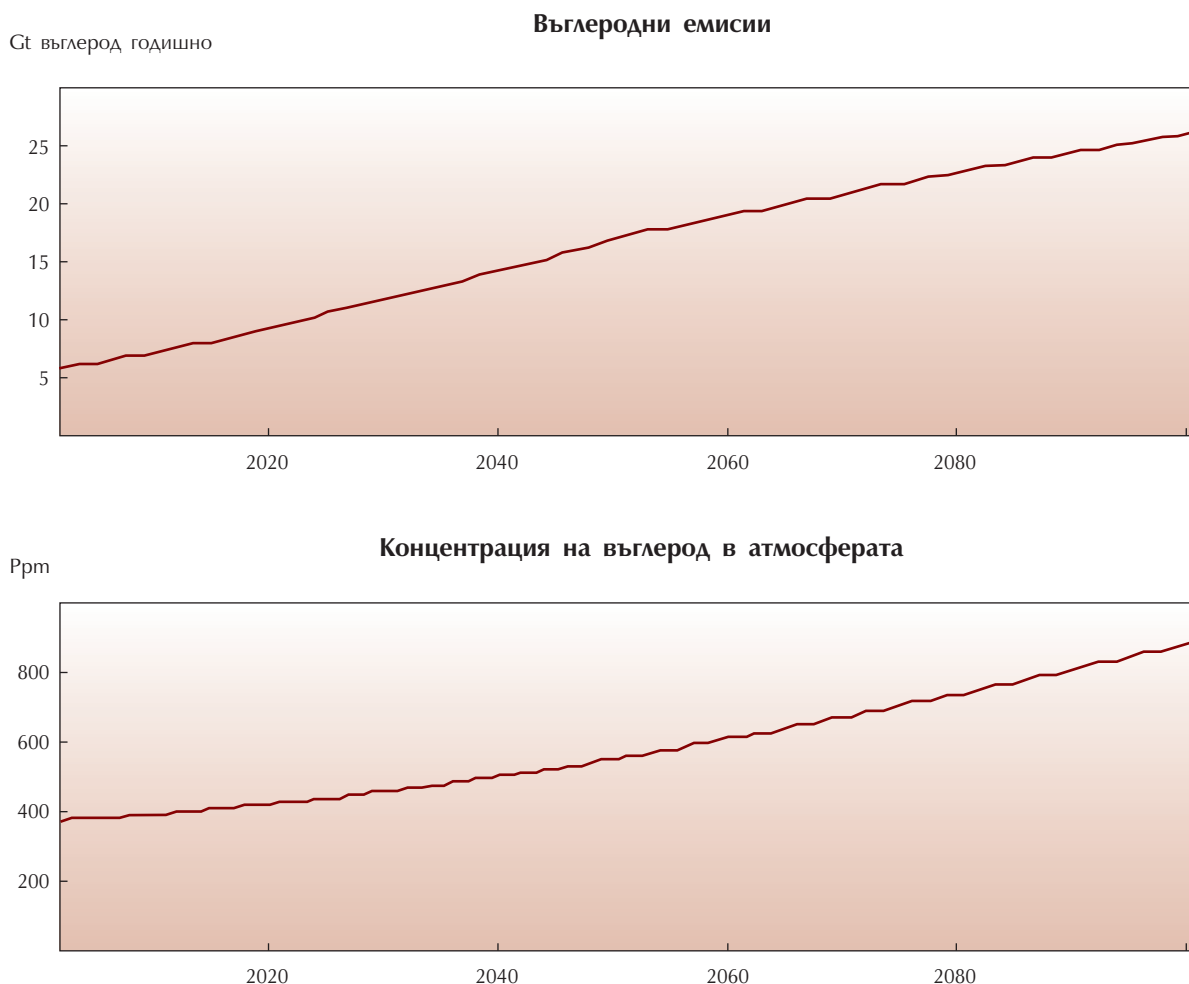
С оглед тази функция на импулсната реакция можем да прогнозираме промяната във въглеродните концентрации за столетието. Общите емисии въглерод и приблизителните концентрации на въглерод в атмосферата за периода 2002 – 2100 г. са показани във Фигура 1.6. Емисиите на въглерод се увеличават приблизително пропорционално на общата енергийна употреба, а въглеродният фонд в атмосферата постепенно нараства с ежегодните емисии на въглерод в зависимост от функцията на единичната реакция, свързваща емисиите с концентрациите на въглерод в атмосферата. Както е показано в горната част на графиката, в базовата траектория емисиите от изкопаеми горива се увеличават от текущото ниво от около 5,8 GtC годишно през 2002 г. до 17,0 GtC годишно през 2050 г. и 26 GtC годишно през 2100 г. Както се вижда от долната част на фигурата, това рязко увеличаване на емисиите води до опасни концентрации на въглерод в атмосферата към 2050 г., достигайки 554 ppm, и продължава до почти утрояване на концентрацията на въглерод през 2100 спрямо прединдустриалната ера до 886 ppm.

**ФИГУРА 1.5. УВЕЛИЧАВАНЕ НА КОНЦЕНТРАЦИЯТА НА ВЪГЛЕРОД В АТМОСФЕРАТА СЛЕД ВЪГЛЕРОДНА ЕМИСИЯ ОТ 1 Gt**



*Източник: Адаптирано от авторите към импулсната реакция, взета от Кейзи (2004).*

**ФИГУРА 1.6. ВЪГЛЕРОДНИ ЕМИСИИ И КОНЦЕНТРАЦИЯ НА ВЪГЛЕРОД  
В АТМОСФЕРАТА ПРИ БАЗОВИЯ ВАРИАНТ 2002 – 2100 г.**



*Източник: Прогнози на авторите.*

Подкрепящият базовия сценарий петролен вариант обаче е нереалистичен. Прогнозите са, че сумарното годишно потребление на петрол ще се увеличи от 159 квадрилона BTU<sup>58</sup> през 2002 г. на 477 квада през 2050 г. Това се равнява на увеличение от 78 млн. петролен еквивалент на ден до 230 млн. петролен еквивалент на ден към 2050 г. Сумарният петрол, употребен между 2002 г. и 2050 г., при този вариант е около 350 млрд. метрични тона петролен еквивалент, което според Рогнер (Рогнер, 1997) надвишава всички световни оценки за запаси-

те от конвенционален нефт (доказани резерви плюс запасите, които тепърва ще се разработват). Най-песимистичните оценки предполагат, че светът ще достигне пика в производството на петрол през следващото десетилетие; по-малко песимистичните прогнози поставят пика двадесет или тридесет години след настоящия момент. Малко са наблюдателите, които считат, че конвенционалният петрол (и природният газ) може да задоволи тройно увеличение в темповете на използване на петрол между настоящия момент и 2050 г.

<sup>58</sup> Квад е единица мярка за енергия, съкращение от „квадрилон BTU“ (британски термални единици). BTU е приблизително равна на 1,054 kJ или 0,3 Wh.

### **Увеличаване на концентрацията на въглерод, ако други изкопаеми горива заменят петрола**

Ако увеличените квади енергия бъдат доставени от въглища и неконвенционални изкопаеми горива (битуминозни пясъци и шисти), а не от петрол, това предполага масирано повишаване на използването на тези алтернативни горива. Като демонстрация приемаме, че нефтеният пик ще бъде достигнат през 2010 г. при 196 квада (около 96 млн. барела дневно). След това се предполага, че нефтът ще остане на това стабилно равнище през следващите десетилетия до 2050 г. Приемаме също, че превишаващото търсене на нефт се покрива от въглища чрез процеса на Фишер-Тропш. Общата употреба на въглища в такъв случай ще се увеличи от 98 квада през 2002 г. до 574 квада към 2050 г. Сумарното потребление на въглища между 2002 г. и 2050 г. би било около 220 млн. тона петролен еквивалент на ден, доста под оценката на Рогнер за ресурсите от 2.4 млрд. тона петролен еквивалент (Рогнер, 1997). Ключовият извод е, че световните запаси от въглища най-вероятно са достатъчно големи, за да задоволят това търсене.

При настоящите технологии въглищата не само замърсяват силно (произвеждайки големи количества азотни оксиди, серни оксиди и живак) и често значително деформират участъка, в който се добиват, но са и по-голям емитент на въглероден диоксид на единица крайна енергия в сравнение с нефта или природния газ. Грубо казано, всеки квад въглища произвежда 85 млн. метрични тона емисии на въглероден диоксид в сравнение с 57 млн. метрични тона при нефта и 41 млн. метрични тона за природния газ. Вследствие на това алтернативният вариант, при който нефтеният пик е през 2010 г. и разликата се поема от въглищата, води до 13 % по-високи емисии годишно към 2050 г. в сравнение с базовия вариант.

По тази причина увеличаването на въглищата с цел заместване на голяма част от прогнозираното нарастване на търсенето на нефт ще изисква две инвестиции в много големи размери. Първата е голямо увеличаване на мащабите на дейностите на фабриките, извършващи процеса на Фишер-Тропш. Сведенията са, че това вече е в ход в Китай, въпреки че размерът на инвестицията не

е известен, а публичното обсъждане на стратегията на Китай в това отношение е в самото си начало. Второ, много по-големите емисии от въглища ще се изразят в дори още по-стръмна траектория на концентрациите на въглероден диоксид в сравнение с показаното в базовия вариант, от което следва още по-голяма неотложност от пристъпването към едромасщабни мерки по смекчаването. Увеличената употреба на въглища и увеличаването на мащабите на смекчаването задължително трябва да вървят ръка за ръка.

### **Увеличаване на концентрацията на въглерод при допълнително потребление на петрол в азиатския транспортен сектор**

Необходимият преход към чисти въглища и други енергийни източници може да се окаже дори по-заплашителен от предположеното в базовия вариант по друга причина: транспортът. Китай и Индия понастоящем са много под средното световно равнище на употреба на енергия на единица БНП в транспорта. Базовият вариант приема, че енергийното потребление в транспорта ще се увеличи около 4 пъти в Китай и 6,5 пъти в Индия. Тези увеличения са изчислени като прогнозни темпове за ръста на БВП без предположеното намаляване на енергоемкостта на всеки сектор в размер 1,5 % годишно. Търсенето на енергия в транспорта може да расте даже още по-бързо от това, защото е вероятно доходната еластичност на търсенето на автомобили значително да надвиши 1 и в Китай, и в Индия. През 2002 г. в Китай е имало едва 5 млн. коли (4 на 1000 души). И при осемкратно увеличение (според ръста на БНП) в Китай ще има едва 40 млн. коли (около 28 на 1000 души) към 2050 г. Това е много под *съвременната* плътност на колите в САЩ и Западна Европа (съответно 675 и 495 на 1000 души) въпреки предположенията, че към 2050 г. Китай ще има доход на човек от населението, съизмерим с този в Европа в наши дни. Една по-обоснована прогноза би предположила много по-бързи темпове на наваксване при покупките на коли в Китай, отколкото темповете на увеличаване на доходите.

Последниците от автомобилния бум в Китай биха били огромни. Нека приемем като алтернатива на базовия вариант, че към 2050 г. Китай има 235 коли на 1000 души население, което е по-



малко от половината спрямо настоящата плътност в Западна Европа. Това би означавало допълнителни 288 млн. коли в сравнение с базата. Ако допълнително приемем, че понастоящем новите коли в Китай имат среден пробег 30 мили на галон, който се подобрява с темп 1,5 % годишно, както е предположено по-горе, това означава среден пробег 59 мили на галон към средата на века. Ако тези автомобили годишно изминават 13 000 мили (използвайки стандартното предположение за модела на САЩ), през 2050 г. те ще се нуждаят от 63,4 млрд. галона бензин, или 1,5 млрд. барела петрол годишно. На свой ред това се изразява в 0,6 млрд. тона емисии на въглероден диоксид годишно. Ако по подобен начин приемем, че Индия достигне плътност на автомобилите от 235 на 1000 души население, задължително трябва да прибавим още 281 млн. коли в Индия в сравнение с горния базов вариант, което добавя още около 0,6 млрд. тона емисии на въглероден диоксид годишно.

### Глобалните емисии и развиващите се страни

Протоколът от Киото разделя света на държави от анекс I, включващ развитите икономики и икономиките в преход, и държави от анекс II, към които се отнасят Китай, Индия и останалата част от развиващия се свят. Условието на протокола е, че само развитите икономики (и тези в преход) трябва да бъдат обвързани от въглеродните лимити през първия етап (до 2012 г.), така че да не се пречи на перспективите за растеж на развиващите се нации. Един по-ефикасен подход би бил обвързването на всички страни с общ стандарт (като общ въглероден данък или глобална система за търгувани разрешителни), за да бъдат сведени до минимум глобалните разходи по намаляването на емисиите на въглероден диоксид до дадено целево равнище с цел управление на капиталовите проблеми. Във всеки случай практическите последици от изключването на държавите от анекс II бяха считани за незначителни с оглед преобладаващия дял на богатите държави в общите глобални емисии.

Симулациите изтъкват факта, че, напротив, днешните развиващи се страни скоро ще произведат над половината от общите емисии, като техният дял значително ще се увеличи през идните

десетилетия. Държавите от анекс I отчитат около 59 % от общите емисии през 2002 г. В базовата симулация се прогнозира този дял да спадне до 50 % през 2013 г. Към 2025 г. днешните развиващи се държави ще отчитат около 60 % от общите емисии, като този дял се увеличава на 70 % през 2050 г. и на 78 % към края на века. (Забележете, че днешните развиващи се страни имат 81 % от сегашното население на Земята и се очаква към края на века да имат 86 % от населението.) Протоколът от Киото може и да определя полезна рамка за начало на управляването на въглеродните емисии, но прави твърде малко за ограничаване увеличаването на въглеродните емисии и концентрации, тъй като изключва тази част от света, която скоро ще отчита основната част от емисиите.

Проблемът с въглерода не може да бъде решен и чрез оряване на растежа в САЩ, докато се даде възможност на най-бедните да наваксат. Ако приемем, че темповете на дългосрочния растеж на САЩ паднат наполовина до едва 0,8 % годишно, вместо да достигне 75 000 щатски долара през 2050 г., доходът на човек от населението в САЩ би достигнал 51 000 щатски долара. Дори този спад не би попречил на преминаването на прага на удвояване на въглеродния диоксид, който би настъпил през 2066 г., а не през 2051 г., както е в базовия вариант. Същността е в това, че нарастващата употреба на енергия в развиващия се свят, която съответства на конвергентния икономически растеж на тези държави, вече представлява основната движеща сила за увеличаването на въглеродните емисии и концентрации.

### Последици от внедряването на евтини възможности за управляване на въглерода

Ръстът на въглеродните емисии може да бъде забавен рязко чрез намаляване на всички вложения на първична енергия в световната икономика, но ако в технологичния процес няма съпътстващ пробив, такова всестранно ограничаване на употребата на енергия може доведе до рязко и скъпо спиране на глобалния икономически растеж. Най-вероятно губещи биха били най-бедните и слаби държави, на които на практика ще бъде казано, че „на масата няма място“ за тях с оглед на приближаващите глобални екологични ограничения.

Целта на политиката, разбира се, е намирането на сравнително евтини решения, които запазват възможността слабите държави да навакват икономически, като същевременно спазват ограниченията на емисиите в атмосферата.

Вместо това основният импулс на администрацията на Буш бе да чака да се появи някакво решение от само себе си. Може би наистина ще бъде открита правилната евтина технология, която позволява на производството да се увеличава при ниско допълнително вложение на първична енергия, а може би ще бъде открит изобилен и еластичен източник на невъглеродно гориво или пък светът ще научи как да улавя въглерод и да се освобождава от него при ниска стойност. Всяко от тези неща е възможно. Не е логично обаче да не се прави нищо, докато се чака какво ще се случи.

Забавянето поставя три проблема. Първо, емисиите продължават да се трупат, доближавайки света до нежелани прагове на въглерода. Второ, смекчаването е значително по-евтино в новите инвестиционни проекти, отколкото под формата на модернизация и модификация на остарели технологии. По тази причина евтиното смекчаване ще изисква много дълго време за изпълнение, което означава, че то трябва да започне възможно по-рано. Трето, вероятно е технологиите по смекчаването да демонстрират сериозна крива на ученето, при което пределните разходи по смекчаването вероятно ще са в обратна зависимост спрямо общите инвестиции в такива дейности.

С оглед важността да се действа бързо, когато е практично, и риска от бързо покачващи се въглеродни концентрации, през идните десетилетия се проявяват две евтини възможности с променливи мащаби. Първата е хибридни автомобили и камиони на бензин и електроенергия, използващи доказана и работеща технология, която (както е обсъдено по-горе) може рязко да повиши бензиновия пробег и така да нама-

ли въглеродните емисии в транспортния сектор, който в момента отчита около една трета от общите емисии в САЩ.

**Хибридни автомобили.** Настоящите хибридни технологии позволяват приблизително удвояване на ефективността на горивото от около 25 мили на галон до 50 или повече за седани със среден размер<sup>59</sup>. Камионите и джиповете по подобен начин могат да бъдат оборудвани с хибридна технология. Някои от колебливите експлоатационни характеристики на хибридите, като мощност при ускоряване, отбелязват бързо подобрение, така че експлоатационните разходи на автомобила намаляват или се отстраняват изцяло. Нетните социални разходи на прехода към хибриди зависят от стойността на горивото. Както бе отбелязано по-горе, типичната лека кола в САЩ изминава около 13 000 мили годишно. При 25 мили пробег на галон това прави 520 галона годишно. Хибрид, който постига пробег 50 мили на галон, намалява тази цифра наполовина – до 260 галона годишно. При примерна цена 50 щатски долара за барел петрол (без данъци) цената на бензина е около 1,20 щатски долара за галон, така че годишните икономии на бензин се равняват на 312 щатски долара.

Трудно е допълнителните разходи по производството на хибрид спрямо сравнимия стандартен автомобил да се оценят, тъй като те се променят с времето. Оценка от 2001 г. на Националната лаборатория Argonne определи допълнителния разход на 3000 в зависимост от спецификациите на модела (Плоткин и др., 2001). През 2004 г. горницата за хибридите към клиента бе около 2500 до 4000 щатски долара<sup>60</sup>. Разбира се, при по-големи производствени процеси и обучение в хода на производството стойността на хибридите може значително да спадне<sup>61</sup>. С цел демонстриране на компромиса между капиталовия разход спрямо ефективността на горивото нека приемем, че допълнителният разход за капитал и поддръжка на хибриден автомобил е 3000 щатски долара по текущата им стойност (което може би

<sup>59</sup> Вж. данните за ефективността на горивото на Министерството на енергетиката на САЩ на сайта [www.fueleconomy.gov](http://www.fueleconomy.gov). За Toyota Prius оценките са 60 мили пробег на галон в градски условия и 51 мили пробег на галон в извънградски условия.

<sup>60</sup> Вж. Welch, D. et al. Gentlemen, Start Your Hybrids//Business Week, April, 26 2004.

<sup>61</sup> Вж. Welch, D. and C. Dawson, Itching to Ditch the Slow Lane//Business Week, April 26, 2005, за подобряването на батерийната технология в хибридните автомобили.

е в горния край на вероятния диапазон с оглед на засилената бъдеща конкуренция, увеличения мащаб на производството и технологичните подобрения, като всички тези неща могат да бъдат очаквани). Ако след това предложим годишни икономии на бензин в размер 312 щатски долара, хибридите постига общи икономии с нетна настояща стойност 400 щатски долара за автомобил, който издържа петнадесет години. (Всички изчисления на настоящата стойност в този и следващия абзац приемат дисконтова ставка от 5 %.) От потребителска гледна точка икономии са дори по-големи, тъй като потребителската цена включва данъци, което приблизително удвоява общата цена на галон и поради това удвоява икономии от стойността на горивото за потребителя.

От гледна точка на политиката хибридите трябва да бъдат субсидирани спрямо другите автомобили чрез косвени или преки помощи, които да отчетат намалените въглеродни емисии. Всеки галон бензин емитира около 19,6 фунта (8,9 kg) въглероден диоксид. Ако всеки хибрид икономисва 260 галона петрол годишно, годишното намаление на въглеродни емисии на автомобил е около 2,3 метрични тона. При примерна цена на въглерода 50 щатски долара за тон годишната стойност на това намаление на въглерода е 115 щатски долара при настояща стойност 1250 щатски долара в хода на жизнения цикъл на автомобила. Това може да бъде върнато на потребителя чрез пряка данъчна отстъпка за покупки на хибриди (каквато в момента се прилага в САЩ за ограничен брой продажби на компания) или чрез икономия от разрешителни за емисии или данъци за употреба на въглерод, ако такива бъдат наложени в крайна сметка. Накратко съществуващата хибридна технология може значително да намали въглеродните емисии, без икономическата стойност за това да е значителна. Предполага се, че технологията ще продължи да бъде подобрявана чрез натрупване на познания в хода на практиката, което се случва бързо през последните години.

Нека приемем, че целият световен автомобилен парк премине на хибриди, докато старите модели бъдат износени и бракувани. Приемаме, че една двадесета от парка се сменя всяка година с начало през 2006 г., така че към 2026 г. целият парк да използва хибридна технология. По-

конкретно приемаме, че при базовия сценарий всички автомобили започват при пробег 21 мили на галон през 2002 г. (средна стойност за леките коли, леките камиони, джиповете и тежките камиони). Без хибридите световният парк постига повишаване на ефективността на горивата от 1,5 % годишно, при което пробегът достига 42 мили на галон към 2050 г. Приемаме, че общият парк хибриди има среден пробег 42 мили на галон през 2002 г. и също така постига повишаване на ефективността на горивата от 1,5 % годишно. Паркът хибриди постепенно замества парка на другите автомобили в течение на двадесет години, така че годишната резултатност на глобалния парк е претеглена средна стойност от парковете хибриди и други автомобили. Приемаме, че към 2026 г. всички автомобили са хибриди (или използват сравнимо ефективна технология), като достигат среден пробег 87 мили на галон към 2050 г.

Новият вариант намалява концентрацията на въглероден диоксид в атмосферата през 2050 г. от 554 ppm в обсъдената по-горе базова симулация до 534 ppm. Както вече видяхме, икономическите разходи вероятно ще са *отрицателни* при цена 50 щатски долара за барел петрол, като икономии на гориво ще надвишат добавените капиталови разходи на хибрида. Точните икономии, които не оценяваме, биха зависели от дългосрочните разходи на хибридна технология (особено батериите), моделите на шофиране и разходите за енергия. Общите икономии на разходи биха зависели от автомобилния парк в Индия и Китай, който (както вече бе отбелязано) може да е много по-голям, отколкото се предполага в базовия вариант.

**Улавяне и складиране на въглерода.** Второто голямо нововъведение, което предлага разумно нисък разход и потенциал за големи мащаби, е УСВ. Както бе отбелязано по-горе, налице е научен консенсус, че по света съществуват достатъчно геоложки обекти, които да съхраняват поне 2000 Gt въглероден диоксид (Мец и др., 2005, с. 30), което е достатъчно за повече от столетие, макар че степента на течове все още не е известна. Разходите за тази дейност са изненадващо скромни и могат да бъдат изчислени доста надеждно, тъй като всички съответни операции (отделяне на въглеродния диоксид от отработения газ, пренос по тръбопровод и гео-

ложко съхраняване) включват известни и доказани технологии.

Основният недостатък при постигането на всички тези положителни ефекти е допълнителният капиталов разход за изграждането на електроцентрала и тръбопровода, който да пренася въглеродния диоксид до мястото за геоложко депониране, плюс по-засиленото влагане на гориво, тъй като известно количество енергия се изразходва за улавянето, преноса и съхраняването на въглеродния диоксид. При подходяща нова електроцентрала, работеща на въглища и използваща подходяща технология (като ИКЦГ), приблизителната стойност на добавения капитал за улавянето на въглерода е между 245 и 705 щатски долара на киловат (Мец и др., 2005, с. 25), което е приблизително равно на 0,0035 до 0,01 цента на киловатчас на годишна база.

В допълнение необходимото влагане на енергия се увеличава с около 20 %. По тази причина нека разгледаме добавените разходи за УСВ за 1 млрд. киловатчаса доставена електроенергия. Един трилион киловатчаса енергия е равен на 3,4 квада<sup>61</sup>. Електроцентрала, работеща на въглища без УСВ и функционираща при КПД 0,35, би се нуждаела от 9,7 квада термично влагане на въглища, за да достави това количество електроенергия. При около 1 млрд. къси тона въглища, които са необходими за производството на 20 квада (в зависимост от топлинното съдържание), 1 млрд. киловатчаса електроенергия се нуждаят от 0,480 млн. къси тона въглища. Цената на къс тон въглища при това предположено топлинно съдържание е около 30 щатски долара. По тази причина цената на общото годишно входно количество въглища е около 14,4 млн. щатски долара, или 0,014 щатски долара на киловатчас. Допълнителните 20 % входно количество въглища, необходими за УСВ, струват около 0,003 щатски долара на киловатчас. Когато това се добави към капиталовите разходи, общите разходи по УСВ в електроцентрала се изчисляват между 0,007 щатски долара и 0,012 щатски долара на киловатчас. Когато се добавят приблизителните разходи за пренос по тръбопровод и геоложко съхраняване, общите разходи по УСВ се изчисляват приблизително в диапазона 0,01 щатски долара до 0,03 щатски долара на

киловатчас за електроцентрала с ИКЦГ<sup>62</sup>. Избегнатите въглеродни емисии се изчисляват на 0,6 до 0,7 kg въглероден диоксид на киловатчас.

По базовата симулация към 2050 г. потреблението на електроенергия ще бъде около 132 квада, или 38 800 млрд. киловатчаса. Прогнозите са, че около 28 000 млрд. киловатчаса от това количество ще бъдат произведени в електроцентрали, работещи на изкопаеми горива, основно въглища. При стойност на УСВ между 1 и 3 цента на киловатчас това се изразява в обща добавена стойност на енергията между 280 и 840 млрд. долара към 2050 г. Тъй като по този вариант се очаква към 2050 г. глобалният брутен продукт да възлиза на 277 трилиона щатски долара, разходите за УСВ са между 0,1 и 0,3 % от глобалния брутен продукт. Икономии от емисии биха били около 17 Gt въглероден диоксид годишно през 2050 г. По тази причина стойността на избегнатите емисии по груби сметки е между 16 щатски долара и 49 щатски долара на тон.

Ако приемем, че УСВ бъде въведено линейно във всички електроцентрали, работещи на изкопаеми горива през периода 2006 – 2035 г., концентрацията на въглероден диоксид в атмосферата през 2050 г. ще бъде намалена от 554 ppm в базата до 508 ppm. Ако и УСВ, и хибридните автомобили бъдат постепенно въведени в експлоатация с начало през 2006 г. (20 години за хибридите и 30 години за електроцентралите), концентрацията на въглероден диоксид през 2050 г. спада до 388 ppm при стойност, по-малка от 0,3 % от глобалния брутен продукт. В допълнение, ако УСВ постепенно влезе в експлоатация в големи промишлени инсталации извън енергийния сектор, концентрацията може да бъде допълнително намалена през 2050 г., може би до 478 ppm.

### След 2050 г.

Взети заедно, УСВ и преходът към хибридни автомобили (следвани от постоянни подобрения в ефективността на автомобилите до пробег около 100 мили за галон към 2050 г.) сами по себе си са достатъчно мощни намеси за ограничаване на емисиите до по-малко от 500 ppm

<sup>62</sup> Вж. Мец и др. (2005, таблица TS, с. 40) за описание на електроцентрала с ИКЦГ.

до средата на века. Те обаче дори не се доближават до стабилизиране на атмосферния въглерод. Ако прогнозираме (с героични усилия) до 2100 г., предполагайки постоянно увеличаване на населението и икономически растеж по линията на конвергенцията, продължаващ икономически растеж в САЩ от 1,7 % на човек от населението и постоянни намаления на енергоемкостта на всички сектори при темп 1,5 % годишно, концентрацията на въглероден диоксид в атмосферата отново би достигнала 688 ppm към 2100 г. Явно е, че ще бъдат необходими по-фундаментални технологични промени, които да поддържат едновековния процес на увеличаване на населението и да допринесат за конвергенцията на доходите.

В такъв случай основните предизвикателства при опазването на околната среда след 2050 г. биха били точковите източници на емисии на въглероден диоксид, т.е. сгради, автомобили и промишлени обекти, използващи изкопаеми горива в твърде малки мащаби, за да могат да се приложат улавяне и складиране. При такива положения фундаменталната технологична стратегия би могла да бъде откриването на евтини алтернативи на въглеродни енергоносители, които могат да заменят използването на изкопаеми горива в точкови източници. Две от тези алтернативи са очевидни. Първата е електрифициране на функции, които в момента се задвижват от локално горене. Отоплението на домове и сгради, както бе отбелязано по-горе, може да замени локалните котли с ефективни термопомпи. Втората технологична възможност е да се използва невъглеродно гориво като носител, например водород, който може да се произвежда в изобилие от изкопаеми горива в централите, които са достатъчно големи да поемат УСВ. По същество цялата употреба на изкопаеми горива би била концентрирана в централи, които могат да поемат УСВ, а всички точкови източници, разходващи енергия, биха преминали към електроенергия или друг невъглероден енергоносител. Тази допълнителна технологична конверсия би дала възможност за световна икономика с нулеви емисии към края на XXI в. Разбира се, към този момент други икономични, неизкопаеми източници на първична енергия – най-вече енергия от слънчева светлина и ядрена енергия – може така или иначе до голяма степен и икономично да са заменили използването на изкопаеми горива.

### Последващи мерки

Най-поразителният факт за разходите по смекчаването не е тяхната абсолютна степен, а по-скоро тяхното разпределение. По-голямата част от намаляването на въглеродните емисии ще бъде в развиващите се държави, въпреки че увеличаването на въглероден диоксид в атмосферата до този момент се дължи предимно на емисии в богатите държави. Логиката на намаляване на стойността диктува евтини технологии за смекчаване (като УСВ или хибридни автомобили) да бъдат въведени във всяка страна, бедна или богата, когато се появи възможност за това. Логиката на справедливостта обаче твърди, че допълнителните разходи трябва да бъдат поети от богатите държави, а не от бедните, не само защото те са бедни, а най-вече защото до този момент имат малък принос за проблема с климата.

В практическо отношение най-спешната мярка е САЩ и Европа да работят съвместно с двата възлици гиганта Китай и Индия за реализиране на прехода към технологията за УСВ. Част от допълнителните разходи в Китай и Индия трябва да бъдат поети от богатите държави. Ако Китай, Индия, САЩ и Европа действително се ангажират с внедряването на УСВ във всички бъдещи електроцентрали и големи промишлени обекти, работещи на изкопаеми горива, светът ще направи огромна крачка към едромасщабно смекчаване на въглерода. Ако и четирите района едновременно се ангажират със значително подобрени стандарти спрямо бъдещите автомобили, съвместните действия рязко ще намалят глобалните рискове за климата.

Икономическата логика предполага, че тези цели могат да се постигнат най-добре чрез единен данък върху въглеродните емисии, налаган на всички потребители на изкопаеми горива във всички райони или чрез глобална система за търгувани разрешителни. И двата подхода обаче могат да се окажат административно или политически невъзможни за внедряване. В крайна сметка може да се окаже, че е по-лесно концентрирането върху много по-малкия брой вземащи решенията лица, които участват в лицензирането на новите електроцентрали и определянето на бъдещите стандарти за ефективност на автомобилите. Ако от всички електроцентрали по света бъде изискано да са (поне) толкова

свободни от въглерод, колкото са електроцентралите на въглища с УСВ, и ако от всички автомобилни паркове бъде изискано да спазват общ стандарт за ефективност на горивата, който да се въведе в течение на много години, решителното намаляване на въглеродни емисии може да се постигне без административното бреме на сложната система за търгуване. От друга страна, пазарните сигнали за насърчаване разработването на нови, алтернативни, свободни от въглерод технологии, биха били заглушени.

### Неотложността на НИРД

Разбира се, осъществимостта на препоръчаното тук евтино смекчаване се основава на бъдещия успех на УСВ и хибридни автомобили.

Успехът е вероятен, но съвсем не е гарантиран. Както вече бе подчертано, равнището на течове при съхраняването на въглерод остава голям проблем. Издръжливостта и ефективността при хибридите са две техни качества, които все още търпят развитие. Историята показва, че в никакъв случай не е разумно да се залага всичко на една технологична карта и да се разчита на нови пробиви в ефективното управление на въглерода, енергийната ефективност и възобновяемата енергия. В допълнение на практическите действия с наличните технологии от ключово значение ще бъдат и засилването на публичната и частната изследователска дейност и разработването на алтернативни източници на енергия, особено енергията от слънчева светлина, които са в състояние да доставят големи количества дългосрочно устойчива енергия.

## ЛИТЕРАТУРА

- Aguilar, S., et al (2005), Summary of the Eleventh Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and First Conference of the Parties Serving as the Meeting of the Parties to the Kyoto Protocol. *Earth Negotiations Bulletin* (December 12).
- Anderson, S., and Richard Newell (2004), Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies. *Annual Review of Environment and Resources* 29: 109-42 (November).
- Andersson, K., F. Johnsson, and L. Strömberg (2003), Large Scale CO<sub>2</sub> Capture – Applying the Concept of O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Combustion to Commercial Process Data. *VGB Powertech* 10: 1-5.b.
- Archer, D., H. Khesghi, and E. Maier-Reimer (1997), Multiple Timescales for Neutralization of Fossil Fuel CO<sub>2</sub>. *Geophysical Research Letters* 24, no. 4: 405-08.
- Barro, R. J., and X. Sala-i-Martin (1995), *Economic Growth*. McGraw-Hill.
- Bartis, J. T., et al (2005), *Oil Shale Development in the United States*. Santa Monica, Calif.: RAND Corporation. BP. 2005. *BP Statistical Review of World Energy*, vol. 54. London.
- Brown, W. C. (1984), The History of Power Transmission by Radio Waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Special Centennial Historical Issue MTT-32*, no. 9: 1230-42.
- Campbell, C. J., and J. H. Laherrère (1998), The End of Cheap Oil. *Scientific American* 278, no. 3: 78-83.
- Cess, R. D. (2005), Water Vapor Feedback in Climate Models. *Science* 310, no. 5749: 795-96.
- Dahl, C. A. (1992), Survey of Energy Demand for Developing Countries. In *Energy Modeling Forum, Report 11, International Oil Supplies and Demands*. Stanford University (April).
- \_\_\_\_\_. (1993), A Survey of Energy Demand Elasticities in Support of the Development of the NEMS. Prepared for the United States Department of Energy, Contract De-AP01-93E123499. Washington (October).
- Damuth, J. (1991), Of Size and Abundance. *Nature* 351, no. 6324: 268-69.
- Deffeyes, K. S. (2001), *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage*. Princeton University Press.
- Deutch, J., et al (2003), *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology.
- Energy Information Administration. (2004a), *International Energy Annual 2002*. Washington (June).
- \_\_\_\_\_. (2004b), *Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2003*. Washington: Office of Integrated Analysis and Forecasting, Energy Information Administration (December).
- \_\_\_\_\_. (2005a), *International Energy Outlook 2005*. Washington: Office of Integrated Analysis and Forecasting, Energy Information Administration (July).
- \_\_\_\_\_. (2005b), *Assumptions to the Annual Energy Outlook 2005*. Washington: Office of Integrated Analysis and

- Forecasting, Energy Information Administration (April).
- ExxonMobil. (2005), The Outlook for Energy, A View to 2030" (exxonmobil.com/corporate/Citizenship/Imports/EnergyOutlook05/2005\_energy\_outlook.pdf).
- Falnes, J., and J. Lovseth (1991), Ocean Wave Energy. *Energy Policy* 19, no. 8: 768-75.
- Fischer, C. (2004), Emissions Pricing, Spillovers, and Public Investment in Environmentally Friendly Technologies. Washington: Resources for the Future (February).
- Gold R., (2005), Reserve Judgment: In Deal for Unocal, Chevron Gambles On High Oil Prices, Wall Street Journal, (August 10, 2005): A1.
- Goodstein, D. (2004), *Out of Gas: The End of the Age of Oil*. Norton.
- Herzog, H., B. Eliasson, and O. Kaarstad (2000), Capturing Greenhouse Gases. *Scientific American* no. 2: 72-79.
- Hidalgo, I., et al (2005), Technological Prospects and CO<sub>2</sub> Emission Trading Analyses in the Iron and Steel Industry: A Global Model. *Energy* 30, no. 5: 583-610.
- Hoffert, M. I., et al (2002), Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet. *Science* 298, no. 5595: 981-87.
- Houghton, J. (2001), *The Physics of Atmospheres*, 3rd ed. Cambridge University Press.
- Houghton, J. T., et al (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Howes, R. H., and A. Fainberg, eds. 1991. *The Energy Sourcebook*. New York: American Institute of Physics.
- Hubbert, M. K. (1956), Nuclear Energy and the Fossil Fuels. Shell Publication 95. Houston: Shell Development Company (June).
- Kaneko, T., et al (2002), Coal Liquefaction. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH.
- Keith, D. W., et al (2004), The Influence of Large-Scale Wind Power on Global Climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101, no. 46: 16115-20.
- Kheshgi, H. S. (2004), Ocean Carbon Sink Duration under Stabilization of Atmospheric CO<sub>2</sub>: A 1,000-Year Timescale. *Geophysical Research Letters* 31, no. L20204.
- Kheshgi, H. S., and D. E. Archer (2004), A Nonlinear Convolution Model for the Evasion of CO<sub>2</sub> Injected into the Deep Ocean. *Journal of Geophysical Research* 109: C02007.
- Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (2000), Hoboken, N.J.: Wiley InterScience. 282 *Brookings Papers on Economic Activity*, 2:2005
- Kleypas, J. A., R. W. Buddemeier, and J.-P. Gattuso (2001), The Future of Coral Reefs in an Age of Global Change. *International Journal of Earth Sciences* 90: 426-37.
- Kleypas, J. A., et al (1999), Geochemical Consequences of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Coral Reefs. *Science* 284, no. 5411: 118-20.
- Lackner, K. S. (2002), Carbonate Chemistry for Sequestering Fossil Carbon. *Annual Review of Energy and the Environment* 27, no. 1: 193-232.
- \_\_\_\_\_. (2003), Climate Change: A Guide to CO<sub>2</sub> Sequestration. *Science* 300, no. 5626: 1677-78.
- Lackner, K. S., H.-J. Ziock, and P. Grimes (1999), Carbon Dioxide Extraction from Air: Is it an Option? In *Proceedings of the 24th International Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, Florida*, edited by Barbara Sakkestad. Gaithersburg, Md.: Coal Technology Association.
- Langdon, C., et al (2000), Effect of Calcium Carbonate Saturation State on the Calcification Rate of an Experimental Coral Reef. *Global Biogeochemical Cycles* 14, no. 2: 639-54.
- Lindzen, R. S., M.-D. Chou, and A. Y. Hou (2001), Does the Earth Have an Adaptive Infrared Iris? *Bulletin of the American Meteorological Society* 82, no. 3: 417-32.
- Lumpkin, R. E. (1988), Recent Progress in the Direct Liquefaction of Coal. *Science* 239: 873-77.
- Maddison, A. (2001), *The World Economy: A Millennial Perspective*. Paris: Development Centre of the Organization for Economic Cooperation and Development.
- Metz, B., et al. eds. (2005), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Summary for Policymakers and Technical Summary. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Munk, W. (1997), Once Again: Once Again – Tidal Friction. *Progress in Oceanography* 40, nos. 1-4: 7-35.
- Nakicenovic, N., et al (2001), Special Report on Emission Scenarios. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- National Commission on Energy Policy (2004), *Ending the Energy Stalemate*. Washington.

- National Energy Board, Canada (2004), *Canada's Oil Sands: Opportunities and Challenges to 2015*. Calgary, Alberta: National Energy Board (May).
- Phillips, O. L., et al. (2002), Increasing Dominance of Large Lianas in Amazonian Forests. *Nature* 418, no. 6899: 770-74.
- Plotkin, S., et al. (2001), Hybrid Electric Vehicle Technology Assessment: Methodology, Analytical Issues, and Interim Results. Argonne, Ill.: Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory (October).
- Rogner, H.-H. (1997), An Assessment of World Hydrocarbon Resources. *Annual Review of Energy and Environment* 22: 217-62.
- Schimel, D. S., et al. (1995), CO<sub>2</sub> and the Carbon Cycle. In *IPCC Special Report on Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios*, edited by John T. Houghton and others. Cambridge University Press.
- Schlesinger, W. H., and J. A. Andrews (2000), Soil Respiration and the Global Carbon Cycle. *Biogeochemistry* 48, no. 1: 7-20.
- Simmons, M. R. (2005), *Twilight in the Desert: The Coming Saudi Oil Shock and the World Economy*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Smil, V. (2001), *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. MIT Press.
- Stewart, R. H. (2005), *Introduction to Physical Oceanography*. College Station, Tex.: Texas A&M University (oceanworld.tamu.edu/resources/ocng\_textbook).
- Steynberg, A. P., et al. (1999), High Temperature Fischer-Tropsch Synthesis in Commercial Practice. *Applied Catalysis A: General* 186, no. 1: 41-54.
- Tol, R. S. J. (2005), The Marginal Damage Costs of Carbon Dioxide Emissions: An Assessment of the Uncertainties. *Energy Policy* 33: 2064-74.
- Uranium Committee of the American Association of Petroleum Geologists (2005), *Recent Uranium Industry Developments, Exploration, Mining and Environmental Programs in the U.S. and Overseas*. Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists.
- Worrell, E., et al. (2001), Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. *Annual Review of Energy and the Environment* 26, no. 1: 303-29.
- Yegulalp, T. M., K. S. Lackner, and H. J. Ziock (2001), A Review of Emerging Technologies for Sustainable Use of Coal for Power Generation. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 15, no. 1: 52-68.
- Zeman, F. S., and K. S. Lackner (2004), Capturing Carbon Dioxide Directly from the Atmosphere. *World Resource Review* 16, no. 2: 157-72.