

31 Ostatnia deska ratunku

Wychwyt dwutlenku węgla z powietrza to ostatnia rzecz, którą warto rozważać.

Świadomie bawię się podwójnym znaczeniem tego zdania. Z jednej strony, wychwycenie dwutlenku węgla z atmosfery pochłonie takie ilości energii, że rozważanie tej opcji trąci absurdem (co więcej, rodzi się obawa, że nawet napomknienie o teoretycznej możliwości „naprawienia” klimatu dzięki geoinżynierii odwiedzie ludzi od działań tu i teraz). Z drugiej strony, naprawdę uważam, że powinniśmy o tym rozmawiać, szukać najlepszych rozwiązań, finansować badania. Wychwyt dwutlenku węgla może okazać się naszą ostatnią deską ratunku, jeżeli zmiany klimatu będą tak katastrofalne, jak ostrzegają klimatolodzy i jeżeli ludzkość nie wykorzysta tańszych i bardziej sensownych opcji, dziś jeszcze dostępnych.

Zanim przejdziemy do wychwytu dwutlenku węgla z atmosfery, musimy zrozumieć, jak funkcjonuje obieg węgla w przyrodzie.

Zrozumieć CO₂

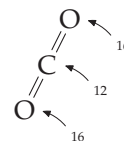
Kiedy tworzyłem szkic tej książki, zamierzałem zupełnie zignorować nauki o klimacie. W niektórych kręgach pytanie: „Czy zmiany klimatu mają miejsce?” budzi kontrowersje. Podobnie jak pytania: „Czy człowiek jest za nie odpowiedzialny?” oraz „A czy to ważne?”. Oraz – dajmy susa na koniec łańcucha kontrowersji – „Co powinniśmy z tym zrobić?”. Wiedziałem, że same odnawialne źródła wymagają tyle uwagi, że lepiej unikać kontrowersji. Chciałem argumentować: „Nieważne kiedy skończą się paliwa kopalne, nieważne czy zmiany klimatu zachodzą, czy też nie, *spalanie paliw kopalnych* i tak nie jest zrównoważone. Zaplanujmy zrównoważony sposób życia i policzmy, jak dużo zrównoważonej energii mamy na stanie”.

Jednakże zmiany klimatu zaczęły funkcjonować w świadomości społecznej i rodzą szereg ciekawych pytań natury ogólnej. Dlatego też omawiam je skrótowo i we wstępie, i w tym rozdziale. Zamiast pełnego omówienia zaproponuję kilka interesujących liczb.

Jednostki

Opłaty za zanieczyszczenie dwutlenkiem węgla są zazwyczaj liczone w dolarach lub euro za tonę CO₂, dlatego też tona CO₂ będzie naszą główną jednostką przy określaniu emisji CO₂ na głowę mieszkańca, a tona CO₂ rocznie posłuży do określenia rocznej emisji (emisja gazów cieplarnianych przeciętnego Europejczyka to odpowiednik 11 ton CO₂ rocznie lub 30 kg CO₂ dziennie). Jednakże omawiając pierwiastek węgla obecny w paliwach kopalnych, roślinności, glebie i wodzie, będę mówił o tonach węgla¹. Jedna tona CO₂ zawiera 12/44 tony węgla, czyli nieco więcej niż ćwierć tony. W skali globu będę mówił o gigatonach węgla (Gt C). Gigatona węgla to miliard ton. Trudno sobie wyobrazić gigatony. Jeżeli chciałbyś sprowadzić je do ludzkich rozmiarów wyobraź sobie, że spalasz jedną tonę czystego węgla [co odpowiada około 1,4 t węgla kamiennego – *red.*] Tyle może pochłonąć ogrzanie domu przez rok. Teraz pomyśl, że każdy na świecie spala 1 tonę czystego węgla rocznie – to 6 Gt C rocznie dla populacji 6 mld.

¹ Z uwagi na wieloznaczność polskiego słowa „węgiel” w tym rozdziale „węgiel” będzie oznaczał pierwiastek węgla (*carbon*). Tam, gdzie będzie mowa o węglu (*coal*) użyjemy sformułowania „węgiel kamienny” [*red.*]



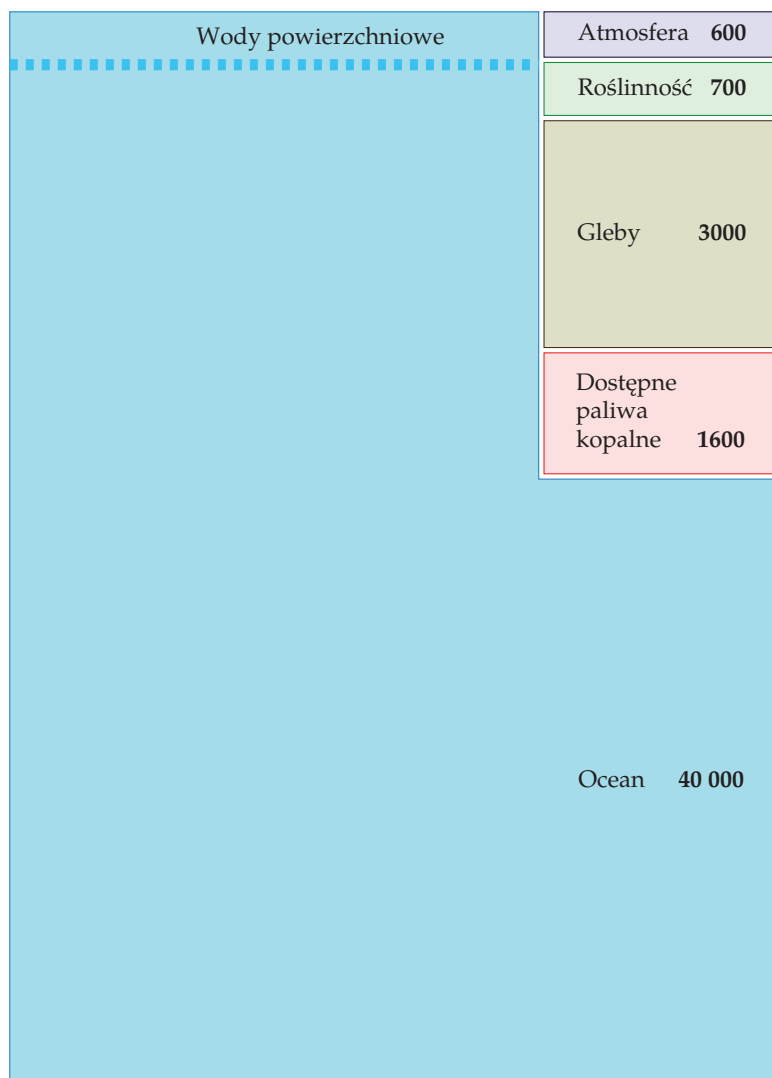
Rys. 31.1. Stosunek masowy węgla do CO₂ wynosi 12 do 44, ponieważ atom węgla waży 12 jednostek, a dwa atomy tlenu 16 jednostek każdy. 12 + 16 + 16 = 44

Gdzie jest ten węgiel?

Gdzie jest cały ten węgiel? Jeżeli chcemy zrozumieć konsekwencje emisji CO₂, musimy wiedzieć, ile węgla jest w oceanach, glebie i roślinności, a ile w atmosferze.

Rys. 31.2 pokazuje, gdzie jest węgiel. Większość (40 000 Gt) znajduje się w oceanach (w postaci rozpuszczonego gazu CO₂, węglanów, żywych roślin i zwierząt oraz rozkładającej się materii). Gleby i roślinność wspólnie zawierają około 3700 Gt. Dostępne paliwa kopalne (głównie węgiel kamienny) zawierają około 1600 Gt (a z uwzględnieniem złóż uważanych obecnie za nieopłacalne w eksploatacji i paliw niekonwencjonalnych może to być nawet 5000 Gt – *red.*) I wreszcie atmosfera zawiera 750 Gt węgla.

Jeszcze do niedawna wszystkie „magazyny” węgla trwały we względnej równowadze – wszystkie wypływy węgla z magazynu (czy to z gleby, roślin, czy z atmosfery) były równoważone przez taki sam dopływ do magazynu.



Rys. 31.2. Szacowana zawartość węgla, w gigatonach, w dostępnych miejscach na ziemi. Potężne ilości węgla zawierają również skały. Tutaj węgiel przemieszcza się w skali milionów lat, a długookresową równowagę warunkuje węgiel w osadach (w procesie subdukcji przedostający się pod płyty tektoniczne) oraz węgiel wypływany od czasu do czasu przez wulkany. Dla uproszczenia pomijam ten geologiczny obieg węgla. Wulkany emitują 200 razy mniej dwutlenku węgla niż my.

Wpływy i wypływy w magazynie paliw kopalnych były nieznaczne. Jednak później człowiek zaczął spalać paliwa kopalne. Stworzyło to dwa dodatkowe niezrównoważone strumienie, co widać na rys. 31.3.

Tempo spalania paliw kopalnych wynosiło w przybliżeniu 1 Gt C w 1920 roku, 2 Gt C w 1955 roku i 8,4 Gt C w 2006 roku (z uwzględnieniem niewielkiego wkładu produkcji cementu, która uwalnia CO_2 z wapienia).

Jak bardzo te dodatkowe strumienie zmieniły obraz z rys. 31.2? No cóż, dokładnie nie wiadomo. Rys. 31.3 pokazuje kluczowe kwestie, o których już nam wiadomo. Duża część tych dodatkowych 8,4 Gt C rocznie zostaje w atmosferze, podnosząc stężenie dwutlenku węgla. Atmosfera stosunkowo szybko wymienia węgiel z wodami powierzchniowymi mórz i oceanów (osiąganie stanu równowagi pomiędzy atmosferą i oceanami zajmuje zaledwie 5–10 lat), przez co zachodzi przepływ CO_2 netto z atmosfery do wód powierzchniowych w wysokości 2 Gt C rocznie (ostatnie badania wskazują, że tempo wchłaniania węgla przez oceany może spadać). Ten nierównoważony przepływ do wód powierzchniowych prowadzi do zakwaszenia oceanów (co można porównać do robienia z oceanów wielkiej wody mineralnej, poprzez ich nasycenie dwutlenkiem węgla w tempie 1 miliona ton CO_2 na godzinę), a to złe wieści dla raf koralowych. Trochę węgla wchłania również roślinność i gleby (być może 1,5 Gt C rocznie), ale te przepływy nie zostały dobrze zbadane. Ponieważ mniej więcej połowa emisji węgla zostaje w atmosferze, dalsze zanieczyszczanie węglem zwiększa stężenie CO_2 w atmosferze i w wodach powierzchniowych.

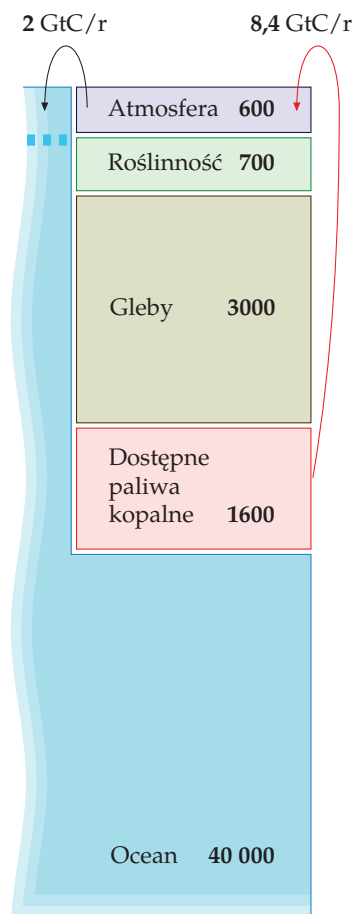
Gdzie na dłuższą metę wyłącza to dodatkowe CO_2 ? No cóż, wzięwszy pod uwagę, że węgla w paliwach kopalnych jest znacznie mniej niż w morzach i oceanach, na dłuższą metę ten dodatkowy węgiel trafi do oceanu, a jego zawartość w atmosferze, roślinności i glebach wróci do normalnego poziomu. Niemniej jednak ta „dłuższa meta” liczona jest w tysiącach lat.

Dla małego impulsu to prawda. Jeśli jednak spalimy całość dostępnych paliw kopalnych (według niektórych oszacowań nawet 5000 Gt C), to będziemy mieć DUŻY impuls.

W takiej sytuacji większa koncentracja jonów węglanowych w oceanach spowoduje rozpuszczenie znajdujących się tam osadów węglanowych (to zjawisko zwane dodatnim sprzężeniem zwrotnym, opisane jest w kolejnych akapitach). Kwasowość oceanów sięgnie poziomów niespotykanych od 250 mln lat – a wszystko w ciągu stulecia. W atmosferze nawet po 1000 lat pozostanie blisko połowa wyrzuconego przez nas CO_2 , trwale zmieniając panujące na Ziemi warunki.

Powrót kwasowości oceanów do punktu wyjścia zajmie setki tysięcy lat. Dopiero wietrzenie węglanów, granitów i bazaltów wyciągnie CO_2 z atmosfery. Patrz np.: [3x6yh95].

Jak już powiedziałem, przywracanie równowagi pomiędzy atmosferą i wodami powierzchniowymi zachodzi szybko. Spójrzmy jednak na przerywaną linię na rys. 31.2 i rys. 31.3, oddzielającą wody powierzchniowe od reszty oceanu. W skali 50 lat ta granica jest niczym solidny mur. Węgiel radioaktywny rozproszony po świecie w wyniku testów jądrowych w latach 60. i 70. spenetrował oceany zaledwie na głębokość 400 m. Tymczasem średnia głębokość oceanów wynosi około 4000 m.



Rys. 31.3. Strzałki ilustrują dwa dodatkowe przepływy węgla spowodowane spalaniem paliw kopalnych. Zachodzi nierównowaga pomiędzy 8,4 Gt C/rok emitowanego ze spalania paliw kopalnych a 2 Gt C/rok pochłanianego przez oceany. Na rysunku pominięto słabiej zbadane przepływy między atmosferą, glebą, roślinnością itd.

Oceany cyrkulują powoli – woda głębinowa potrzebuje 1000 lat na podróż w tę i z powrotem (na powierzchnię, a potem w głębinę). W przeciwieństwie do cyrkulacji powierzchniowej, wzbudzonej przez wiatry cyrkulacja wód głębinowych jest stymulowana poprzez kombinację gradientu temperatur i gradientu zasolenia. Dlatego nazywa się ją cyrkulacją termohalinową.

Powolna rotacja wód oceanicznych ma fundamentalne konsekwencje – mamy wystarczająco dużo paliw kopalnych, by poważnie wpłynąć na klimat najbliższych tysięcy lat.

Gdzie łąduje węgiel?

Rys. 31.3. to wielkie uproszczenie. Ludzie tworzą dodatkowe strumienie nieujęte na diagramie – tylko wypalenie torfu i lasów na Borneo w 1997 roku uwolniło do atmosfery 0,7 Gt C. Incydentalne pożary pokładów węgla uwalniają około 0,25 Gt C rocznie.

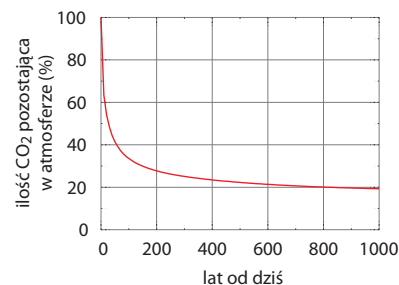
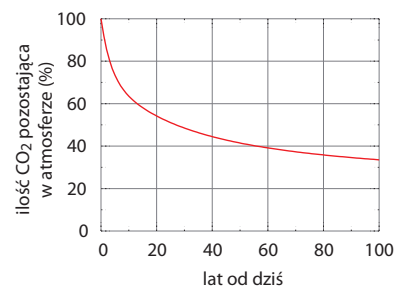
Niemniej jednak ten rysunek pomoże nam zrozumieć, co może się wydarzyć w krótkiej i średniej perspektywie czasowej w ramach różnych strategii. Jeżeli zostawimy wszystko po staremu i w ciągu 50 najbliższych lat spalimy kolejne 500 Gt węgla, można oczekiwać, że węgiel nadal będzie sączył się do oceanu w tempie 2 Gt C rocznie.

Do roku 2055 co najmniej 100 Gt z tych 500 trafiłoby do wód powierzchniowych, a stężenie CO₂ w atmosferze podwoiłoby się w stosunku do okresu przedprzemysłowego.

Gdybyśmy do lat 50. XXI wieku zaprzestali spalania paliw kopalnych, dwugigatonowy przepływ z atmosfery do oceanu zmniejszyłby się (wydawało mi się kiedyś, że ten przepływ do oceanu trwałby dziesiątki lat i tak by się działo, gdyby wody powierzchniowe i atmosfera były w nierównowadze; jednakże, jak już wspominałem, wody powierzchniowe i atmosfera wracają do równowagi w zaledwie kilka lat). Większość z tych 500 Gt, które wypływają do atmosfery, stopniowo wsącza się do oceanu na przestrzeni następnego kilku tysięcy lat, kiedy wody powierzchniowe przesuną się w głąb i ustąpią wodom z głębin.

Nasze perturbacje ze stężeniami węgla zostaną skorygowane, ale dopiero za tysiące lat. I to przy założeniu, że tak poważna perturbacja nie zmodyfikuje drastycznie ekosystemów. Jest możliwe, że zakwaszenie wód powierzchniowych oceanu może na tyle zniszczyć roślinność oceaniczną, że powstanie błędne koło – zakwaszenie oznacza wymieranie flory oceanicznej, która pobiera z oceanu mniej CO₂, co zwiększa zakwaszenie oceanu. Zjawisko błędnego koła (co naukowcy nazywają dodatnim sprzężeniem zwrotnym) miało już miejsce na Ziemi – uważa się, że epoki lodowcowe kończyły się relatywnie szybko właśnie z powodu cykli dodatnich sprzężeń zwrotnych, kiedy to rosnące temperatury prowadziły do topnienia śniegu i lodu powierzchniowego, co zmniejszało ilość promieniowania słonecznego odbitego od ziemi, przez co ziemia pochłaniała więcej ciepła, co finalnie prowadziło do wzrostu temperatur (woda pośniegowa jest znacznie ciemniejsza niż sam śnieg).

Co więcej, ogrzewające się oceany pozbywały się też dwutlenku węgla i metanu (również silnego gazu cieplarnianego), rosła też ilość pary wodnej (również gazu cieplarnianego) w atmosferze, co dodatkowo wpływało na wzrost temperatury. Wpływ obu mechanizmów – rosnącej koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze oraz odsłaniania ciemnej powierzchni w wyniku topnienia śniegu i lodu – był porównywalny.



Rys. 31.4. Tempo pochłaniania małego impulsu CO₂ wyemitowanego dzisiaj według modelu cyklu węglowego Berna
Źródło: Hansen i in. (2007)

Niepokojąco dodatnie sprzężenie zwrotne może dotyczyć hydratów metanu, gigatonami zamrożonych na Syberii i setkami gigaton w szelfach kontynentalnych. Ocieplenie większe niż o 1 °C może spowodować topnienie hydratów metanu, co uwolni do atmosfery metan, który przyczynia się do globalnego ocieplenia bardziej niż CO₂.

To nie miejsce na szczegółowe dyskusje na temat obszarów niepewności związanych ze zmianami klimatu. Gorąco polecam lekturę książek: *Avoiding Dangerous Climate Change* (Schellnhuber i in., 2006) i *Global Climate Change* (Dessler i Parson, 2006), jak również prace Hansena i innych (2007) oraz Charneya i innych (1979).

Tematem tego rozdziału jest „naprawianie” klimatu przez wychwyt dwutlenku węgla z powietrza. Teraz omówimy koszty energetyczne takiej operacji.

Koszt wychwytu

Dzisiaj wyciąganie węgla z ziemi kosztuje górę forsy. W przyszłości zapakowanie go z powrotem do ziemi może kosztować niepomiernie większą górę forsy. Jeżeli dziś nie ograniczymy emisji, być może za kilkadziesiąt lat jakaś międzynarodowa koalicja zapłaci za monstrualny odkurzacz, który po nas wszystkich posprząta.

Zanim przejdziemy do szczegółów wychwytu węgla z atmosfery, zastanówmy się, ile energii to pochłonie. Każda nasza technologia będzie podlegać podstawowym prawom fizyki. Tak się niestety składa, że wychwycenie CO₂ z atmosfery i jego skoncentrowanie pochłonie energię. Zgodnie z prawami fizyki trzeba będzie zużyć co najmniej 0,2 kWh energii na każdy kg CO₂ (tabela 31.5) Zważywszy, że sprawność rzeczywistych procesów zazwyczaj nie przekracza 35%, zdziwiłbym się, gdyby koszt energetyczny wychwytu węgla kiedykolwiek spadł poniżej 0,55 kWh na kg.

Wyobraźmy sobie teraz, że chcemy zneutralizować emisje CO₂ przeciętnego Europejczyka, wynoszące 11 ton rocznie, czyli 30 kg na osobę dziennie. Koszt energetyczny, przy założeniu 0,55 kWh na kg CO₂, wyniesie **16,5 kWh na osobę dziennie**. Dokładnie tyle wynosi **zużycie prądu w Wielkiej Brytanii**. Zasilanie olbrzymiego odkurzacza zmusi nas do podwojenia produkcji energii elektrycznej (lub też sprowadzenia skądś tej dodatkowej energii).

Być może nasze gigantyczne odkurzacze mogą pożerać mniej prądu. Cudownie! Biermy się do roboty! Niestety żadne pieniądze na badania i rozwój nie oszukają praw fizyki, które mówią, że wychwyt CO₂ z powietrza i jego skoncentrowanie do ciekłego CO₂ wymaga co najmniej 0,2 kWh na kg CO₂. Ale do rzeczy! Co najlepiej wychwyci CO₂ z atmosfery? Omówię cztery technologie wielkich odkurzaczy:

- A. pompy chemiczne;
- B. drzewa;
- C. wspomagane wietrzenie skał;
- D. użyźnianie oceanu.

A. Chemiczne technologie wychwytu węgla

W przypadku technologii chemicznych dwutlenek węgla jest zazwyczaj poddawany dwóm procesom:



Po pierwsze, koncentruje się CO_2 , które w atmosferze występuje w niskich stężeniach. Następnie spręża się, zmniejszając jego objętość, co ułatwia zapakowanie do dziury w ziemi albo w głębiny oceaniczne. Każda z tych faz pochłania energię. Koszty energetyczne wynikające z praw fizyki pokazano w tabeli 31.5.

W 2005 roku najlepsze znane metody wychwytu CO_2 z powietrza były raczej nieefektywne – zużycie energii wynosiło około 3,3 kWh na kg, przy koszcie finansowym rzędu 140 USD za tonę CO_2 . Przy takim koszcie energetycznym wychwycenie europejskich 30 kg dziennie pochłaniałoby **100 kWh dziennie** – prawie tyle, ile wynosi zużycie energii w Europie (125 kWh dziennie). Zużywanie całości energii spalanych paliw kopalnych na wychwyt powstającego przy ich spalaniu CO_2 wydaje się cokolwiek bez sensu. Może więc można zaprojektować lepsze odkurzacze?

Niedawno klimatolog Wallace Broecker, „jeden z najlepszych specjalistów na świecie w zakresie funkcjonowania Ziemi jako systemu biologicznego, chemicznego i fizycznego”, promował jeszcze nieupubliczną technologię wychwytu CO_2 z atmosfery, autorstwa fizyka Klause Lacknera. Broecker wyobraża sobie, że świat mógłby nadal spalać paliwa kopalne w takim tempie jak dziś, a odkurzaniem CO_2 zajmie się 60 mln płuczek (każda wielkości kontenera transportowego). Ile energii pochłaniają płuczki Lacknera? W czerwcu 2007 roku Lackner mówił, że w laboratorium wychodziło mu 1,3 kWh na kg, ale od tamtej pory opracował nową metodę, opartą na żywicy, która w stanie suchym absorbuje CO_2 , a w stanie mokrym je uwalnia. W czerwcu 2008 roku Lackner mówił mi, że w suchym klimacie udało mu się obniżyć koszt energetyczny koncentrowania do 0,18–0,37 kWh ciepła niskotemperaturowego na kg CO_2 . Sprężanie pochłania 0,11 kWh na kg. Stąd też całkowity koszt energetyczny procesu Lacknera wynosi 0,48 kWh na kg lub nawet mniej. Przy europejskiej emisji rzędu 30 kg CO_2 dziennie wciąż oznacza to około **14 kWh dziennie**, z czego **3,3 kWh dziennie** stanowiłby prąd, a resztę – ciepło.

Wiwat postęp techniczny! Nie myśl jednak, że to mało. Uruchomienie odkurzaczy wymagałoby zwiększenia produkcji energii na świecie o jakieś 20%. No i coś z tym nowym CO_2 trzeba by jeszcze zrobić...

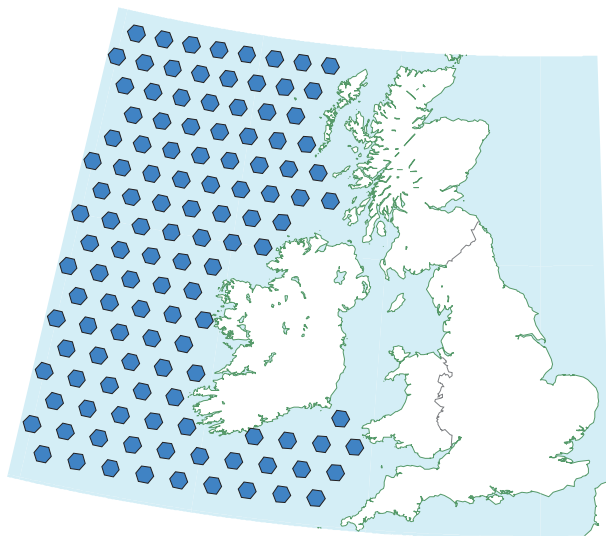
B. A co z drzewami?

Drzewa to naturalne systemy wychwytyjące węgiel. Wysysają CO_2 z powietrza i nie łamią żadnych praw fizyki. To urządzenia typu dwa w jednym: instalacje wychwytu CO_2 zasilane wewnętrznymi elektrowniami słonecznymi. Wychwytyją węgiel przy użyciu energii pozyskanej ze Słońca. Paliwa kopalne, które spalamy, też kiedyś powstały w tym procesie. Nasuwa się więc sugestia – a gdyby tak wykorzystać odwrotność spalania? Gdyby tak tworzyć drewno, grzebać je w dziurze w ziemi, podczas gdy zaraz obok ludzkość nadal wydobywa drewno kopalne i je spala? Idiotyczny pomysł – grzebanie lasów i jednocześnie wykopywanie pogrzebanych lasów. Tak czy owak, policzmy, jaki areal trzeba by obsadzić lasem, by rozwiązać problem zmian klimatu.

koszt energetyczny (kWh/kg)	
koncentrowanie	0,13
sprężanie	0,07
razem	0,20

Tabela 31.5. Nieunikniony koszt energetyczny koncentrowania i sprężania CO_2 wychwyconego z atmosfery





Rys. 31.6. 120 stref na Atlantyku, każda wielkości 900 km². Taką powierzchnię oceanu należałoby użyźnić, by kompensować brytyjskie emisje CO₂.

W niektórych regionach świata brakuje żywności. Gdzieś tam brakuje ryb z uwagi na nadmierne połowy na przestrzeni ostatnich 50 lat. Użyźnienie oceanu polegałoby na nawożeniu wód, co wsparłoby podstawę łańcucha pokarmowego, stymulowało przyrost roślinności i populacji ryb, a przy okazji zwiększyło pochłanianie węgla. Inżynierowie zajmujący się użyźnianiem oceanu, pod kierownictwem Australijczyka Iana Jonesa, chcieliby wpompować nawóz azotowy (np. mocznik) w rejony oceanu ubogie w ryby.

Twierdzą, że użyźnienie 900 km² oceanu pozwoli wychwycić około 5 Mt CO₂/rok. Jones z zespołem utrzymuje, że nawozić można każdy rejon oceanu ubogi w azot. Taka jest większość Północnego Atlantyku. Pokażmy to na mapie. Brytyjskie emisje wynoszą około 600 Mt CO₂/rocznie. Całkowita neutralizacja tych emisji wymagałaby 120 takich obszarów na oceanie. Na mapie na rys. 31.6 mamy te strefy w skali mapy, rozmieszczone wzdłuż Wysp Brytyjskich. Jak zwykle plan, który jest całościowy, wymaga instalacji wielkości kraju! A przecież nie wiemy jeszcze, skąd wziąć potrzebny mocznik.

Mimo, że to pomysł niesprawdzony i obecnie niezgodny z prawem, wydaje mi się interesujący. W przeciwieństwie do geologicznego składowania dwutlenku węgla ta technologia mogłaby się rozwinąć nawet bez międzynarodowo uzgodnionej wysokiej ceny za posprzątanie CO₂. Rybacy użyźnialiby oceany tylko po to, by zwiększyć połowy.

Można się spodziewać, że wielu komentatorów sprzeciwi się manipulacjom przy oceanie, skupiając się na zagrożeniach, a nie na potencjalnych korzyściach. Odwołają się do społecznego lęku przed nieznanym. Ludzie są skłonni pasywnie akceptować eskalację tego, co już jest (na przykład wyrzucanie CO₂ do atmosfery), a obawiają się innowacji, które mogą dać im lepszą przyszłość. Niewspółmiernie mocno boją się ryzyka.

Ian Jones

Najlepsze „fabryki” w Europie wychwytyją dwutlenek węgla w tempie około 10 ton suchego drewna na hektar rocznie, co odpowiada około 15 tonom CO₂ na hektar rocznie.

By skompensować europejskie emisje rzędu 11 ton CO₂ rocznie, potrzebujemy 7500 metrów kwadratowych lasu na osobę. Owe 7500 metrów kwadratowych na osobę to dwukrotność powierzchni Wielkiej Brytanii na osobę. Poza tym trzeba by znaleźć miejsce na trwałe składowanie 7,5 ton drewna na osobę rocznie! Przy gęstości drewna rzędu 500 kg/m³ drewno każdego Europejczyka zajmowałoby 15 m³ rocznie. Drewno na całe życie (które, pamiętajmy, musi być bezpiecznie zmagazynowane i nigdy nie może pójść z dymem) zajęłoby 1000 m³. To pięciokrotność powierzchni całkowitej przeciętnego domu. Ktokolwiek chce leczyć klimat drzewami, musi zdać sobie sprawę, że potrzeba ogromnych połaci lasu. Nie wiem, czy to w ogóle możliwe [przy okazji tego projektu, zabierając biomasa z lasu, zamiast pozwolić powrócić jej do obiegu biologicznego, doprowadzilibyśmy do wyjałowienia ziemi – red.]

C. Przyspieszanie wietrzenia skał

Czy jest jakiś sprytny sposób, by wymigać się od wysokich kosztów energetycznych chemicznego wychwytu CO₂? Oto ciekawy pomysł – proszkowanie skał zdolnych absorbować CO₂ i wystawianie ich na świeże powietrze. Coś jakby przyspieszanie naturalnych procesów geologicznych. Wyjaśnijmy to sobie.

Na rys. 31.3 pominąłem dwa przepływy węgla – ze skał do oceanów, związany z naturalnym wietrzeniem skał i naturalne strącanie się węgla w osadach oceanicznych, które później zamieniają się w skały. Te przepływy są relatywnie niewielkie, wynoszą około 0,2 Gt C rocznie (0,7 Gt CO₂ rocznie). To drobiazg w porównaniu z dzisiejszymi antropogenicznymi emisjami, które są 40 razy większe. Zwolennicy wspomaganego wietrzenia skał twierdzą, że można by złagodzić zmiany klimatu, przyspieszając tempo, w jakim skały się rozpadają i absorbują CO₂. Do kruszenia nadają się powszechnie występujące oliwiny lub krzemiany magnezu. Skały pozyskiwano by w miejscach otoczonych dużym obszarem, gdzie można by je rozsiać po rozdrobnieniu. Można by je też sypać bezpośrednio do oceanu. Tak czy inaczej, skały absorbowałyby CO₂ i przekształcały je w węglany. Węglany z kolei byłyby spłukiwane do oceanów. Sproszkowanie skał do ziaren takiej wielkości, by zaszła reakcja z CO₂, wymaga zaledwie 0,04 kWh na kg wychwyconego CO₂. Chwila, chwila... Przecież to mniej niż 0,20 kWh na kg wynikające z praw fizyki! To prawda, jednak wszystko się zgadza – same skały są źródłem brakującej energii. Krzemiany zawierają więcej energii niż węglany, stąd też skały płacą koszt energetyczny wychwytu CO₂ z atmosfery.

Podoba mi się niski koszt energetyczny tego schematu, pozostaje jednak trudne pytanie, kto zgodzi się wysypać swój kraj sproszkowaną skałą?

1 hektar = 10 000 m²

D. Użyźnianie oceanu

Z metodami chemicznymi, sadzeniem lasów i proszkowaniem skał wiąże się istotny problem – wymagają masy pracy i nikt nie ma w tym interesu (chyba że w ramach międzynarodowych porozumień zacznie się płacić za wychwyty dwutlenku węgla). Dzisiaj ceny dwutlenku węgla są zbyt niskie.

Z ostatnią metodą wychwytu CO₂ nie ma tego problemu. Chodzi o to, by przekonać ocean do nieco szybszego wychwytu węgla, jednocześnie hodując ryby.

My, jako ludzkość, nie możemy uwolnić do atmosfery całego CO₂ zawartego w paliwach kopalnych (ani nawet większej jego części). Jeżeli to uczynimy, gwarantujemy sobie drastyczne zmiany klimatu. A to już będzie inna planeta...

J. Hansen i in. (2007)

„Uniknięcie niebezpiecznych zmian klimatu” jest niemożliwe – niebezpieczne zmiany klimatu już mają miejsce. Pytanie brzmi: czy możemy uniknąć katastrofalnych zmian klimatu?

David King, główny doradca naukowy brytyjskiego rządu, 2007

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 256 ... pytanie: „Czy zmiany klimatu mają miejsce?” budzi kontrowersje. Wciąż istnieje „ziewająca przepaść między głównym nurtem opinii o zmianach klimatu między środowiskiem naukowym a rozumieniem problemu przez społeczeństwa Europy i Stanów Zjednoczonych” [voxbz].
- 257 Gdzie jest ten węgiel? – Źródła: Schellnhuber i in. (2006), Davidson i Janssens (2006).
- 258 Tempo spalania paliw kopalnych... – Źródło: Marland i in. (2007).
- Ostatnie badania wskazują, że tempo pochłaniania węgla przez oceany może spadać. www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofchc], Le Quéré i in. (2007).
 - ... mniej więcej połowa emisji węgla zostaje w atmosferze. Potrzeba 2,1 mld t węgla w atmosferze (7,5 Gt CO₂), by stężenie CO₂ w atmosferze wzrosło o jedną cząstkę na milion (1 ppm). Gdyby całe CO₂ pompowane przez nas do atmosfery tam zostawało, stężenie rosłoby o ponad 3 ppm rocznie. W rzeczywistości rośnie o zaledwie 1,5 ppm rocznie.
- Niestety już 2 ppm rocznie: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Węgiel radioaktywny (...) spenetrował oceany zaledwie na głębokość 400 m. Średnia głębokość penetracji izotopu węgla 14C dla wszystkich stacji obserwacyjnych pod koniec lat 70. wyniosła 390±39 m (Broecker i in., 1995). Z [3e28ed].
- 260 Globalne ocieplenie większe niż o 1°C może spowodować topnienie hydratów metanu. Źródło: Hansen i in. (2007, str. 1942).
- Zapakowanie CO₂ do dziury w ziemi albo w głębinie oceaniczne. Więcej w: Williams (2000). „By większość wprowadzonego CO₂ pozostała w oceanach, trzeba je wstrzykiwać na wielkie głębokości. Kształtuje się konsensus, że w krótkiej perspektywie najlepiej wprowadzać CO₂ na głębokość 1000–1500 metrów, co da się zrobić przy obecnym zaawansowaniu technologicznym”.
- Więcej na ten temat również w raporcie specjalnym IPCC: www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.
- 261 Tabela 31.5. Nieunikniony koszt energetyczny koncentrowania i sprężania CO₂ wychwyconego z atmosfery. Niezbędne nakłady energetyczne pozwalające skoncentrować CO₂ z 0,03% do 100% pod ciśnieniem atmosferycznym wynoszą kT ln 100/0,03 na molekułę, a to 0,13 kWh na kg. Najniższy możliwy koszt energetyczny sprężania CO₂ do 110 bar (ciśnienie podawane dla składowania geologicznego) wynosi 0,067 kWh/kg. Stąd też najniższy możliwy koszt energetyczny wychwytu i kompresji CO₂ wynosi 0,2 kWh/kg. Wg specjalnego raportu IPCC nt. wychwytu i składowania CO₂ koszt rzeczywistej fazy drugiej, czyli kompresji CO₂ do 110 bar wynosi 0,11 kWh na kg (0,4 GJ na t CO₂; 18 kJ na mol CO₂; 7 kT na molekułę).
- W 2005 roku najlepsze znane metody wychwytu CO₂ z powietrza były raczej nieefektywne – zużycie energii wynosiło około 3,3 kWh na kg przy koszcie finansowym rzędu 140 USD za tonę CO₂. Źródła: Keith i in. (2005), Lackner i in. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David i Herzog (2000).
 - klimatolog Wallace Broecker... www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enbro.html
Jego książka promująca sztuczne drzewa: Broecker i Kunzig (2008).
- 246 Najlepsze „fabryki” w Europie wychwytyją dwutlenek węgla w tempie około 10 ton suchego drewna na hektar rocznie. Źródło: Specjalna Komisja ds. Nauki i Technologii przy Brytyjskiej Izbie Lordów.
- Wspomagane wietrzenie skał. Więcej w: Schuiling i Krijgsman (2006).
- 247 Użyźnianie oceanu. Więcej w: Judd i in. (2008); Chisholm i in. (2001). Zagrożenia związane z użyźnianiem oceanu są dyskutowane w: Jones (2008).