



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE,
PRZESTRZEŃ, OPTIMALIZACJA**

Olgierd Hryniewicz,
Andrzej Straszak,
Jan Studziński
red.



**BADANIA OPERACYJNE
I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZE-
STRZEŃ, OPTYMALIZACJA**

INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH • POLSKA AKADEMIA NAUK

Seria: BADANIA SYSTEMOWE
tom 63

Redaktor naukowy:

Prof. dr hab. inż. Jakub Gutenbaum

Warszawa 2008

Olgierd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZESTRZEŃ,
OPTIMALIZACJA**

Publikacja była opiniowana do druku przez zespół recenzentów, którego skład podano w treści tomu

Opinie, wyrażone przez autorów w pracach, zawartych w niniejszym tomie, nie są oficjalnymi opiniami Instytutu Badań Systemowych PAN, ani Polskiego Towarzystwa Badań Operacyjnych i Systemowych.

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN & Polskie Towarzystwo Badań Operacyjnych i Systemowych
Warszawa 2008

ISBN 83-894-7519-7
EAN 9788389475190

Redakcja i opracowanie techniczne: Jan W. Owskiński, Aneta M. Pielak, Anna Gostyńska

**Lista recenzentów
artykułów, wchodzących w skład tomów serii „Badania Systemowe”
związanych z konferencją BOS 2008**

Dr Paweł Bartoszczuk
Dr inż. Lucyna Bogdan
Dr hab. inż. Zbigniew Buchalski
Mgr inż. Hanna Bury
Prof. dr hab. Marian Chudy
Dr Jan Gadomski
Mgr Grażyna Grabowska
Mgr inż. Andrzej Jakubowski
Dr hab. inż. Ignacy Kaliszewski
Dr Andrzej Kałużko
Dr hab. Leszek Klukowski
Dr hab. inż. Wiesław Krajewski
Dr inż. Lech Kruś
Dr hab. inż. Marek Libura
Dr Barbara Mażbic-Kulma
Dr inż. Edward Michalewski
Dr inż. Jan W. Owiński
Dr inż. Grażyna Petriczek
Dr inż. Henryk Potrzebowski
Dr Maciej Romaniuk
Prof. dr hab. Piotr Sienkiewicz
Dr hab. Henryk Spustek
Prof. dr hab. Andrzej Straszak
Dr hab. inż. Jan Studziński
Prof. dr hab. Tomasz Szapiro
Mgr Anna Szediw
Dr inż. Grażyna Szkatuła
Dr hab. inż. Tadeusz Witkowski
Dr Irena Woroniecka-Leciejewicz
Dr hab. Sławomir Zadrożny
Dr inż. Andrzej Ziółkowski

**Komitet Konferencji
Badania Operacyjne i Systemowe 2008
Rembertów, Akademia Obrony Narodowej**

Patronat honorowy

Bogdan Klich, Minister Obrony Narodowej
Maciej Nowicki, Minister Środowiska i Zasobów Naturalnych

Komitet Sterujący

Janusz Kacprzyk, Prezes Polskiego Towarzystwa Badań Operacyjnych i Systemowych
Olgierd Hryniewicz, Dyrektor Instytutu Badań Systemowych
Janusz Kręcikij, Komendant Akademii Obrony Narodowej

Komitet Programowy

Piotr Sienkiewicz, *Przewodniczący*
Jacek Mercik, *Wiceprzewodniczący*

<i>Tomasz Ambroziak</i>	<i>Ryszard Budziński</i>	<i>Wojciech Cellary</i>
<i>Marian Chudy</i>	<i>Ludostaw Drelichowski</i>	<i>Jerzy Hołubiec</i>
<i>Olgierd Hryniewicz</i>	<i>Adam A. Janiak</i>	<i>Jerzy Józefczyk</i>
<i>Ignacy Kaliszewski</i>	<i>Józef Korbicz</i>	<i>Maciej Krawczak</i>
<i>Piotr Kulczycki</i>	<i>Małgorzata Łatuszyńska</i>	<i>Marek J. Malarski</i>
<i>Barbara Mażbic-Kulma</i>	<i>Zbigniew Nahorski</i>	<i>Andrzej Najgebauer</i>
<i>Włodzimierz Ogryczak</i>	<i>Wojciech Olejniczak</i>	<i>Jan W. Owsiański</i>
<i>Andrzej Piegat</i>	<i>Krzysztof Santarek</i>	<i>Roman Słowiński</i>
<i>Honorata Sosnowska</i>	<i>Henryk Spustek</i>	<i>Jan Stachowicz</i>
<i>Andrzej Straszak</i>	<i>Tomasz Szapiro</i>	<i>Andrzej Szymonik</i>
<i>Ryszard Tadeusiewicz</i>	<i>Eugeniusz Toczyłowski</i>	<i>Tadeusz Trzaskalik</i>
<i>Jan Węglarz</i>	<i>Tadeusz Witkowski</i>	<i>Stanisław Zajas</i>
	<i>Bogdan Zdrowski</i>	

Komitet Organizacyjny

Jan W. Owsiański, Andrzej Kałużko, Mieczysław Pelc, Zbigniew Piątek

Sekretariat

Krystyna Warzywoda, Monika Majkut, Aneta M. Pielak, Krzysztof Sep,
Anna Stachowiak, Halina Świeboda, Tadeusz Winiarski

Redakcja wydawnictw

Janusz Kacprzyk, Piotr Sienkiewicz, Andrzej Najgebauer,
Olgierd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński,
Jan W. Owsiański, Zbigniew Nahorski, Tomasz Szapiro

Środowisko i jego ochrona

OCENY ZAWARTOŚCI GAZÓW CIEPLARNIANYCH W ATMOSFERZE

Zbigniew Nahorski

Systems Research Institute, Newelska 6, 01-447 Warszawa

Antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych są podejrzewane o powodowanie zmian klimatycznych o trudnych do przewidzenia konsekwencjach. W tej pracy przedstawiono zarys budowy zintegrowanych modeli oceny stężeń tych gazów oraz spowodowanych tym skutków. Zwrócono uwagę na związane z modelowaniem niepewności.

1. Wprowadzenie

Wśród bardziej dyskutowanych ostatnio problemów związanych ze środowiskiem jest ocieplenie klimatu. W jednym z ostatnich raportów (Stern, 2007) ocenia się, że z prawdopodobieństwem ponad 95% jest to spowodowane emisją gazów cieplarnianych w wyniku działalności gospodarczej człowieka. Bez wątplenia, stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze wzrasta (Canadell i in., 2007; Raupach i in., 2007). O ile wynosiło ono, w przeliczeniu na dwutlenek węgla (oznaczane CO₂eq), 280 ppm (parts per milion) w okresie przed rewolucją przemysłową w XIX w., to obecnie wynosi około 430 ppm, a zgodnie z przewidywaniami podanymi przez Sterna (2007), przy obecnym tempie wzrostu emisji w roku 2035 może osiągnąć 550 ppm. Zgodnie z wynikami modelowania z Wigley i Raper (2001), Murphy i in. (2004), Meinshausen (2006), podaje on, że taki wzrost stężenia spowoduje wzrost średniej temperatury o 2⁰C z prawdopodobieństwem 77% lub nawet 99%, w zależności od użytego modelu, a pod koniec wieku z prawdopodobieństwem 50% wzrost o 5⁰C. Byłoby to podwojenie wzrostu temperatury od ostatniego zlodowacenia. Raport ocenia skutki wzrostu temperatury na zmianę rozkładu opadów, wzrost poziomu mórz, wymieranie gatunków, wydajność upraw, częstotliwość ekstremalnych warunków pogodowych, a nawet ryzyko nagłych nieodwracalnych zmian klimatycznych. Niekorzystne zmiany skupiłyby się głównie na obszarach zamieszkałych przez ludność o najniższych dochodach. Jednak wiele skutków dotknęłoby całą ludność.

W odróżnieniu od wcześniejszych modeli (Nordhaus, 1994; Nordhaus i Boyer, 2000) w raporcie Sterna uzyskane wyniki są podawane wraz z oszacowaniem ich prawdopodobieństw. Istotną różnicą jest też wniosek o konieczności szybkiego przeciwdziałania wzrostowi stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze poprzez ograniczenie tej części ich emisji, która jest związana z działalnością ludzi.

W poniższej pracy prześledzimy podstawowe moduły zintegrowanych modeli oceny zmian klimatu. Zwrócimy szczególną uwagę na niepewności występujące w tych modelach, związane także z szacowaniem emisji gazów cieplarnianych.

Zintegrowane modele oceny zmian klimatu, jak na przykład model będący podstawą raportu Sterna, obejmują następujące moduły:

- moduł emisji zanieczyszczeń, ze szczególnym uwzględnieniem emisji gazów cieplarnianych,
- moduł klimatyczny, opisujący zmiany, jakim podlegają zanieczyszczenia oraz ich wpływ na klimat, a głównie na temperaturę oraz opady,
- moduł oceny strat spowodowanych zmianami klimatu,
- moduł możliwych technologii przeciwdziałania wzrostowi zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze oraz ich kosztów,
- moduł ekonomiczny wyznaczający koszty scenariuszy rozwoju ekonomicznego z uwzględnieniem przyjętych opcji technologicznych.

Moduły te mogą agregować dane przestrzenne w różnym stopniu.

2. Moduł klimatyczny

Ideowo, zmiany zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze $M(t)$ przeliczone na dwutlenek węgla (CO_2eq) i wyrażone na przykład w Pg (czyli Gt), można opisać prostym modelem jednokompartmetywnym

$$\frac{dM(t)}{dt} = E_{FF}(t) + E_{LU}(t) - F_{OC}(t) - F_{TER}(t) \quad (1)$$

gdzie $E_{FF}(t)$ jest emisją gazów cieplarnianych związanych z potrzebami energetycznymi (jak podaje Stern (2007), w roku 2000 emisja ta pochodziła w 24% z produkcji energii, w 14% z transportu, w 14% z przemysłu, w 8% z budownictwa i w 5% z innych źródeł energetycznych), $E_{LU}(t)$ jest emisją nieprzemysłową (zgodnie z powyżej wymienionym źródłem w roku 2000 wynikała ona w 18% z użycia gruntów, w 14% z rolnictwa i w 3% z gospodarki odpadami), natomiast $F_{OC}(t)$ jest pochłanianiem gazów cieplarnianych przez wody powierzchniowe (głównie oceany), a $F_{TER}(t)$ przez powierzchnię lądów, niezwiązane z działalnością człowieka. Czas t jest na ogół liczony z odstępem rocznym. W modelu tym rozdzielono emisję/pochłanianie związane z działalnością człowieka od emisji/pochłaniania przez zjawiska przyrodnicze.

Model ten, zaproponowany w Jain i in. (1995), rozważany później w kilku pracach, agreguje istotnie zjawiska związane ze zmianami zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze. Potraktowanie atmosfery jako jednego zbiornika, motywowane bardzo dużymi skalami czasowymi rozpatrywanych zmian (rzędu 100 lat), pomija zarówno zmiany sezonowe w ciągu roku jak i terytorialny rozkład emisji gazów, co z pewnością ma wpływ na pochłanianie ilości gazów (na przykład duże stężenia w pobliżu oceanów powodują zwiększone lokalne pochłanianie, co w połączeniu z prądami oceanicznymi może być istotną „pompą” przepływu gazów do oceanu).

Niemniej jednak, model ten był jeszcze bardziej upraszczany. Nordhaus (1994) zaproponował bowiem jeszcze prostszy model

$$\frac{dM(t)}{dt} = \beta E_p(t) - \frac{1}{\tau} M(t), \quad (2)$$

w którym $E_p(t)$ jest wypadkową emisją gazów cieplarnianych spowodowanych działalnością człowieka, zaś składnik $1/\tau M(t)$ odpowiada za pochłanianie gazów przez

przyrodę. Model ten wymaga właściwie tylko znajomości wypadkowej emisji $E_p(t)$. Współczynnik β oraz stała czasowa τ są w nim estymowana metodami statystycznymi na podstawie przeszłych danych. Według tych szacunków stała czasowa jest rzędu kilkuset lat, co spowodowało pojawiające się czasem sformułowania o odpowiednim „czasie życia” dwutlenku węgla w atmosferze, a nawet mylącym „czasie rozkładu” tego gazu w atmosferze.

W modelu (2) założono, że pochłanianie jest proporcjonalne do zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze. I chociaż model (2) ma pewną motywację fizyczną, to ma on jednak bardziej charakter ekonometryczny. Zachodzi więc pytanie, na ile można przyjąć, że jego parametry będą stałe w okresie rozpatrywanym na ogół w modelach klimatycznych horyzoncie 100 lub więcej lat. Porównując zresztą model (2) z modelem (1) można się spodziewać, że współczynniki β i τ mogą zależeć od poziomu emisji. Takie modele zaproponowano w pracy Shultz i Karting (1997).

Warto może wspomnieć o często dyskutowanym wyniku związanym z modelem (1), tak zwaną niezgodnością obliczeń „bottom up” i „top down”. Otóż przyrost, na przykład roczny, zawartości gazów cieplarnianych można ocenić bezpośrednio na podstawie pomiarów ich stężeń, czyli obliczając lewą stronę równania. Można go także oceniać szacując emisje i pochłanianie po prawej stronie równania. Szacunki te z reguły nie zgadzają się, gdyż wynik obliczeń dla prawej strony jest mniejszy niż ten dla lewej. Prowadziły do długoletnich sporów o przyczyny takich wyników.

Proste modele przedstawione powyżej są wygodne do analizy i pozwalają na szybkie przeliczenia, co nie jest bez znaczenia w obliczeniach optymalizacyjnych. Niemniej duża agregacja stawia pytanie o dokładność uzyskiwanych za ich pomocą wyników. Nie jest zaskoczeniem, że powstały dokładne modele fizyczne opisujące szczegółowo zjawiska zachodzące w atmosferze. Modele te są rozwinięciem modeli prognoz pogodowych opracowywanych przez instytucje meteorologiczne. Takim modelem jest model HadAM3 opracowany przez Hadley Centre for Climate Prediction and Research z brytyjskiego Meteorological Office (Pope i in., 2000), będący rozwinięciem wcześniejszych modeli (Straton, 1999). W modelu tym rozwiązuje się równania różniczkowe cząstkowe na siatce o boku $2,5^\circ$ szerokości i $3,75^\circ$ długości geograficznej, z 19-ma warstwami pionowymi i krokiem czasowym 30 minut. Model zawiera podmodele: tworzenia się chmur (cząstek wody i lodu na podstawie całkowitej wilgotności i temperatury, które są wyznaczone w modelu), opadów i parowania, promieniowania (z uwzględnieniem wpływu CO_2 , H_2O , O_3 i aerosoli), oraz ruchów konwekcyjnych i grawitacyjnych w atmosferze. Model ten był wykorzystany do opracowania raportu Sterna (2007). Inny rozbudowany model z rozwiniętym opisem pochłaniania gazów przez ocean jest opisany w Menton i in. (2006).

3. Moduł oceny strat

Są to jedne z najtrudniejszych obecnie do oceny wielkości. Wchodzą tu różnego rodzaju straty ekonomiczne, zagrożenie zdrowotne i zgony, a także zagrożenia dla środowisk ekologicznych. Zagrożenia zdrowotne związane ze zmianą klimatu można ogólnie podzielić na trzy kategorie:

- bezpośrednio, jak fale gorąca, powódzie, susze, wichury,
- pośrednio, jak zmiany w geograficznym zakresie i częstotliwości chorób związanych z brakiem czystej wody, żywności, rozprzestrzenieniem zwierzęcych nosicieli chorób, stężeniem zanieczyszczeń i alergenów w powietrzu,
- wynikłe z powodu migracji ekonomicznych i degradacji środowiska, jak chociażby niedożywienie.

O ile w globalnych modelach klimatycznych można ocenić średni wzrost temperatury, zmiany prawdopodobieństwa opadów, wzrost częstotliwości katastroficznych zjawisk atmosferycznych, wzrost poziomu mórz itp., to trudno ocenić, jaki będzie wzrost chorób tropikalnych ze wzrostem temperatur, jak susze i powódzie wpłyną na rolnictwo i dostęp do czystej wody, czy straty w dobytku, jaki będzie skutek wielkich migracji spowodowanych zalaniem niżej położonych terenów czy pustynnieniem wielkich obszarów. Do wyobrażenia sobie skali problemu, istnieją na przykład oceny, że fala upałów w 2003 r. spowodowała śmierć 35 tys. osób, a wielkie powódzie w Chinach dotyczą setki tysięcy osób. Te zdarzenia wymagają rozważenia lokalnych warunków, dla których modele globalne nie dają obecnie dostatecznych informacji. Jednak prace na ten temat są prowadzone (IPCC, 2007; McMillan i in., 2004; NRC, 2001; Krzyzanowski i Cohen, 2008). Istnieją też wstępne oceny regionalne dla Afryki (Tol i in., 2007) i Dalekiego Wschodu (Woodward i in., 1998).

Jeszcze mniej zaawansowane są badania nad innymi zagrożeniami, jak na przykład dla przyrody. W rezultacie na ogół zamiast zagrożeń rozważa się na ogół straty ekonomiczne wyrażone modelami ekonometrycznymi. I tak w modelu DICE (Nordhaus, 1994) do tego celu użyto prostej funkcji

$$d(t) = \beta \left(\frac{T(t)}{T_0} \right)^\gamma \quad (3)$$

gdzie $d(t)$ są stratami ekonomicznymi spowodowanymi zmianami klimatu, wyrażonymi jako procent dochodu lub konsumpcji, $T(t)$ jest wzrostem średniej temperatury w stosunku do okresu przedindustrialnego, T_0 jest przyjętym wzrostem temperatury (2,5°C lub 3°C). Parametry β i γ są estymowane na podstawie danych historycznych. Modele te dobrze przewidują historyczne straty w zakresie wzrostów do 2,5-3°C, ale dla wyższych wzrostów bardzo zależą od uzyskanej oceny parametru γ , którą w różnych pracach przyjmowano od 1 do 3. W modelu PAGE (Hope, 2006), który był podstawą do sformułowania wniosków w raporcie Sterna (2007), przyjęto trójkątny rozkład parametru γ na przedziale [1,3] z maksimum w 1,3.

Duże wzrosty temperatury mogą doprowadzić do nieodwracalnych katastrof globalnych, typu zmian cyklu El Niño czy zmian monsunów. Także związane z tym straty są modelowane. Na przykład w modelu PAGE przyjęto do tego celu funkcję

$$d(t) = \zeta \theta (T(t) - T_T) \quad T(t) > T_T \quad (4)$$

gdzie T_T jest wartością progową temperatury, powyżej której zachodzą katastrofalne zmiany, modelowaną jako zmienna o rozkładzie trójkątnym na przedziale 2-8°C z maksimum dla 5°C; θ jest prawdopodobieństwem wystąpienia katastrofalnych zmian, modelowanym jako zmienna o rozkładzie trójkątnym na przedziale 5-20%, z maksimum dla 10%; zaś ζ jest procentową stratą ekonomiczną, modelowaną jako

zmienna o rozkładzie trójkątnym na przedziale 1-20% z maksimum w 10%. W ustalaniu rozkładów brano pod uwagę pewne badania, ale w sumie są one bardziej przyjętymi przez autorów założeniami.

4. Moduł technologiczny

Możliwości ograniczania emisji gazów cieplarnianych zależą od wprowadzenia nowych technologii, głównie w zakresie produkcji energii. Moduł technologiczny ma za zadanie głównie ocenę możliwości i kosztów wymaganych zmian. Modele te są adaptowane do zagadnienia technologii ograniczających emisję CO₂. Dwa główne podejścia to prostszy model egzogeniczny, w którym przyszła emisja jest mnożona przez zadaną funkcję, typowo wykładniczą, uwzględniającą spadek emisji spowodowany postępowaniem technicznym. W bardziej skomplikowanym modelu endogenicznym opisuje się postęp techniczny. W tym przypadku istotny jest wymuszony postęp techniczny (Carraro i in., 2003, oraz cały numer specjalny), spowodowany wzrostem nakładów na badania (Goulder i Schneider, 1999), a ze względu na globalny charakter problemu, także rozprzestrzenieniem nowych, efektywnych technologii (Riahi i in., 2004). Dla użytku w modelach optymalizacyjnych opracowuje się krzywe technologiczne, opisujące koszt w funkcji redukcji emisji. W tym celu opracowano zestawienie dostępnych kilkuset technologii oraz kilkunastu tysięcy scenariuszy redukcji (Merita, 1998; Nakićenović, 1998). Niepewności podejścia wymuszonego postępu technicznego są dyskutowane w (Gritsevskiy i Nakićenović, 2000).

5. Moduł ekonomiczny

W module ekonomicznym do oceny PKB często stosuje się multiplikatywne neoklasyczne funkcje produkcji Cobba-Douglasa lub CES, jak użyte w modelu DICE (Nordhaus, 1994) lub PAGE (Hope, 2006) w postaci

$$Q(t) = \frac{1}{1 + d(t)} A(t)K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} \quad (5)$$

gdzie $K(t)$ jest kapitałem, $L(t)$ jest pracą, $A(t)$ jest postępowaniem technicznym. Wartość ta jest dzielona przez wyrażenie uwzględniające straty spowodowane zmianami klimatycznymi $d(t)$, będące sumą strat (3) i (4).

Do wyznaczenia funkcji kosztu obniżania emisji $TC(t)$ produkcja (5) jest mnożona przez wyrażenie zależna od ułamka zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych $\mu(t)$

$$TC(t) = b_1 \mu(t)^{b_2} Q(t) \quad (6)$$

Optymalizowaną w modelach funkcją na ogół ta wielkość jest przeliczana na głowę mieszkańca Ziemi i sumowana do roku 2100 ze stopą dyskontową r

$$\sum_{t=2000}^{2100} \frac{TC(t)}{P(t)} (1+r)^{2000-t} \quad (7)$$

gdzie $P(t)$ jest liczbą ludności Ziemi.

Wynik optymalizacji zależy w istotny sposób od przyjętej stopy dyskontowej. Duża wartość stopy dyskontowej oznacza, że koszty w przyszłości są dużo mniej brane pod uwagę, niż obecne. Mała wartość stopy oznacza, że przywiązuje się sporą wagę do przyszłych kosztów. W modelu DICE (Nordhaus, 1994; Nordhaus i Boyer, 2000) przyjmowano stopę dyskontową równą 6%, u Sterna (2007) była ona równa 1,4%. To doprowadziło do różnych wniosków dotyczących potrzeby działań przeciwdziałających stężeniu gazów cieplarnianych w atmosferze. O ile z modeli DICE wynikało, że działania obecne nie muszą być zbyt radykalne, to raport Sterna zaleca pilne ograniczenia emisji gazów. Inną istotną różnicą między modelami jest podejście deterministyczne w modelu DICE (w sensie wyznaczenia jednego rozwiązania) w przeciwieństwie do podejścia stochastycznego w raporcie Sterna (rozwiązania i wnioski są formułowane w terminach prawdopodobieństwa ich zajścia). Te prawdopodobieństwa są oparte w dużym stopniu na istniejącej obecnie wiedzy (na przykład do szacowania prawdopodobieństw uwzględnia się wyniki obliczeń z modeli opracowanych przez różne zespoły), jednak zawierają one także dużo subiektywnych rozkładów, jak choćby rozkłady trójkatne w omawianych wcześniej modelach strat.

Raport Sterna wzbudził ogromną dyskusję nad założeniami i rozwiązaniami. Przytoczone tu prace (Barker, 2008; Dietz i in., 2007; Meinshausen, 2006; Pielke, 2007; Weitzman, 2007) są tylko przykładami takich dyskusyjnych artykułów. W szczególności dużo głosów dyskusyjnych dotyczy przyjęcia stopy dyskontowej, z rozważaniem także względów etycznych tej decyzji: czy zostawiać dla przyszłych pokoleń poniesienie kosztów, być może bardzo dużych, naszej niefrasobliwości w emisji gazów cieplarnianych. Zwraca się w nich także uwagę na wiele dyskusyjnych uproszczeń, które mogą istotnie wpływać na końcowe wnioski (np. Barker, 2008).

5. Emisja gazów cieplarnianych

Emisja gazów cieplarnianych związana z działaniem ludzi jest oceniana pośrednio przez inwentaryzację działalności prowadzących do emisji tych gazów. Każdemu rodzajowi działalności jest przyporządkowany współczynnik jej emisyjności, w jednostkach masy CO_2eq (lub węgla przeliczeniowego) na jednostkę zużytego do produkcji materiału w rozważanej działalności (tzw. aktywności). Ocena emisji z działalności jest iloczynem tych wielkości. Ocena emisji kraju jest sumą emisji ze wszystkich działalności. Działalności prowadzące do emisji są wyszczególnione w IPCC (2000). Obie podstawowe wielkości: aktywność i emisyjność, są znane ze skończoną dokładnością, skąd niepewnością są także obarczone emisje. Niepewność emisji zależy od rodzaju działalności. Emisje CO_2 ze spalania paliw kopalnych, emisje z przemysłu są na ogół oceniane z niezłą dokładnością, do 5%. Ale także tu mogą być znaczne różnice między krajami, wynikające na przykład z lepszej lub gorszej możliwości rejestracji wielkości czy z gorszych możliwości analizy zachodzących procesów. Znacznie mniej dokładne są oceny emisji innych gazów i z innych działalności. Na przykład dokładności ocen emisji metanu z działalności przemysłowych mogą być rzędu 50%, z rolnictwa 100%, a emisji N_2O z rolnictwa nawet rzędu 200% (Ramirez i in., 2006). W zależności od udziału różnych działalności oraz ich dokładności niepewności w ocenach emisji poszczególnych krajów różnią się nawet czterokrotnie.

Zagadnieniu niepewności emisji, mającemu duży wpływ na uzyskiwane w modelach klimatycznych wyniki, poświęcono dwa spotkania naukowe po nazwą *International Workshop on Uncertainty in Greenhouse Gas Inventories*, zorganizowane wspólnie przez Międzynarodowy Instytut Stosowanej Analizy Systemowej (IIASA) i Instytut Badań Systemowych PAN. Materiały z tych spotkań znajdują się na stronie internetowej IBS PAN: www.ibspan.waw.pl, a wybrane artykuły z pierwszego spotkania wydano w Lieberman i in. (2007), wydawnictwo z drugiego spotkania jest w przygotowaniu. Odsyłając Czytelnika do powyższej literatury podsumujemy tu najważniejsze wnioski ze spotkań.

W protokole z Kioto kraje rozwinięte (wymienione w Aneksie I do Protokołu) przyjęły na siebie zróżnicowane zobowiązania do redukcji emisji (część państw uzyskała pozwolenie na pozostawienie, a nawet wzrost emisji) w latach głównie od 1990 r. do okresu rozliczeniowego w latach 2008-2012 (dla części państw uzgodniono inny rok początkowy, a dla części gazów i niektórych państw rok początkowy ustalono na 1995). Największe ograniczenia emisji w tym czasie mają wynosić 6% lub 8%. Tymczasem niepewności ocen emisji są przynajmniej tego samego rzędu, a z uwzględnieniem zmian użycia gruntów nawet wyższe. Warto też wspomnieć, że część krajów (na przykład USA) ostatecznie nie przystąpiła do grupy krajów, które postanowiły zredukować emisje. Nie zostały nią też objęte kraje rozwijające się, w tym tak duże jak Chiny i Indie.

Niepewność inwentaryzacji gazów cieplarnianych jest ich nieodłączną cechą. Analiza niepewności pozwala lepiej zrozumieć zależności między inwentaryzacjami z poszczególnych krajów i określić najbardziej celowe sposoby jej zmniejszenia. Największe niepewności emisji są związane ze zmianą gospodarki gruntami i leśnictwem. Jest to spowodowane skomplikowaniem i skalą rozważanych systemów, które podlegają silnym rocznym i długoletnim zmianom pogodowym, a ingerencje człowieka mają długoletnie implikacje. Tymczasem obliczenia emisji i ocena ich dokładności są obecnie zalecane tylko dla emisji powodowanych przez człowieka. Dla potrzeb modeli klimatycznych należy włączyć analizę całkowitej emisji, także tej nie powodowanej przez człowieka (na przykład ogromne pożary lasów potrafią jednorazowo wprowadzić do atmosfery ogromne ilości dwutlenku węgla), nawet jeżeli nie są one objęte zobowiązaniami do redukcji.

Analiza niepewności pozwala określić, na ile wiarygodne są raportowane przez kraje redukcje emisji. W referatach prezentowanych na spotkaniach zaproponowano sposoby rozliczania redukcji w warunkach niepewności ocen emisji, zarówno w duchu Protokołu z Kioto, jak i z dużym odejściem od przyjętych tam zasad.

Aby obniżyć koszty redukcji emisji, w Protokole z Kioto określono mechanizmy handlu emisjami. Strony mające nadwyżki redukcji mogą je sprzedać tym stronom, które mają kłopoty z uzyskaniem przyjętej redukcji. W prezentowanych referatach zaproponowano zasady handlu w warunkach niepewności. Zaproponowany sposób prowadzi w pośredni sposób do wyceny niepewności.

7. Podsumowanie

Ocena przyszłych zmian klimatycznych i ich skutków jest jednym z najtrudniejszych wyzwań stawianych przed nauką. Dotyczy ona ogromnego systemu o wielu aspektach, niedostatecznie poznanych procesach i związanych z tym dużych niepewnościach. W rezultacie trudno jest nawet zbilansować zawartość tych gazów w atmosferze. Przewidywanie przyszłych zdarzeń wiąże się nie tylko z prognozowaniem zdarzeń na wiek do przodu, ze względu na ogromne stałe czasowe, ale także wymaga ekstrapolacji daleko poza obecne i historycznie notowane średnich temperatur. Groźba nieodwracalnych zmian klimatycznych wymaga jednak poważnego zajęcia się tym problemem.

Intensywne badania doprowadziły do istotnego postępu w modelowaniu tego zagadnienia. Globalne modele klimatyczne, korzystające z doświadczeń modeli meteorologicznych oraz modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń gazowych siarkowych, azotowych itp., także połączonych z emisją gazów cieplarnianych, jak w modelu GAINS (Cofała i in., 2007), są już obecnie bardzo zaawansowane. Znaczną ich poprawę można by było pewnie osiągnąć poprawiając dokładność warunków brzegowych związanych z pochłanianiem CO₂ przez powierzchnię Ziemi. Ważnym rozszerzeniem tych modeli są powstające modele regionalne (na przykład kontynentalne). Warto by było też rozpocząć pracę nad jeszcze dokładniejszymi modelami krajowymi, pozwalającymi na planowanie środków zaradczych na poziomie rządów.

Dwa najbardziej znane modele ekonomiczne (Nordhaus i Boyer, 2000; Stern, 2007) wzbudziły ogromną dyskusję nad przyjętymi założeniami i rozwiązaniami. Z doświadczeń wiadomo jednak, że modele ekonometryczne często słabo zachowują się przy znacznych ekstrapolacjach. Opisanie wyników modeli rozkładami prawdopodobieństwa jest istotnym postępem, gdyż daje pojęcie o pewności tych wyników, nawet jeżeli są to głównie prawdopodobieństwa subiektywne.

Niedoceniana często przez modelarzy jest dokładność inwentaryzacji emisji. Tymczasem oceny emisji są obciążone dużymi niepewnościami, szczególnie te związane z rolnictwem i leśnictwem. Nawet najbardziej dokładne modele, zasilane emisjami o dużych niepewnościach nie zapewnią dokładnych wyników zawartości i rozkładu gazów cieplarnianych w atmosferze.

Literatura

- Barker T. (2008) The economics of avoiding dangerous climate change. An editorial essay on The Stern Review. *Climatic Change*, **89**, 173-194.
- Canadell J. G., Le Quéré C., Raupach M. R., Field Ch. B., Buitenhuis E. T., Ciais Ph., Conway T., Gollat N. P., Houghton R. A., Marland G. (2007) Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. National Academy of Sciences*, **104** (47), 18866-18870.
- Carraro C., Gerlagh R., Zwaan B. van der (2003) Endogenous technical change in environmental macroeconomics. *Resource and Energy Economics*, **25**, 1-10.

- Cofala J., Amman M., Asman W., Bertok I., Klimont Z., Schöpp W., Wagner F. (2007) Integrated Assessment of Air Pollution and Greenhouse Gases Mitigation in Europe. *Environfo 2007 – Environmental Informatics and Systems Research*, 2. Shaker Verlag, Aachen, 259-266.
- Dietz S., Hope C., Patmore N. (2007) Some economics of 'dangerous' climate change: Reflections on the Stern Review. *Global Environmental Change*, **17**, 311-325.
- Goulder L. H., Schneider S. H. (1999) Induced technological change and the attractiveness of CO₂ abatement policies.
- Gritsevskiy A., Nakićenović N. (2000) Modeling uncertainty of induced technological change. *Energy Policy*, **28**, 907-921.
- Hope C. (2006) The marginal impact of CO₂ from PAGE2002: an integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern. *Integrated Assessment*, **6** (1), 19-56.
- IPCC (2000) Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report.
- Jain A. K., Khashgi H. S., Hoffert M. I., Wuebbles D. J. (1995) Distribution of radiocarbon as a test of global carbon cycle models. *Global Biogeochemical Cycles*, **9**, 153-166.
- Krzyżanowski M., Cohen A. (2008) Update of WHO air quality guidelines. *Air Qual. Atmos. Health*, **1**, 7-13.
- Lange A., Treich N. (2008) Uncertainty, learning and ambiguity in economic models on climate policy: Some classical results and new directions. *Climatic Change*, **89**, 7-21.
- Lenton T. M., Williamson M. S., Edwards N. R., Marsh R., Price A. R., Ridgwell A. J., Shepherd J. G., Cox S. J., (2006) Millennial timescale carbon cycle and climate change in an efficient Earth system model. *Climate Dynamics*, **26**, 687-711.
- Lieberman D., Jonas M., Nahorski Z., Nilsson S. (Eds.) (2007) *Accounting for Climate Change*. Springer.
- McMichael A. J., Cambell-Ledrum D., Kovats S., Edwards S., Wilkinson P., Wilson T., Nicholls R., Hales S., Tanser F., LeSueur D., Schlesinger M., Andronova N. (2004) Global climate change. W: Ezzati M., Lopez A., Rodgers A., Murray C.: *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease due to Selected Major Risk Factor*. World Health Organization, Geneva, 1543-1649.
- Meinshausen M. (2006) What does a 2⁰C target mean for greenhouse gas concentration? A brief analysis based on multi-gas emission pathways and several climate sensitivity uncertainty estimates. W: Schellnhuber H. J., Cramer W., Nakićenović N., Wigley T., Yohe G. (Red.) *Avoiding dangerous climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, 265-280.
- Morita T., Lee H.-C. (1998) Appendix to emissions scenarios database and review of scenarios. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **3** (2-4), 121-131.
- Murphy J. M., Sexton D. M. H., Barnett D. N., Jones G. S., Webb M. J., Collins M., Stainforth D. A. (2004) Quantification of modelling uncertainty in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*, **430**, 768-772.
- Nakićenović N., Victor N., Morita T. (1998) Emission scenarios database and review of scenarios. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **3** (2-4), 95-120.
- Nordhaus W. D. (1994) *Managing the Global Commons: The Economics of the Climate Change*. MIT, Cambridge.
- Nordhaus W. D., Boyer J. (2000) *Warming the World. Economic Models of Global Warming*. MIT, Cambridge.
- NRC (2001) Under the weather: climate, ecosystems, and infectious disease. National Academy Press, Washington.

- O'Neill B. C., Melnikov N. B. (2008) Learning about parameter and structural uncertainty in carbon cycle models. *Climatic Change*, **89**, 23-44.
- O'Neill B. C., Sanderson W. (2008) Population, uncertainty, and learning in climate change decision analysis. *Climatic Change*, **89**, 87-123.
- Pielke R. Jr. (2007) Mistreatment of the economic impacts of extreme events in the Stern Review report on the economics of climate change. *Global Environmental Change*, **17**, 302-310.
- Pope, V.D., Gallani, M., Rowntree, P.R., Stratton, R.A. (2000) The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model - HadAM3. *Climate Dynamics*, **16**, 123-146.
- Popp D. (2004) ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and Management*, **48**, 742-768.
- Ramirez A. R., Keizer C. de, Sluijs J. P. van der (2006) *Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990-2004*. Report NWS-E-2006-58. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation. Utrecht University.
- Raupach M. R., Marland G., Ciais Ph., Le Quéré C., Canadell J. G., Klepper G., Field Ch. B. (2007) Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *Proc. National Academy of Sciences*, **104** (24), 10288-10293.
- Riahi K., Rubin E. S., Taylor M. R., Schrattenholzer L., Hounshell D. (2004) Technological learning for carbon capture and sequestration technologies. *Energy Economics*, **26** (4), 549-564.
- Shultz P. A., Kastins J. F. (1997) Optimal reductions in CO₂ emissions. *Energy Policy*, **25** (5), 491-500.
- Stern N. (2007) *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Stratton R. A. (1999) A high resolution AMIP integration using the Hadley Centre model HadAM2b. *Climate Dynamics*, **15**, 9-28.
- Tol R. S. J., Ebi K. L., Yohe G. W. (2007) Infectious disease, development, and climate change: a scenario analysis. *Environ. Dev. Econ.*, **12**, 687-706.
- Weitzman M. L. (2007) A review of the Stern Review on the economics of climate change. *Journal of Economic Literature*, **45** (3), 703-734.
- Wigley T. M. L., Raper S. C. B. (2001) Interpretation of high projections for global-mean warming. *Science*, **293**, 451-454.
- Woodward A., Hales S., Weinstein P. (1998) Climate change and human health in the Asia Pacific region: who will be most vulnerable? *Climatic Research*, **11**, 31-38.

IBS PAN *Konf.*

46003

Bibl. podręczna

**Olgierd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński
red.**

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZESTRZEŃ,
OPTYMALIZACJA**

Książka składa się z artykułów przedstawiających wyniki prac z dziedziny badań operacyjnych i systemowych, poświęconych środowisku naturalnemu i zarządzaniu nim, zwłaszcza w zakresie ochrony atmosfery, globalnego ocieplenia i walki z nim, jakości i zaopatrzenia w wodę. Tematyka ta jest rozszerzona o aspekty przestrzenne, regionalne i samorządowe, a także planowanie i funkcjonowanie infrastruktury. Tom zamykają prace metodyczne, dostarczające technik, będących podstawą prezentowanych zastosowań.

**ISBN 83-894-7519-7
EAN 9788389475190**

Instytut Badań Systemowych PAN
tel. (4822) 3810241 / 3810273 e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl