

ZBIGNIEW W. KUNDZEWICZ

*Zakład Badań Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN
Bukowska 19, 60-809 Poznań
E-mail: kundzewicz@yahoo.com*

WPROWADZENIE – GLOBALNE OCIEPLENIE KLIMATU

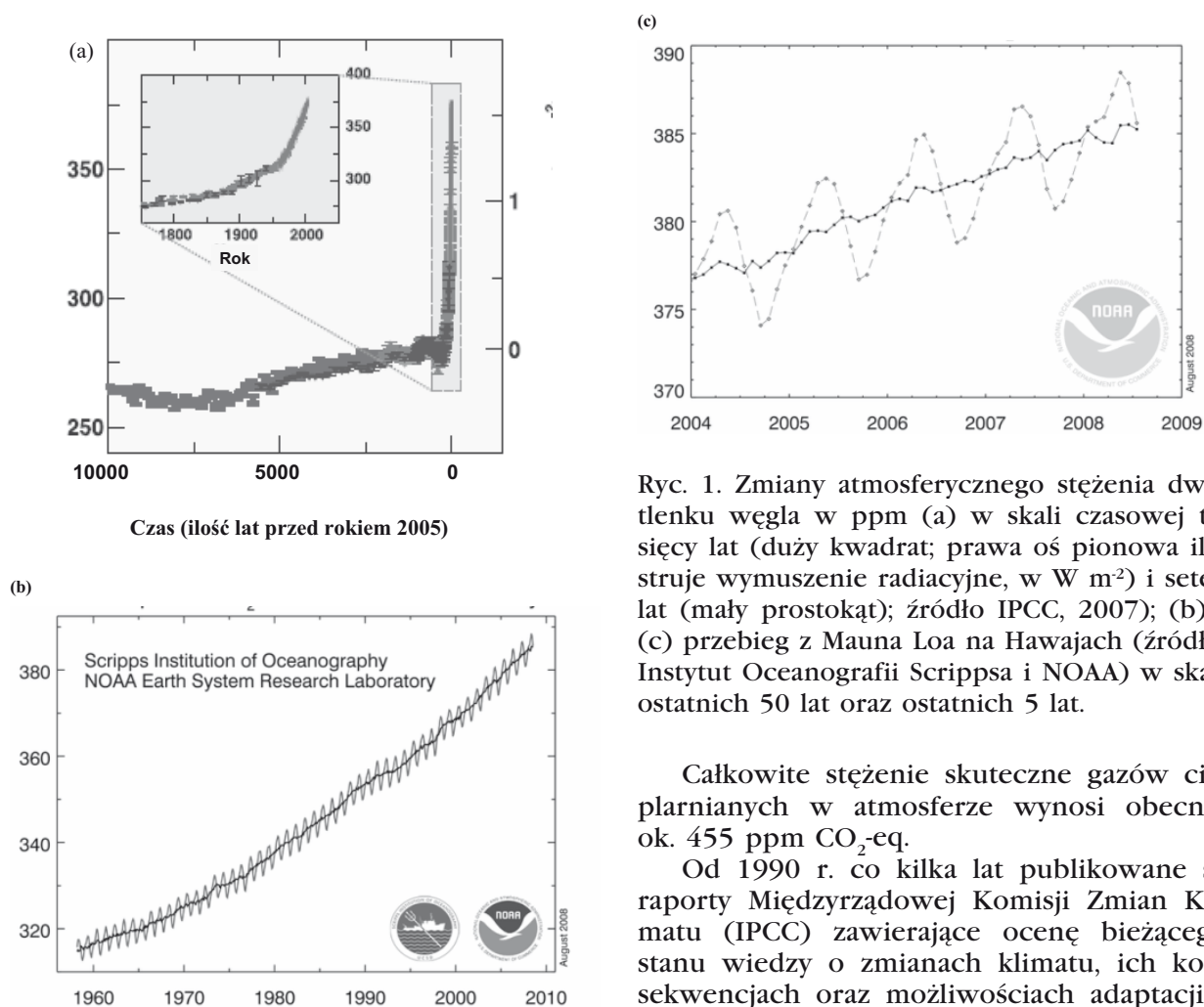
WSTĘP

Istnieje coraz silniejsze świadectwo na poparcie hipotezy, że ziemski klimat ociepla się. Obserwujemy wyraźne trendy wzrostu temperatury globalnej w ciągu ostatnich 100, 50 czy 20 lat. Każdy kolejny rok z ostatniego dwudziestolecia wpisuje się w obraz cieplejszego świata – średnia temperatura globalna każdego roku przewyższa średnią z dowolnego 30-lecia sprzed 1990 r. Niektórzy twierdzą, że zmiany klimatu to nic nowego – klimat naszej planety zmieniał się wielokrotnie w historii Ziemi, a okresy chłodniejsze przeplatały się z cieplejszymi. Można więc powiedzieć, że jedyną niezmienną cechą klimatu jest to, że zawsze ulegał zmianom. Zmienia się więc i teraz. To wszystko prawda. Istnieją jednak mocne przesłanki ku stwierdzeniu, że obecne ocieplenie różni się w istotny sposób od wielu wcześniejszych okresów wzrostu temperatury. Te wcześniejsze wywołane były zmianami naturalnymi – wahaniami promieniowania słonecznego (aktywność Słońca), zmianą położenia i konfiguracji Ziemi na orbicie wokół Słońca (cykle zmian mimośrodowości eliptycznej orbity, precesji i kąta nachylenia osi do płaszczyzny ekliptyki) i zmianą składu ziemskiej atmosfery (np. w wyniku megawulkanów, czy uderzenia wielkiego meteorytu w powierzchnię Ziemi). W zmianach klimatu ważną rolę odgrywały sprzężenia zwrotne związane z własnościami powierzchni Ziemi (lód i śnieg, zmarzlina, roślinność).

Światowy system klimatyczny jest bardzo skomplikowany. Temperatura globalna zależy od promieniowania słonecznego, parame-

trów geometrii ruchu Ziemi, składu atmosfery (gazy cieplarniane, pył, aerozole) i własności powierzchni Ziemi. Słońce ogrzewa Ziemię, ale gdyby wokół naszej planety nie było atmosfery zawierającej gazy cieplarniane, średnia globalna temperatura powietrza wynosiłaby -18°C , a nie $+14,5^{\circ}\text{C}$, jak obecnie (byłaby więc o $32,5^{\circ}\text{C}$ niższa). Zjawisko efektu cieplarnianego (szklarniowego) polega na tym, że energia słoneczna, w części zaabsorbowana przez Ziemię, jest emitowana z jej powierzchni w postaci niewidzialnego promieniowania długofalowego (podczerwonego). Część tego promieniowania „ucieka” w przestrzeń kosmiczną, ale część zatrzymywana jest przez atmosferę ziemską i ogrzewa naszą planetę. Ilość energii pochłoniętej przez atmosferę zależy od zawartości gazów szklarniowych (pary wodnej, dwutlenku węgla, metanu, podtlenku azotu i innych). Dzięki efektowi cieplarnianemu na Ziemi istnieje bujne życie biologiczne.

Za zachodzące obecnie zmiany klimatu w znacznej mierze odpowiedzialne są działania człowieka, które spowodowały wyraźną intensyfikację efektu cieplarnianego. Na świecie żyje dziś niemal 6,7 miliarda ludzi, którzy zużywają coraz więcej energii i drastycznie zmieniają powierzchnię Ziemi. Rosną więc emisje i atmosferyczne stężenie dwutlenku węgla (wskutek wzrostu spalania węgla, ropy i gazu, a także redukcji możliwości wiązania węgla przez roślinność, towarzyszącej wylesieniu, zwłaszcza w tropikach) (Ryc. 1), metanu (produkcja ryżu, hodowla, topnienie zmarzliny) i podtlenku azotu (rolnictwo). W



Ryc. 1. Zmiany atmosferycznego stężenia dwutlenku węgla w ppm (a) w skali czasowej tysięcy lat (duży kwadrat; prawa oś pionowa ilustruje wymuszenie radiacyjne, w $W m^{-2}$) i setek lat (mały prostokąt); źródło IPCC, 2007); (b) i (c) przebieg z Mauna Loa na Hawajach (źródło: Instytut Oceanografii Scripps i NOAA) w skali ostatnich 50 lat oraz ostatnich 5 lat.

efekcie „dach” naszej globalnej szklarni zatrzymuje coraz więcej promieniowania długofalowego emitowanego przez Ziemię, które uciekłyby w przestworza. Brak jest alternatywnego sposobu poważnego wyjaśnienia przyczyn wzrostu temperatury w ostatnich dekadach.

Od 8000 lat przed naszą erą do XIX w. atmosferyczne stężenie dwutlenku węgla zmieniało się stosunkowo nieznacznie (Ryc. 1a). Wyraźny wzrost od poziomu ok. 280 ppm rozpoczął się wraz z nadejściem epoki przemysłowej. Jak pokazują „ikoniczne” wykresy ilustrujące wyniki pomiarów przeprowadzonych w obserwatorium Mauna Loa na Hawajach, gdzie stężenie dwutlenku węgla mierzy się najdłużej w świecie, bo od ponad 50 lat (Ryc. 1b), tendencja wzrostowa utrzymuje się do dziś (Ryc. 1c). Na wyraźny trend wzrostu nakładają się oscylacje sezonowe, związane z pochłanianiem dwutlenku węgla przez roślinność w sezonie wegetacyjnym.

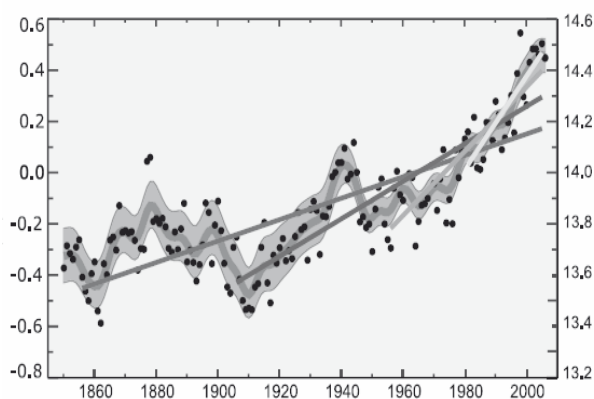
Całkowite stężenie skuteczne gazów cieplarnianych w atmosferze wynosi obecnie ok. 455 ppm CO₂-eq.

Od 1990 r. co kilka lat publikowane są raporty Międzyrządowej Komisji Zmian Klimatu (IPCC) zawierające ocenę bieżącego stanu wiedzy o zmianach klimatu, ich konsekwencjach oraz możliwościach adaptacji i przeciwdziałania. Retoryka zasadniczych sentencji IPCC uległa znacznej ewolucji od czasów pierwszego raportu o zmianach klimatu (1990), w którym można było przeczytać o „niewielkim świadectwie odróżnialnego wpływu człowieka na klimat”. W drugim raporcie IPCC, wydanym w 1996 r., była już mowa o „odróżnialnym wpływie człowieka”. Trzeci raport, z roku 2001, przyniósł znacznie mocniejsze stwierdzenie: „Większość zaobserwowanego ocieplenia w ostatnim 50-leciu jest prawdopodobnie [interpretacja terminu „prawdopodobnie” = ponad 66%, przyp. ZWK] wynikiem wzrostu atmosferycznego stężenia gazów cieplarnianych”. Wreszcie, w najnowszym, czwartym raporcie (IPCC 2007a) czytamy: „Większość zaobserwowanego wzrostu średniej temperatury globalnej od połowy XX wieku jest bardzo prawdopodobnie [interpretacja terminu „bardzo prawdopodobnie” = ponad 90%, przyp. ZWK] spowodowana wywołanym przez człowieka wzrostem stężenia gazów cieplarnianych”.

ŚWIADECTWO OCIEPLENIA

Ziemi klimat ociepla się we wszystkich skalach, od punktowej (w znakomitej większości „oczek” siatki pokrywającej Ziemię) do globalnej. Świadczą o tym wyniki pomiarów temperatury prowadzone na dziesiątkach tysięcy stacji obserwacyjnych. Przez ostatnie 150 lat średnie tempo ocieplenia globalnego wynosiło $0,045^{\circ}\text{C}$ na dekadę, w ciągu ostatnich 100 lat – $0,074$, w ostatnich 50 latach – $0,128$, a w ciągu ostatnich 25 lat – $0,177$ (Ryc. 2). Temperatura rośnie więc coraz szybciej – średnie tempo ocieplenia w ciągu ostatnich 25 lat było niemal czterokrotnie wyższe niż średnio w ostatnich 150 latach.

Ostatnie dziesięciolecie (1998–2007) jest zdecydowanie najcieplejsze w historii globalnych obserwacji temperatury, odtworzonej (BROHAN i współaut. 2006) od 1850 (Ryc. 2). Spośród 13 najcieplejszych pojedynczych lat od 1850, aż 12 lat wystąpiło w okresie 1995–2007 (Tabela 1). Tylko jeden rok (1996) z tego okresu nie zmieścił się na liście 13 najcieplejszych globalnie lat w historii obserwacji, ale i tak zajął wysokie 19 miejsce, będąc znacznie cieplejszy niż średnia z wielolecia. W dwudziestce najcieplejszych lat od 1850 zmieściło się aż 17 lat z ostatniego dwudziestolecia. Na liście brakuje jedynie 1989 (anomalia $0,103$), 1992 ($0,061$) i 1993 ($0,101$). Zaobserwowane w latach 1992–1993 stosunko-



Ryc. 2. Trendy wzrostowe temperatury globalnej.

Kropki przedstawiają temperatury globalne średnie roczne, ciemniejsza krzywa – szereg wygładzony, a jaśniejsza krzywa – granice błędów 5–95%. Oś pionowa lewa pokazuje anomalie temperatury globalnej (w $^{\circ}\text{C}$) w porównaniu z okresem 1961–1990, a oś pionowa prawa – oszacowanie średniej temperatury globalnej (w $^{\circ}\text{C}$). Źródło: IPCC (2007a).

wo małe przewyższenia długoletniej średniej temperatury (z lat 1961–1990) wytłumaczyć można krótkotrwałym zahamowaniem ocieplenia przez silną erupcję wulkanu Pinatubo na Filipinach w czerwcu 1991 r., która wprowadziła do atmosfery znaczną dawkę pyłów i aerozoli. Przewiduje się, że rok 2008 też

Tabela 1. Ranking lat z najwyższymi średnimi temperaturami globalnymi od 1860 r.

Pozycja roku w rankingu najcieplejszych lat od 1850	Rok	Odchylenie temperatury globalnej od średniej z 30-lecia 1961–1990
1	1998	0,546
2	2005	0,482
3	2003	0,473
4	2002	0,464
5	2004	0,447
6	2006	0,422
7	2001	0,409
8	2007	0,403
9	1997	0,351
10	1999	0,296
11	1995	0,275
12	2000	0,270
13	1990	0,255
14	1991	0,210
15	1988	0,180
16	1987	0,179
17	1983	0,177
18	1994	0,171
19	1996	0,137
20–21	1944	0,120
	1981	

Tabela według danych zebranych przez Uniwersytet Wschodniej Anglii w Norwich we współpracy z Centrum Hadley'a Brytyjskiego Biura Meteorologicznego (zob. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>). Tabela pokazuje anomalie (odchylenia) temperatury rocznej względem średniej z lat 1961–1990.

należć będzie do dziesięciu najcieplejszych w historii pomiarów temperatury globalnej za pomocą termometrów i spowoduje „wypchnięcie” z listy 20 najcieplejszych lat jedynego elementu sprzed lat 1980-tych (por. Tabela 1).

Ocieplenie nie jest równomierne – na wyraźną tendencję wzrostową temperatury nakładają się silne „wyskoki” – temperatura globalna w konkretnym roku układa się czasem nieco pod (jak w roku 1996), a czasem mocno nad (jak w roku 1998) linią trendu.

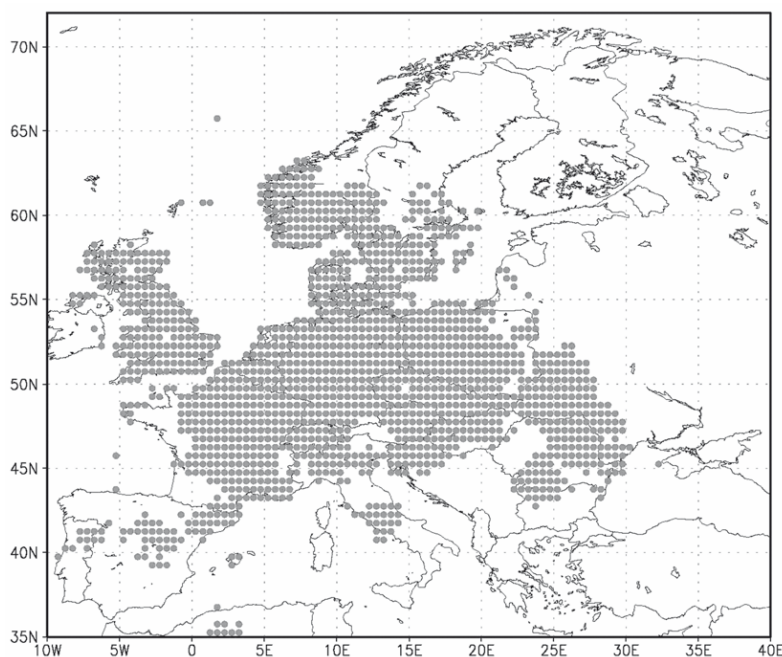
Faza cyklu ENSO (El Niño lub La Niña) jest jednym z ważnych czynników decydujących o wahaniami globalnego klimatu w skali czasowej miesięcy i lat. Podczas każdej z tych faz cyklu ENSO następuje intensywne wymiana ciepła między oceanem a atmosferą, a to wpływa na temperaturę w wielkich skalach przestrzennych (glob, półkula, kontynent), wyjaśniając znaczną część wahań klimatu. Innymi czynnikami wpływającymi na klimat są: promieniowanie słoneczne i parametry ruchu Ziemi, erupcje wulkaniczne, aerozole przemysłowe, i naturalna zmienność w oceanach (np. oscylacje dekadowe).

Klasyfikacja przedstawiona w Tabeli 1 nie jest definitywna. Amerykańska agencja NASA prowadzi też klasyfikację temperatury globalnej (zob. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp>). Również z niej wynika, że najcieplejsze osiem lat to, podobnie jak według Uniwersytetu Wschodniej Anglii, 1998 i 2001–2007. Jednak kolejność najcieplejszych lat według amerykańskiej agencji jest nieco inna. We-

ług NASA najcieplejszym globalnie rokiem na Ziemi był rok 2005, a 2007 i 1998 zajmują odpowiednio pozycję 2 i 3. Warto zauważyć, że w „czołówce” najcieplejszych lat różnice średniej temperatury są niewielkie, a obydwie instytucje ciągle pracują nad rozszerzeniem bazy danych o nowo pozyskane wyniki (modyfikując również wyniki dotyczące dawnych lat, dzięki pozyskaniu danych dla dalszych stacji).

Bardzo długi (prawie 350-letni) szereg czasowy wartości temperatury średniej rocznej pochodzi z Anglii, kraju o długotrwałych tradycjach obserwacji pogody i klimatu (zob. http://www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/CR_data/Daily/HadCET_act.txt). Temperatura środkowej Anglii wykazuje wyraźną tendencję zwyżkową. Przyjrzyjmy się częstości osiągnięcia lub przekroczenia średniej temperatury rocznej 10°C. Od 1659 r. do dziś wartość ta została osiągnięta lub przekroczona 44 razy, w tym aż 12 razy w ciągu 14 ostatnich lat, 1994–2007. Staje się to więc ostatnio raczej normą niż rzadkością. Dawniej było jednak zupełnie inaczej. W okresie 1659–1993 osiągnięcie (lub przekroczenie) poziomu 10°C było przeciętnie niemal 10 razy rzadsze niż w ostatnich 14 latach (KUNDZEWICZ 2008b).

Ciekawe wyniki uzyskujemy z analizy temperatur kolejnych 12 miesięcy, umożliwiającą bardziej wnikliwie spojrzenie na zmienność klimatu niż badanie wyłącznie lat kalendarzowych. Przyjmijmy więc jako wskaźnik temperaturę średnią kolejnych 12 miesięcy, a



Ryc. 3. Oczka siatki prostokątnej w Europie, w których wystąpiły rekordowe wartości temperatury średniej kolejnych 12 miesięcy (biorąc pod uwagę cały rozważany okres, 1901–2007) wystąpiły w 2006/7.

Zaznaczono tylko rekordy wyższe niż dwa odchylenia standardowe ponad średnią 1901–2007 (wg KUNDZEWICZA i współaut. 2008).

więc rocznego okresu rozpoczynającego się pierwszego dnia dowolnego miesiąca. Okazuje się, że natura pobiła, i to bardzo wyraźnie, takie rekordy w 2007 r., i to w kilku różnych skalach przestrzennych.

Na „Wiekowej” Stacji Meteorologicznej w Poczdamie, gdzie nieprzerwane obserwacje wielu zmiennych prowadzi się od 1893 r. (<http://www.klima-potsdam.de/>), rekordy temperatury kolejnych 12 miesięcy zostały poprawione w 2007 r. aż sześć razy po każdym miesiącu pierwszego półrocza, a temperatura średnia okresu 1 czerwca 2006–31 maja 2007 wynosiła aż o 1,39°C więcej niż rekordowa wartość dla najcieplejszego okresu 12 miesięcy sprzed 2007 (KUNDZEWICZ i współaut. 2007). Rekordowe temperatury kolejnych 12 miesięcy zostały osiągnięte również na wielu innych stacjach. Z analizy 25 długich szeregów czasowych obserwacji na stacjach niemieckich wynika, że wszędzie zostały ustanowione nowe rekordy temperatury średniej kolejnych 12 miesięcy (na ogół w okresie lipiec 2006–czerwiec 2007). W przypadku jednej stacji (Magdeburg), dotychczasowy rekord został przewyższony aż o 1,9°C. Okres od marca 2006 do czerwca 2007 r. okazał się wyjątkowo ciepły w znacznej części kontynentu europejskiego, a okres od czerwca 2006 do maja 2007 był najcieplejszy na całej Półkuli Północnej (KUNDZEWICZ i współaut. 2008).

Ocieplenie w okresie 1901–2005 jest istotne statystycznie (a więc bardziej przekonujące) na ok. 80% powierzchni Ziemi (włącznie z wodami). Są tylko nieliczne miejsca na świecie, gdzie w okresie 1901–2005 nie zaobserwowano statystycznie istotnego ocieplenia. Jednak brak statystycznie istotnego ocieplenia może oznaczać brak wystarczającej serii danych (z uwagi na brak gęstej sieci pomiarowej z długimi seriami obserwacji), brak wyraźnej tendencji, czy też ocieplenie zbyt słabe, żeby pozytywnie przejść rygory testu.

Trend globalnego ocieplenia tylko nieznacznie zależy od wpływu urbanizacji (KUNDZEWICZ i współaut. 2008). Istotnie, wiele stacji pomiarowych zostało wchłoniętych przez obszary miejskie, a więc podlega działaniu tzw. „miejskich wysp ciepłych”. Amerykańscy uczeni pokazali, że po odrzuceniu 16% w USA położonych na terenach zurbanizowanych (o liczbie mieszkańców ponad 30000), wynik detekcji trendu się niemal nie zmienił. Ocenia się, że globalnie niepewność związana z tym mechanizmem nie przekra-

cza 0,006°C na dekadę, a więc mniej niż 5% zaobserwowanego ocieplenia w ostatnich 50 latach.

Brak łatwego i bezpłatnego dostępu do wieloletnich szeregów czasowych obserwacji temperatury w Polsce nie sprzyja powszechnej świadomości i zrozumieniu ocieplenia i nie pozwala na łatwą weryfikację sensorycznych (a nieuzasadnionych) stwierdzeń o oziębieniu, które pojawiają się czasem w mediach (KUNDZEWICZ 2008b). Pożyteczne informacje o zmianach klimatu Polski znajdujemy w prowadzonej przez prof. Halinę Lorenc rubryce „Wiedza dla wszystkich – Klimatologia” w portalu internetowym Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) www.imgw.pl. Jest tam klasyfikacja termiczna miesięcy, ilustrująca odchylenia miesięcznych wartości temperatury od wartości średnich z wielolecia dla stacji Warszawa-Okęcie. Klasyfikacja ta wyraźnie pokazuje ocieplenie. Ostatnim miesiącem o temperaturze poniżej zakresu „normalnego” był marzec 2006 r. Od tego czasu zdarzyło się już aż 28 kolejnych miesięcy, z których żaden nie był zimniejszy od zakresu „normalnego”. Sześć z pierwszych siedmiu miesięcy roku 2008 było lekko ciepłych, ciepłych, lub bardzo ciepłych, a maj 2008 był w normie.

W kategorii lat kalendarzowych, najcieplejszy w Polsce był rok 2000, choć są stacje, gdzie w 2007 r. rekordy najwyższej temperatury były wyrównane (np. Warszawa, Poznań), a nawet pobite (np. Łeba). Natomiast w kategorii najcieplejszych okresów 12-miesięcznych natura poprawiła rekord (od lipca 2006 do czerwca 2007) w bardzo wielu odczkach siatki pokrywającej Polskę.

Świadczenie obserwacji wskazuje, że wiele systemów fizycznych i biologicznych podlega oddziaływaniu regionalnych zmian klimatu, a zwłaszcza wzrostu temperatury i wzrostu poziomu morza. Globalny wzrost poziomu morza w latach od 1993 do 2003 wynosił $3,1 \pm 0,7$ mm rok⁻¹, a wywołany był głównie przez rozszerzalność cieplną wody, a w nieco mniejszym stopniu przez topnienie lodów.

Zauważono też wpływ regionalnych zmian klimatu na systemy ludzkie, ale trudno go odróżnić z powodu istnienia adaptacji oraz czynników poza-klimatycznych. Uległy zmianie częstości i intensywności wystąpienia ekstremalnych zjawisk związanych z pogodą.

Wyraźnym świadectwem ocieplenia jest kurczenie się kriosfery. Wykryto szereg zmian systemów naturalnych, związanych

ze zmianami pokrywy śnieżnej, lodu i zmarzliny, z konsekwencjami dla ekosystemów i ludzi. Cofają się lodowce górskie. Nieliczne przypadki ekspansji elementów zmarzliny można tłumaczyć wzrostem opadów (tam, gdzie mimo wzrostu temperatura była ciągle ujemna, a wzrosły opady śniegu). Intensywne topnienie pokrywy lodowej na Oceanie Arktycznym już postępuje. We wrześniu 2007 r. zaobserwowano rekordowo mały zasięg mor-

skiego lodu w Arktyce (4,28 miliony km², a więc 39% poniżej średniej z okresu 1979-2000 i 23% poniżej poprzedniego rekordu, z września 2005 r.). Po raz pierwszy otworzyła się tzw. kanadyjska północno-zachodnia droga morska, na okres 5 tygodni. Odbyło się prawie 100 rejsów na trasie, na której żegluga nigdy nie była możliwa z powodu zlodzenia (WMO Press Release No. 805 z 13 grudnia 2007).

PROJEKCJE ZMIAN KLIMATU

Tendencja globalnego ocieplenia wydaje się przesadzona co najmniej przez kilkadziesiąt lat. Jeśli zdarzy się potężna erupcja wulkanu, może nastąpić krótkotrwałe (kilkuletnie) ochłodzenie, ale potem temperatura będzie rosła dalej. Stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze jest już bowiem wysokie, a, pomimo pewnych (mało skutecznych w skali światowej) prób ograniczenia emisji, nie widać końca wzrostu. Krótkotrwałe przewyższenia ponad krzywą trendu wzrostu temperatury mogą towarzyszyć wystąpieniu fazy El Niño, podczas gdy faza La Niña może być związana z przejściowym spadkiem temperatury poniżej krzywej trendu. Brytyjskie Biuro Meteorologii (Met Office) spodziewa się, że co najmniej połowa lat 2009-2015 będzie cieplejsza niż dotychczasowy, najcieplejszy globalnie rok 1998.

Według Czwartego Raportu IPCC (2007a), w ciągu najbliższych dwóch dziesięcioleci, oczekuje się ocieplenia rzędu 0,2°C na dekadę, a wpływ tego, który z różnych scenariuszy emisji gazów cieplarnianych się ziszczy, będzie nieznaczny w krótkiej skali czasowej. Dalsze ocieplenie będzie jednak zależało od skuteczności polityki ochrony klimatu.

Modele klimatu zgadzają się co do kierunku zmian temperatury (ale niekoniecznie co do wartości) do końca XXI w., przewidując wszędzie ocieplenie, choć nierównomierne (silniejsze w wysokich szerokościach geograficznych na półkuli północnej). Zakres ocieplenia globalnego w horyzoncie roku 2100 dla różnych scenariuszy rozwoju i emisji, ale bez uwzględnienia ochrony klimatu, mierzony przez zbiór "najlepszych wartości" (ocena ekspercka – pojedyncza liczba w oparciu o zbiór modeli) wynosi od 1,8 do 4,0°C w porównaniu z okresem 1980-1999.

Na koniec XXI w. przewiduje się wzrost poziomu morza o 18-59 cm powyżej pozio-

mu z lat 1980-1999, w zależności od scenariusza. W tej ocenie nie jest uwzględnione radykalne przyspieszenie topnienia lądolodów Grenlandii i Antarktydy, które zdaniem większości ekspertów jest mało prawdopodobne w XXI w. Niektórzy eksperci kwestionują jednak powyższe oceny, sugerując możliwość znacznie wyższego wzrostu poziomu mórz już za kilkadziesiąt lat.

Istnieją także liczne przesłanki do stwierdzenia, że w wielu regionach globu niektóre zjawiska ekstremalne związane z pogodą (tak krótko-, jak i długo-okresowe, np. fale upałów i susze, intensywne opady, powodzie i tropikalne cyklony) przybierają na sile i występują częściej.

Regionalne projekcje temperatury (CHRISTENSEN i współaut. 2007) wskazują znaczne, i postępujące w ciągu XXI w., ocieplenie Europy – zakres wzrostu temperatury średniej rocznej w latach 2080-2099 w porównaniu do 1980-1999 (dla 21 modeli) wynosi 2,3-5,3°C, przy wartości mediany ocieplenia 3,2°C. Projekcje ocieplenia odnoszą się do wszystkich pór roku, ale w zimie wzrost temperatury będzie najsilniejszy (mediana 4,3°C). Wartość mediany ocieplenia dla wiosny wynosi 3,1°C, dla lata 2,7°C, a dla jesieni 2,9°C.

Niektóre konsekwencje zmian klimatu są już nieuniknione, nawet przy małych poziomach dodatkowego ocieplenia. Do tej kategorii należą: blaknięcie koralów, zmiany zasięgu występowania gatunków, ryzyko suszy i braku wody na suchych obszarach tropikalnych, ryzyko pożarów lasów, szkody na wybrzeżach spowodowane wzrostem poziomu mórz.

Uznano (IPCC 2007b), że szczególnie wrażliwymi systemami i sektorami są:

- niektóre ekosystemy (lądowe: górskie i północne, np tundra; nadmorskie; oceaniczne, w tym rafy koralowe);
- nisko położone obszary nadmorskie;

- zasoby wodne w suchych obszarach zwrotnikowych i podzwrotnikowych (np. basen Morza Śródziemnego) z powodu zmniejszających się opadów i wzrostu parowania w cieplejszym klimacie;
- rolnictwo na obszarach o niskich szerokościach geograficznych, z powodu gorąca i braku wody;
- zdrowie ludzkie na obszarach o niskiej zdolności do adaptacji.

Szczególne wrażliwymi regionami (IPCC 2007b), są: Arktyka (wpływ silnego ocieplenia na systemy naturalne i ludzkie), Afryka (niska zdolność do adaptacji i prognozowane niekorzystne zmiany klimatu), małe wyspy (ekspozycja ludności i infrastruktury; wrażliwość na wzrost poziomu morza i powodzie sztormowe) oraz megadelty w Azji i Afryce (wielkie populacje ludzkie, wzrost poziomu morza, i powodzie rzeczne).

PRZECIWDZIAŁANIE GLOBALNEMU OCIEPLENIU

Wielu niekorzystnych konsekwencji można uniknąć, osłabić je, czy też opóźnić poprzez prowadzenie skutecznej polityki zapobiegania zmianom klimatu. Jeśli ocieplenia nie uda się ograniczyć, adaptacja do niekorzystnych skutków zmian klimatu może być bardzo trudna.

Przyjmując, podczas tzw. Szczytu Ziemi w Rio de Janeiro w 1992 r., Ramową Konwencję Narodów Zjednoczonych dotyczącą Zmian Klimatu (UNFCCC) (UNITED NATIONS 1992), przywódcy państw zgodzili się, że trzeba podjąć wysiłki w celu uniknięcia „niebezpiecznego poziomu antropogenicznego wpływu na klimat” (Artykuł 2 Konwencji). Potrzebna jest więc stabilizacja stężeń gazów cieplarnianych na takim poziomie i w takim horyzoncie czasowym, żeby można było osiągnąć powyższy cel. Kryteria Artykułu 2, specyfikujące ryzyko niebezpiecznego poziomu antropogenicznego wpływu na klimat, dotyczą przede wszystkim globalnego bezpieczeństwa żywnościowego, ochrony systemów unikalnych i zagrożonych (w tym ekosystemów), zrównoważonego rozwoju gospodarczego oraz ochrony przed zjawiskami ekstremalnymi.

Ważnym elementem rzutującym na implementację artykułu 2 Konwencji jest znaczna niepewność w ocenie ryzyka i konsekwencji zmian klimatu oraz w ocenie skuteczności i kosztów działań, jakie można by podjąć. Należy rozważyć łącznie przeciwdziałanie zmianom klimatu i adaptację do ich skutków, w oparciu o ocenę kosztów i zysków, z uwzględnieniem ryzyka mało prawdopodobnych zdarzeń o ogromnym potencjale strat (np. całkowite roztopienie się lodów Grenlandii, czy radykalne osłabienie Prądu Zatokowego).

Ramowa Konwencja, przyjęta w marcu 1994 r. i ratyfikowana przez prawie wszyst-

kie państwa członkowskie ONZ, stanowi podstawę międzynarodowych działań w celu ograniczenia zmian klimatu. Protokół z Kioto (UNITED NATIONS 1998), który formułuje narzędzia implementacji Konwencji, został wprowadzony w życie w lutym 2005 r. Zgodnie z artykułem 3.1 Protokołu z Kioto, kraje Aneksu I (a więc kraje rozwinięte i kraje transformujące gospodarkę) zgodziły się zredukować emisje gazów cieplarnianych o co najmniej 5% poniżej poziomu z roku bazowego (na ogół 1990 r.). Wejście w życie Protokołu z Kioto stanowi pierwszy, choć skromny, krok w kierunku ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Protokół z Kioto ma jednak raczej symboliczne znaczenie. Jego siłą jest uzyskanie szerokiego, niemal globalnego porozumienia dotyczącego potrzeby zapobiegania ociepleniu, a także budowa mechanizmów rynkowych. Jednak nawet rzetelne wypełnienie postanowień Protokołu z Kioto przez wszystkich sygnatariuszy nie wystarczy do rozwiązania problemu globalnego ocieplenia, w kontekście silnie rosnących trendów emisji gazów cieplarnianych na świecie. Słabością Protokołu jest jednak brak ratyfikacji przez niektóre kraje odpowiedzialne za wielkie emisje, a przede wszystkim USA, a także fakt, że kraje na drodze rozwoju, jak Chiny i Indie, które emitują obecnie ogromne i szybko rosnące ilości gazów cieplarnianych, w ogóle nie są ujęte programem redukcji emisji gazów cieplarnianych przewidywanym przez Protokół z Kioto. Ideą Protokołu jest podkreślenie przewodniej roli państw rozwiniętych, które w dominującym stopniu są odpowiedzialne za wzrost atmosferycznych stężeń gazów cieplarnianych, globalne ocieplenie i efekty towarzyszące. Kraje te zobowiązały się do podjęcia konkretnych i kosztownych kroków, dając przykład innym krajom. Kolejna próba osiągnięcia globalnego

(i konkretnego) porozumienia, zastępującego Protokół z Kioto zostanie podjęta na COP 14 (Conference of Parties – Konferencja Stron Konwencji Klimatycznej) w grudniu 2008 r. w Poznaniu, a następną okazją będzie COP 15 w Kopenhadze.

Mimo wejścia w życie Protokołu z Kioto, globalne emisje gazów cieplarnianych dalej rosną. Wzrosły o ok. 70% (z 28,7 do 49,0 GtCO₂-eq) między 1970 a 2004 (aż o 24% z 1990 do 2004), przy czym stężenie CO₂ (główny gaz cieplarniany) wzrosło o ok. 80%. W 2004 r. na globalny efekt cieplarniany składały się: w 26% emisje gazów cieplarnianych w sektorze energetycznym, w 19% przemysł, w 17% wylesianie, w 14% rolnictwo, w 13% transport, w 8% osadnictwo oraz sektor handlu i usług, a w 3% gospodarka odpadami. Kontrast między regionem o najwyższych i najniższych emisjach, tzn. między Ameryką Północną i południową Azją jest bardzo silny. Ameryka Północna jest zamieszkiwana przez zaledwie 5% ludności świata, a emituje aż 19,4% gazów cieplarnianych, podczas gdy na południową Azję przypada aż 30,3% ludności świata, a tylko 13,1% globalnej emisji.

Kosztów zapobiegania ociepleniu nie da się uniknąć. Ale ekonomiści oceniają, że koszty zlekceważenia problemu będą wyższe niż koszty przeciwdziałania globalnemu ociepleniu. Koszty silnie zależą od zamierzonego poziomu stabilizacji dwutlenku węgla w atmosferze. Z obszernego studium podjętego w Wielkiej Brytanii (STERN 2007) wynika, że roczne straty spowodowane zmianami klimatu wzrosną w XXI w. do przynajmniej 5% światowego produktu, a przy uwzględnieniu szerszego wachlarza skutków i mniej prawdopodobnych wariantów – nawet do 20% i więcej. Natomiast koszt redukcji gazów cieplarnianych (nie pozwalającej na wzrost stężeń ponad 450–550 ppm CO₂-eq), tzn. umożliwiającej uniknięcie najgorszych skutków zmian klimatu, wyniesie ok. 1% światowego produktu. Znaczna redukcja emisji winna nastąpić w ciągu najbliższych 10–20 lat. Jeśli tak się nie stanie, późniejsza redukcja musiałaby być znacznie ostrzejsza, a więc bardziej kosztowna.

Ambitnym (acz mało realnym) celem w zakresie przeciwdziałania globalnemu ociepleniu przyjętym przez Unię Europejską jest ograniczenie ocieplenia do co najwyżej 2°C, w horyzoncie roku 2100, w porównaniu z okresem przed-przemysłowym (czyli o co najwyżej 1,5°C, w porównaniu z okresem 1980–1999). Aby to osiągnąć, potrzeba znacz-

nego globalnego ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (atmosferyczne stężenie nie powinno przekroczyć 450 ppm CO₂-eq.), a to byłoby bardzo trudne i drogie. Obecnie stężenie (po wygładzeniu wahań sezonowych) sięga 383 ppm (por. rys. 1 c) i szybko rośnie. Unia Europejska forsuje koncepcję 3x20, tzn. do roku 2020 redukcję emisji gazów cieplarnianych o przynajmniej 20% (w porównaniu do roku 1990) oraz uzyskanie co najmniej 20% energii w oparciu o źródła odnawialne. W razie, gdyby możliwe było uzyskanie globalnego porozumienia, Europa jest gotowa zredukować emisje o 30% do 2020. Unia Europejska nawołuje także do globalnej redukcji emisji globalnej o 50% do 2050.

Unia Europejska przoduje w inicjatywach podejmowanych na rzecz przeciwdziałania zmianom klimatu. W porównaniu z innymi kontynentami Europa ma mało paliw kopalnych, a jej mieszkańcy żyją na ogół we (względny) dostatku i bezpieczeństwie i bardzo cenią ten stan. Niekorzystne zmiany klimatu, w tym wzrost dolegliwości ekstremów klimatycznych, są niemiłą perspektywą, którą Europejczycy chcieliby odsunąć. Poza tym, właśnie w Europie powszechne jest przyjęcie strategii trwałego i zrównoważonego rozwoju – myśl o dalszej przyszłości. Mówi się, że odziedziczyliśmy środowisko od pokolenia naszych rodziców, ale można też spojrzeć inaczej – „wypożyczamy” je od pokolenia naszych dzieci czy wnuków.

Nie ulega wątpliwości, że potrzeba podjąć skoordynowane i globalne działanie w kierunku powstrzymania intensyfikacji efektu cieplarnianego spowodowanego wzrostem spalania węgla, ropy, i gazu, a także wylesieniem.

Poprawa efektywności użycia energii jest najtańszą formą zapobiegania ociepleniu. Ale potrzeba znacznie więcej: „odwęglenia” energii, tzn. stosowania takich źródeł energii, które nie powodują emisji gazów cieplarnianych, i wzmocnienia procesów „łapania” węgla, np. przez roślinność, czy technologie CCS (ang. carbon capture and storage – wylapywanie i magazynowanie węgla). Potrzebna jest gospodarka energo-oszczędna, z dywersyfikacją źródeł energii i coraz większym udziałem odnawialnych źródeł (elektrownie wodne, wiatrowe, pompy ciepłe). Trwają prace nad udoskonaleniem magazynowania energii słonecznej, a energetyka jądrowa jest poważnie rozważana. Zasadniczą kwestią jest budownictwo, a szczególnie oszczędność energetyczna budynków. Transport rośnie

wraz z gospodarką, zwłaszcza w krajach rozwijających się, gdzie globalizacja powiększa strumienie handlu, a rosnące dochody jednostek powiększają potrzebę korzystania z samochodu. Poprawa efektywności energetycznej samochodów jest więc ważnym elementem ochrony klimatu.

Do skutecznego ograniczenia zmian klimatu potrzebne są światowe uzgodnienia dotyczące ram ograniczeń (idące znacznie dalej niż Protokół z Kioto), a następnie działania na poziomie krajów (o charakterze fiskalnym, legislacyjnym, i technicznym), które pozwolą na realizację ustaleń. To wielkie wyzwanie, ponieważ jeszcze nigdy nie osiągnięto powszechnego porozumienia w kwestii, która pociąga istotne koszty. Dlatego nie ma gwarancji, że uda się pohamować światową „gorączkę” i symptomy towarzyszące.

Oprócz działań na poziomie międzynarodowym czy krajowym, potrzebne są działania masowe (np. oszczędność energii użytej na ogrzewanie i klimatyzację mieszkań, czy np. szersze korzystanie z rowerów), które może i powinien podejmować każdy. Bardzo istotne jest spojrzenie na problem ocieplenia w szerszym kontekście – harmonii ze środowiskiem. Działania w małej skali nie powstrzymają zmian klimatu, ale wzmocnią świadomość i akceptację działań w większej skali.

Odpowiednio przemyślane działania zapobiegające zmianom klimatu i przeciwdzia-

łające niekorzystnym skutkom (adaptacja do zmian klimatu) powinny być integralną częścią trwałego i zrównoważonego rozwoju i wzmacniać się wzajemnie. Istnieje szereg powodów (nie tylko zmiany klimatu), dla których warto oszczędzać energię, wodę, i surowce. Ograniczenie zużycia surowców energetycznych jest korzystne dla trwałego rozwoju (więcej surowców zostanie dla przyszłych pokoleń), dla ogólnej ochrony środowiska (np. uciążliwość kopalni odkrywkowych), dla czystości powietrza (emisje pyłów i SO₂), poprawy zdrowotności (zmniejszenie zachorowalności wskutek zanieczyszczenia powietrza, spadek ilości wypadków w górnictwie). Z szeregu względów warto dbać o dobry transport publiczny. Bardzo potrzebna jest poprawa izolacji domów, ograniczająca koszty ogrzewania (w tym pośredni koszt związany ze wzmocnieniem efektu cieplarnianego).

W niektórych przypadkach, środek korzystny dla ochrony klimatu nie jest korzystny z punktu widzenia adaptacji do zmian klimatu, i na odwrót. Wraz z globalnym ociepleniem przybliży się perspektywa spędzania lata w klimatyzowanym domu i w klimatyzowanym miejscu pracy. Klimatyzacja (opcja adaptacji) wymaga jednak użycia znacznych ilości energii, a więc „nakreca” efekt cieplarniany, wzmacniając ocieplenie.

UWAGI KOŃCOWE

Ocieplenie klimatu w ostatnim 50-leciu nie ulega wątpliwości, a wytłumaczyć je można przede wszystkim wywołanym przez ludzi wzrostem emisji gazów cieplarnianych i redukcją zdolności wiązania węgla przez roślinność, wskutek wylesienia. W efekcie rośnie stężenie atmosferyczne gazów cieplarnianych, które powoduje intensyfikację efektu cieplarnianego.

Odsetek polskiego społeczeństwa przekonany o globalnym ociepleniu jest jednak niższy niż np. w Europie zachodniej, mimo że wzrost temperatury w naszym kraju nie ulega wątpliwości. Potrzebna jest poprawa naszej świadomości zmian klimatu i ich skutków.

Projekcje na przyszłość przewidują dalsze, jeszcze bardziej intensywne, ocieplenie. Można je jednak ograniczyć przez skuteczne i zharmonizowane działania w skali globalnej. Rozmiar dalszego ocieplenia zależy od

tego, jaki scenariusz rozwoju społeczno-ekonomicznego i polityki przeciwdziałania ociepleniu zostanie zrealizowany. Jeśli globalne emisje gazów cieplarnianych będą dalej rosły w sposób niekontrolowany, ocieplenie może przybrać niebezpieczny rozmiar. Oprócz temperatury zmieniają się wszystkie elementy sprzężonych systemów klimatu i zasobów wodnych, a w konsekwencji także wiele systemów fizycznych, biologicznych i ludzkich. Konsekwencje globalnych zmian klimatu, zarówno korzystne, jak i (częściej) negatywne, można dostrzec i spodziewać się ich w przyszłości we wszystkich regionach świata i we wszystkich sektorach i systemach. Jednak zaistnienie i ostrość zmian klimatu zależy od tempa intensyfikacji efektu cieplarnianego, która jest wynikiem wzrostu stężenia dwutlenku węgla, metanu i podtlenku azotu w atmosferze. Z kolei, stężenie gazów cie-

plarnianych zależy od scenariusza rozwoju społeczno-ekonomicznego, który ma wpływ na emisję, oraz od realizowanej polityki przeciwdziałania zmianom klimatu.

Wykorzystano materiały zebrane podczas współpracy autora z IPCC oraz w następu-

jących projektach: „Ekstremalne zjawiska meteorologiczne i hydrologiczne w Polsce” (Projekt zamawiany, PBZ-KBN-086/P04/2003) oraz projekty zintegrowane Szóstego Programu Ramowego Unii Europejskiej: ENSEMBLES i ADAM.

INTRODUCTION TO GLOBAL WARMING

Summary

Global warming, and accompanying processes, such as sea level rise and shrinking of cryosphere, in the last 50 years have been unequivocal. Most of it is very likely have been caused by anthropogenic factors, such as increase of atmospheric concentration of greenhouse gases and deforestation, leading to intensification of the greenhouse effect. Illustration in the process of increase in atmospheric carbon dioxide concentration and increase of temperature, based on observational evidence, is presented. Since emissions of greenhouse gases continue to

rise, we are committed to further warming in the future. The rate of the future warming depends on the path of socio-economic development and the effectiveness of global mitigation policies. Business-as-usual would lead to a large warming – in 2100 the mean annual temperature can be by 1,8-2,4°C higher than the average for 1980-1999. Climate change impacts can be tempered – avoided, reduced, or delayed if an effective global climate change mitigation policy is agreed upon and implemented.

LITERATURA

- BROHAN P., KENNEDY J. J., HARRIS I., TETT S. F. B., JONES P. D., 2006. *Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850*. J. Geophys. Res. 111, D12106 DOI:10.1029/2005JD006548
- CHRISTENSEN J. H., HEWITSON B., BUSUIOC A., CHEN A., GAO X., HELD I., JONES R., KOLLI R. K., KWON W.-T., LAPRISE R., MAGAÑA RUEDA V., MEARN S. L., MENÉNDEZ C. G., RÄISÄNEN J., RINKE A., SARR A., WHETTON P., 2007. *Regional Climate Projections*. [W:] *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K. B., TIGNOR M., MILLER H. L. (red.). Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007a. *Summary for Policymakers*. [W:] *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K. B., TIGNOR M., MILLER H. L. (red.). Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007b. *Summary for Policymakers*. [W:] *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. PARRY M. L., CANZIANI O. F., PALUTIKOF J. P., VAN DER LINDEN P. J., HANSON C. E. (red.). Cambridge University Press, Cambridge and New York, NY.
- KUNDZEWICZ Z. W., 2008a. *Konsekwencje globalnych zmian klimatu*. Nauka 1, 103–118.
- KUNDZEWICZ Z. W., 2008b. *Rekordowe dwanaście miesięcy*. Wiedza i Życie 08, 46–49.
- KUNDZEWICZ Z. W., JÓZEFczyk D., ÖSTERLE H., 2007. *Warmest 12 consecutive months on record at the Potsdam meteorological station, Germany*. Weather 62, 284–286.
- KUNDZEWICZ Z. W., GERSTENGARBE F.-W., ÖSTERLE H., WERNER P. C., FRICKE W., 2008. *Recent anomalies of mean temperature of 12 consecutive months – Germany, Europe, Northern Hemisphere*. Theor. Appl. Climatol. DOI: 10.1007/s00704-008-0013-9.
- STERN N., 2007. *The Economics of Climate Change (The Stern Review)*. Cambridge University Press, Cambridge, www.sternreview.org.uk.
- UNITED NATIONS, 1992. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.
- UNITED NATIONS, 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.