

ZBIGNIEW W. KUNDZEWICZ *

Konsekwencje globalnych zmian klimatu **

Wstęp

Klimat naszej planety ociepla się przede wszystkim z powodu wywołanego przez ludzi wzrostu stężenia atmosferycznego gazów cieplarnianych, które powoduje intensyfikację efektu cieplarnianego. Projekcje na przyszłość przewidują dalsze, jeszcze bardziej intensywne, ocieplenie, które można jednak ograniczyć przez skuteczne i zharmonizowane działania w skali globalnej. Globalne ocieplenie powoduje zmiany wszystkich elementów systemów klimatu i zasobów wodnych. Konsekwencje – zarówno korzystne, jak i (częściej) negatywne można dostrzec, i spodziewać się ich w przyszłości, we wszystkich regionach świata oraz we wszystkich sektorach i systemach. Jednak ich zaistnienie i ostrość zależy od scenariusza rozwoju społeczno-ekonomicznego, który ma wpływ na emisje, oraz od realizowanej polityki przeciwdziałania zmianom klimatu.

ZMIANY GLOBALNE KLIMATU – OBSERWACJE I SCENARIUSZE

Świadectwo ocieplenia w skali globalnej

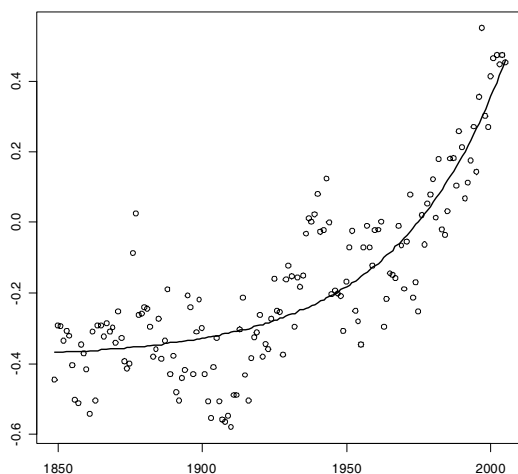
Można wskazać coraz więcej argumentów na poparcie hipotezy, że ziemski klimat ociepla się wskutek działań człowieka. Zaobserwowano wyraźny wzrost atmosferycznego stężenia gazów cieplarnianych. Rosną emisje i atmosferyczne stężenie dwutlenku węgla (wskutek wzrostu spalania węgla, ropy i gazu, a także redukcji możliwości sekwestracji węgla przez roślinność, towarzyszącej wylesieniu), metanu (produkcja ryżu, hodowla, topnienie zmarzliny) i podtlenku azotu (rolnictwo). Nastąpiła intensyfikacja efektu cieplarnianego. Każdy kolejny rok wpisuje się w obraz cieplejszego świata, a brak jest alternatywnego sposobu poważnego wyjaśnienia przyczyn wzrostu temperatury. Oprócz temperatury zmieniają się wszystkie elementy sprzężonych systemów klimatu i zasobów wodnych, a w konsekwencji – także wiele systemów fizycznych, biologicznych i ludzkich. Ponieważ szereg skutków zmian klimatu budzi ogólny niepokój, problematyka ta zainteresowała wielu ludzi. Zmiany klimatu stały się jednym z zasadni-

* Prof. dr hab. Zbigniew W. Kundzewicz, Zakład Badań Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN, Poznań.

** Niniejsze opracowanie jest rozwinięciem tez przedstawionych na sesji naukowej *Globalne zmiany klimatyczne* podczas 109. Sesji Zgromadzenia Ogólnego PAN w Warszawie, 13 grudnia 2007.

czych zagrożeń diskutowanych przez światowych przywódców obradujących na szczycie państw G8 w Heiligendamm, w Niemczech w czerwcu 2007. Strategiczne i globalne znaczenie zmian klimatu i ich konsekwencji ilustruje fakt przyznania Pokojowej Nagrody Nobla 2007 Międzyrządowej Komisji ds. Zmian Klimatu (IPCC), wspólnie z byłym wiceprezydentem USA – Alem Gore’em.

W lutym, kwietniu i maju 2007 przyjęto raporty trzech grup roboczych IPCC zawierające ocenę bieżącego stanu wiedzy o zmianach klimatu, ich konsekwencjach oraz możliwościach adaptacji i przeciwdziałania (IPCC, 2007a, b, c). Retoryka IPCC uległa ewolucji od czasów pierwszego raportu o zmianach klimatu, opublikowanego w 1990, w którym można było przeczytać o „niewielkim świadectwie odróżnialnego wpływu człowieka na klimat”. W drugim raporcie IPCC, wydanym w 1996, była już mowa o „odróżnialnym wpływie człowieka”. Trzeci raport, wydany w 2001, przyniósł znacznie mocniejsze stwierdzenie: „Większość zaobserwowanego ocieplenia w ostatnim 50-leciu jest prawdopodobnie 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 spowodowana wywołanym przez człowieka wzrostem stężenia gazów cieplarnianych”. Terminy „prawdopodobnie” (w roku 2001) i „bardzo prawdopodobnie” (w roku 2007), użyte w kontekście raportów IPCC, mają ściśle określone znaczenie, odpowiednio – prawdopodobieństwo ponad 66% (2001) i ponad 90% (2007).



Ryc. 1. Dopasowanie funkcji wykładniczej (linia ciągła) do szeregu czasowego globalnej temperatury (puste kółka). Oś x – czas (lata): oś y – globalne anomalie temperatury, tzn. odchylenia od średniej z lat 1961-1990 (według Kundzewicz i in., 2008a).

Uniwersytet Wschodniej Anglii w Norwich we współpracy z Centrum Hadleya Brytyjskiego Biura Meteorologicznego (zob. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>) gromadzi i udostępnia do publicznej wiadomości dane dotyczące średniej temperatury globalnej. Okazuje się, że spośród 13 najcieplejszych lat w historii globalnych obserwacji temperatury, prowadzonych od 1850, aż 12 lat należy do współczesnego okresu

1995-2007 (por. ryc. 1). Tylko jeden rok (1996) spośród ostatnich 13 lat nie zmieścił się na liście 13 najcieplejszych globalnie lat w historii obserwacji (zajął miejsce 19. a więc też był znacznie cieplejszy niż średnia z wielolecia). O ile rok 1998 jest na czele listy przede wszystkim w efekcie rekordowo silnej ciepłej fazy cyklu ENSO, tzn El Niño w 1997-98, o tyle ostatnich 7 lat należy do ośmiu najcieplejszych globalnie w historii obserwacji, niezależnie od tego, w jakiej fazie jest cykl ENSO (ciepłe El Niño czy chłodna La Niña), ponieważ w atmosferze nagromadziło się już bardzo dużo (i gromadzi coraz więcej) gazów cieplarnianych i to odgrywa decydującą rolę. Jeśli zdarzy się ponowne wystąpienie silnego El Niño (np. na poziomie z lat 1997-98) o odpowiednio długim czasie trwania, można oczekiwać nowego rekordu najwyższej globalnej temperatury średniej roku kalendarzowego.

Rekordy średniej temperatury kolejnych 12 miesięcy na terenie Europy

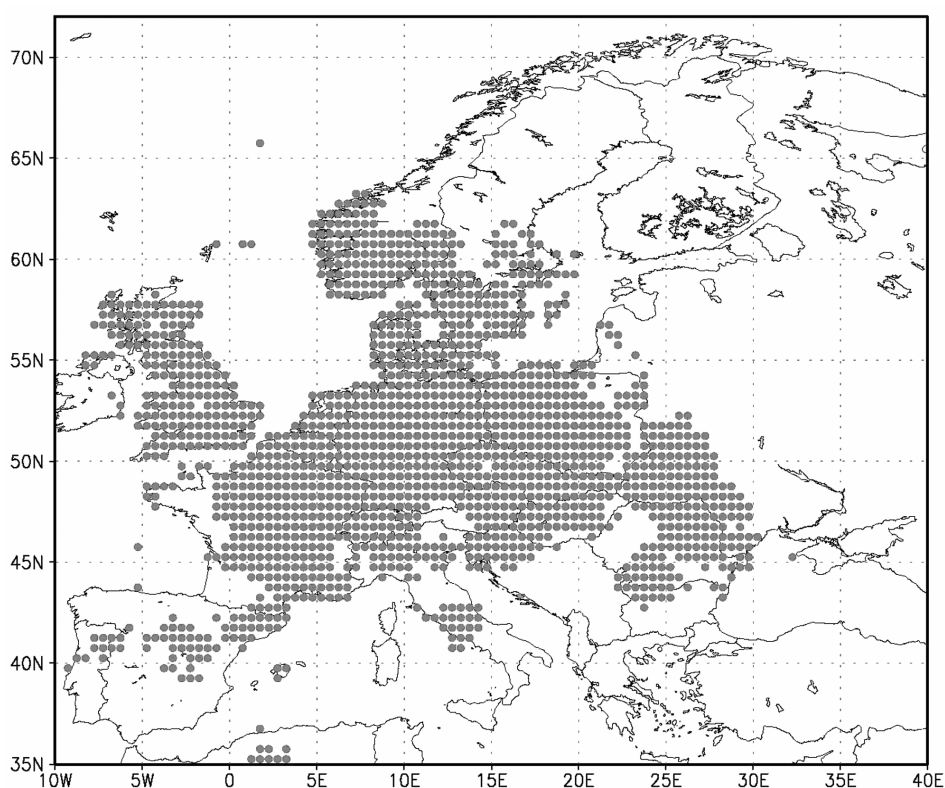
Rok 2007 nie stał się globalnie najcieplejszym w historii rokiem kalendarzowym, ponieważ ciepła faza El Niño (o umiarkowanej amplitudzie i czasie trwania) z drugiej połowy 2006 ustąpiła już w pierwszych miesiącach roku 2007, a potem na tropikalnym Pacyfiku zapanowały warunki typu La Niña. Istotnie, faza cyklu ENSO (El Niño lub La Niña) jest jednym z ważnych czynników decydujących o wahaniach globalnego klimatu w skali czasowej miesięcy i lat. Podczas każdej z tych faz cyklu ENSO następuje intensywna 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).

Jeśli jednak przyjąć jako wskaźnik temperaturę średnią kolejnych 12 miesięcy, a więc okresu rozpoczynającego się pierwszego dnia dowolnego miesiąca, to taki rekord został pobity w roku 2007, i to w kilku skalach przestrzennych. Takie podejście jest bardziej elastyczne i pozwala lepiej wyczuć wpływ oscylacji (ENSO) w systemie ocean-atmosfera na średnią temperaturę niż analiza lat kalendarzowych.

„Wiekowa” stacja meteorologiczna w Poczdamie nieprzerwanie od roku 1893 prowadzi obserwacje wielu zmiennych, które udostępnia w internecie wszystkim chętnym (<http://www.klima-potsdam.de/>). Do niedawna najcieplejszym 12-miesięcznym okresem na poczdamskiej stacji w historii obserwacji był okres od 1 lipca 1999 do 30 czerwca 2000, kiedy średnia temperatura wynosiła 10,70 °C. W pierwszym półroczu roku 2007 natura poprawiła ten rekord aż sześć razy, kolejno – od stycznia do czerwca, do poziomu: 10,83, 11,16, 11,64, 11,91, 12,05 i 12,9°C. Temperatura średnia okresu od 1 czerwca 2006 do 31 maja 2007 wynosiła więc aż o 1,35°C więcej niż rekordowa wartość sprzed 2007 (Kundzewicz i in., 2007). Rekordowe temperatury kolejnych 12 mie-

sięcy zostały osiągnięte również na innych wielu stacjach w całych Niemczech. Okres od marca 2006 do czerwca 2007 okazał się wyjątkowo ciepły w znacznej części kontynentu europejskiego (ryc. 2), a okres od czerwca 2006 do maja 2007 – najcieplejszy na całej półkuli północnej (Kundzewicz i in., 2008).

Z analizy 25 długich szeregów czasowych obserwacji na stacjach niemieckich wynika, że wszędzie zostały ustanowione nowe rekordy temperatury średniej kolejnych 12 miesięcy. W przypadku jednej stacji (Magdeburg), dotychczasowy rekord został przewyższony aż o $1,9^{\circ}\text{C}$.



Ryc. 2. 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, wyższe niż dwa odchylenia standardowe ponad średnią 1901-2007 (według Kundzewicz i in., 2008)

Globalne projekcje zmian klimatu

Tendencja globalnego ocieplenia wydaje się przesądzona co najmniej przez kilkadziesiąt lat. Jeśli zdarzy się potężna erupcja wulkanu, może nastąpić krótkotrwałe (do kilku lat) ochłodzenie, ale potem temperatura będzie dalej rosła. Stężenie gazów cie-

plarnianych w atmosferze jest już bowiem wysokie, a – pomimo pewnych (mało skutecznych w skali światowej) prób ograniczenia emisji – nie widać końca wzrostu. Krótkotrwałe przewyższenia ponadkrzywą trendu wzrostu temperatury mogą towarzyszyć wystąpieniu fazy El Niño, podczas gdy faza La Niña może być związana z przejściowym spadkiem temperatury poniżej krzywej trendu.

Według Czwartego Raportu IPCC (2007a), w ciągu najbliższych dwóch dziesięcioleci oczekuje się ocieplenia rzędu $0,2^{\circ}\text{C}$ 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. Zakres ocieplenia 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) odpowiadających scenariuszom wynosi od $1,8$ do $4,0^{\circ}\text{C}$ w porównaniu z okresem 1980-1999 (czyli od 2 do $4,5^{\circ}\text{C}$ w porównaniu z okresem przedprzemysłowym), zob. Tabela 1.

Tabela 1. „Najlepsze wartości” i prawdopodobne zakresy zmian globalnej temperatury średniej w horyzoncie 2090-99 w odniesieniu do okresu kontrolnego 1980-99, bez implementacji polityki przeciwdziałania zmianom klimatu (źródło: IPCC, 2007a)

Nazwa scenariusza SRES	„Najlepsze wartości” [$^{\circ}\text{C}$]	Prawdopodobne zakresy [$^{\circ}\text{C}$]
B1	1,8	1,1 - 2,9
A1T	2,4	1,4 - 3,8
B2	2,4	1,4 - 3,8
A1B	2,8	1,7 - 4,4
A2	3,4	2,0 - 5,4
A1FI	4,0	2,4 - 6,4

Jeśli jednak chodzi o opad i zmienne zależne od opadu, to projekcje uzyskane za pomocą różnych modeli klimatycznych są obciążone znacznie większą dozą niepewności niż projekcje temperatury. W wysokich szerokościach geograficznych i w części tropików modele klimatyczne zgodnie symulują kierunek zmian, przewidując wzrost opadu. W niektórych obszarach podzwrotnikowych i obszarach o średnich szerokościach (np. basen Morza Śródziemnego), modele klimatyczne pokazują identyczny kierunek zmian, przewidując spadek opadu. Między tymi strefami zgodnego wzrostu i zgodnego spadku leżą obszary o znacznej niepewności projekcji, dla których symulacje z użyciem różnych modeli klimatycznych nie są zgodne co do kierunku zmian.

Projekcje zmian przepływu rzecznoego w dużej mierze odpowiadają projekcjom opadów z wyraźnymi równoleżnikowymi pasami wzrostu lub redukcji przepływów i znacz-

nymi obszarami niezgodności modeli. Analizy średniego rocznego przepływu nie odzwierciedlają jednak wahań sezonowych, które mogą być bardzo duże.

Globalny wzrost poziomu morza w latach od 1993 do 2003 wyniósł $3,1 \pm 0,7$ mm rocznie, a wywołany był głównie przez rozszerzalność cieplną wody, a w nieco mniejszym stopniu przez topnienie lodów. Na koniec XXI wieku przewiduje się wzrost poziomu morza o 18-59 cm powyżej poziomu 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 wieku. Niektórzy eksperci kwestionują jednak powyższe oceny, sugerując znacznie wyższy wzrost poziomu mórz już za kilkadziesiąt lat.

Istnieją także liczne przesłanki do stwierdzenia, że w wielu regionach globu niektóre ekstrema związane z pogodą (tak krótko- jak i długookresowe, np. fale upałów i susze, intensywne opady, powodzie i tropikalne cyklony) stają się bardziej ekstremalne.

Regionalne projekcje zmian klimatu

Regionalne projekcje temperatury (Christensen i in., 2007) wskazują znaczne i postępujące w ciągu XXI w. ocieplenie dla całej Europy. Dla części Europy ograniczonej współrzędnymi: (48N, 10W); (48N, 40E); (75N, 10W); (75N, 40E), 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 dotyczą 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.

Dla części Europy ograniczonej współrzędnymi: (48N, 10W); (48N, 40E); (75N, 10W); (75N, 40E), zakres projekcji wzrostu rocznego opadu w latach 2080-2099, w porównaniu do 1980-1999 (dla 21 modeli), wynosi od 0% do +16%, przy wartości mediany 9%. Rozkład sezonowy zmian nie jest równomierny – opady zimowe rosną najsilniej (mediana +15%), podczas gdy wartości mediany dla wiosny i jesieni wynoszą odpowiednio +12% i +8%. Jednak projekcje opadu letniego (w okresie od czerwca do sierpnia) i zmiennych zależnych od opadu, uzyskane za pomocą różnych modeli klimatycznych, nie zgadzają się nawet w kwestii kierunku zmian. Wartość mediany wynosi wprawdzie +2%, ale niektóre modele przewidują wzrost opadów letnich, a inne przewidują spadek.

Dla znacznej części Europy projekcje zmian opadu średniego w lecie różnią się co do kierunku od projekcji zmian maksymalnego opadu 24-godzinnego. Projekcje wskazują możliwość wzrostu opadów intensywnych nawet tam, gdzie maleje opad całkowity.

KONSEKWENCJE ZMIAN KLIMATU – OBSERWACJE I PROJEKCJE

Świadectwo obserwacji ze wszystkich kontynentów i większości oceanów wskazuje, że wiele systemów fizycznych i biologicznych podlega oddziaływaniu regionalnych zmian klimatu, a zwłaszcza wzrostu temperatury i wzrostu poziomu morza. Zauważono też wpływ regionalnych zmian klimatu na systemy ludzkie, ale trudno go odróżnić z powodu istnienia adaptacji oraz czynników pozaklimatycznych. 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). Topienie pokrywy lodowej na Oceanie Arktycznym już postępuje. We wrześniu 2007 zaobserwowano rekordowo mały zasięg morskiego lodu w Arktyce (4,28 mln km², a więc 39% poniżej średniej z okresu 1979-2000. Po raz pierwszy otworzyła się (na 5 tygodni) kanadyjska północno-zachodnia droga morska.

W wielu rzekach zasilanych z lodowców i z topniejącego śniegu przepływ wiosenny jest wyższy i wcześniej osiąga wartość maksymalną. Kurczenie się lodowców i pokrywy śnieżnej spowoduje pogłębienie się nizin (niskich przepływów w rzekach) oraz problemów w zaopatrzeniu w wodę mieszkańców szeregu krajów rozwijających się (Ameryka Południowa, Azja), a także spadek produkcji energii wodnej. Globalna powierzchnia terenów objętych suszą ulegnie znacznemu zwiększeniu. Generalnie, w systemach wodnych zaobserwowano ocieplenie rzek i jezior, z konsekwencjami dla jakości wody.

W systemach biologicznych zauważono wiele zmian związanych z fenologią, wynikających ze wzrostu temperatury (np. wcześniejsze nadejście wiosny, rozwój liści, kwitnienie, przylot ptaków, składanie jaj), a także ze (związanych z ociepleniem) zmian pokrywy śnieżnej i lodowej, jak i poziomu tlenu. Zaobserwowano wiele przypadków przesuwania się zasięgu występowania gatunków flory i fauny w kierunku odpowiedniego klimatu (w poszukiwaniu właściwych temperatur), a więc ku biegunom i na wyższe wysokości. Wzrost atmosferycznego stężenia dwutlenku węgla spowodował wzrost kwasowości oceanów, o 0,1 pH od 1750. Projekcje na przyszłość orzekają, że z powodu zmian klimatu ekosystemy poddane będą coraz większemu stresowi, w połączeniu z innymi czynnikami związanymi z klimatem takimi, jak: ekstrema (intensywny opad, powódź, susza, pożar lasu), a także pozaklimatycznymi (zmiana użytkowania terenu, zanieczyszczenie, fragmentacja, nadmierna eksploatacja). W ciągu XXI wieku globalna sekwestracja węgla przez ekosystemy lądowe osiągnie maksimum i zacznie się zmniejszać, wzmacniając zmiany klimatu. Przewidziane jest wzmożone wymieranie gatunków, zwłaszcza w regionach „szczególnej troski”.

Efekty zmian klimatu obserwuje się w rolnictwie i leśnictwie (zmiany czasu wystąpienia faz fizjologicznych, terminów zabiegów agrotechnicznych). Zanotowano zmiany zasięgu szkodników. Projekcje wskazują, że lekkie ocieplenie poprawiłoby plony w średnich i wysokich szerokościach geograficznych, dzięki dłuższemu sezonowi wegetacyjnemu i łagodniejszym ziomom. Niekorzystny wpływ na produkcję roślinną w południowej i wschodniej Europie może mieć jednak niedobór wody oraz skrócenie okresu wzrostu wielu gatunków roślin. Rolnictwo wkroczy na nowe tereny. Na przykład, zasięg uprawy pszenicy może się zwiększyć o duże obszary w Finlandii, Rosji czy Kanadzie, na których obecnie panują jeszcze zbyt surowe warunki. Jednak w krajach rozwijających się, położonych w niskich szerokościach geograficznych, już małe ocieplenie doprowadzi do spadku plonów. Znaczne ocieplenie (np. ponad 3 °C) spowoduje natomiast globalny spadek produktywności rolnictwa.

Rosną negatywne skutki zdrowotne i śmiertelność wywołana falami upału w Europie (łączy efekt wzrostu temperatury i starzenia się społeczeństwa). Przyszłe zmiany klimatu odbiją się niekorzystnie na zdrowiu ludzi. Zmieni się też zasięg chorób, które w określonych miejscach nie rozwijały się w chłodniejszym klimacie, także przenoszonych przez owady (np. malaria, denga). Można oczekiwać globalnego wzrostu niedożywienia i negatywnych skutków zdrowotnych ostrzejszych ekstremów klimatycznych. Coraz silniejsze i częstsze fale upałów, w połączeniu z zanieczyszczeniami powietrza i alergenami, dadzą się szczególnie we znaki osobom starszym i chorym oraz małym dzieciom.

Podniesienie się poziomu oceanów może spowodować poważne skutki na terenach nadbrzeżnych. Dotyczy to wielkich obszarów, a szczególnie gęsto zaludnionych obszarów deltowych wielkich rzek azjatyckich. Woda morska zaleje nisko położone tereny, np. w Bangladeszu czy na małych wyspach Oceanu Indyjskiego i Pacyfiku. Wybrzeża, zamieszkałe przez rosnącą liczbę ludzi, narażone będą na rosnące ryzyko związane ze wzrostem poziomu mórz i powodzią sztormowymi.

Możemy stać się świadkami nowej wędrówki ludów – emigracji klimatycznej, złożonej z uchodźców środowiskowych opuszczających tereny, na których trudno przeżyć (np. Afrykę Północną – skwarną, suchą i wygłodzoną).

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);
- Megadelta w Azji i Afryce (wielkie populacje ludzkie, wzrost poziomu morza i powodzie rzeczne).

PRZECIWDZIAŁANIE GLOBALNEMU OCIEPLENIU

Wielu niekorzystnych konsekwencji w niektórych sektorach i regionach można uniknąć, osłabić je czy też opóźnić poprzez implementację skutecznej polityki zapobiegania zmianom klimatu. Dlatego ograniczanie zmian klimatu wydaje się niezbędnym działaniem w celu złagodzenia niekorzystnych skutków.

Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych Dotycząca Zmian Klimatu (UNFCCC)

Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych Dotycząca Zmian Klimatu (UNFCCC), zob. United Nations (1992) stanowi podstawę międzynarodowych działań w celu ograniczenia zmian klimatu. Konwencja została przyjęta w marcu 1994 i była ratyfikowana przez prawie wszystkie państwa członkowskie ONZ. Protokół z Kioto (United Nations, 1998), który formułuje narzędzia implementacji konwencji, został wprowadzony w życie w lutym 2005. Zgodnie z artykułem 3.1 Protokołu z Kioto, kraje Aneksu I (a więc kraje rozwinięte i kraje transformujące gospodarkę) zgodziły się zredukować emisję gazów cieplarnianych o co najmniej 5% poniżej poziomu z roku bazowego (na ogół 1990). Wejście w życie Protokołu z Kioto stanowi pierwszy, choć skromny, krok w kierunku ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. 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. Siłą „Kioto” jest uzyskanie „niemal globalnego” porozumie-

nia dotyczącego potrzeby zapobiegania ociepleniu, a także budowa mechanizmów rynkowych. Słabością jest jednak brak ratyfikacji przez niektóre kraje odpowiedzialne za wielkie emisje, a przede wszystkim USA, oraz fakt, że kraje na drodze rozwoju takie, 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. Kolejna próba osiągnięcia globalnego (i konkretnego) porozumienia, podjęta na COP 13 (*Conference of Parties* – Konferencja Stron Konwencji Klimatycznej) w grudniu 2007 (Bali, Indonezja), nie udała się. Następną okazją będzie COP 14 w grudniu 2008 w Poznaniu.

Zasadniczy cel Konwencji Klimatycznej dotyczy 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 cel. Kryteria artykułu 2. specyfikujące ryzyko niebezpiecznego poziomu antropogenicznego wpływu na klimat dotyczą przede wszystkim globalnego bezpieczeństwa żywnościowego, ochrony ekosystemów i zrównoważonego rozwoju gospodarczego. Obszarami szczególnej troski są: systemy unikalne i zagrożone; zdarzenia ekstremalne; rozkład konsekwencji; konsekwencje zagregowane; oraz wielkoskalowe nieliniowości typu progowego. Ważnym elementem implementacji artykułu 2. konwencji jest niepewność w ocenie ryzyka i konsekwencji zmian klimatu oraz w ocenie skuteczności i kosztów działań przeciwdziałających zmianom klimatu. Potrzebne jest więc podejście oparte na zasadzie przeczności (*precautionarity*) i przewidywalności, wykorzystujące koncepcję „gospodarki ryzykiem” (*risk management*). Należy rozważyć łącznie przeciwdziałanie zmianom klimatu i adaptację do ich skutków, w oparciu o ocenę kosztów i zysków z uwzględnieniem zapobiegania negatywnym konsekwencjom, łącznie z mało prawdopodobnymi zdarzeniami o ogromnym potencjale strat (np. całkowite roztopienie się lodów Grenlandii czy znaczne osłabienie Prądu Zatokowego).

Emisje gazów cieplarnianych ujętych Protokółem Kioto wzrosły o ok. 70% (z 28,7 do 49,0 GtCO₂-eq) między 1970 a 2004 (o 24% z 1990 do 2004), przy czym stężenie CO₂ (główny gaz) wzrosło o ok. 80%. Najsilniejszy wzrost emisji CO₂ pochodzi z generacji energii i transportu drogowego. Emisje metanu (CH₄) wzrosły o ok. 40% od 1970. Sektorem, który emituje najwięcej metanu, jest rolnictwo. Emisje podtlenku azotu (N₂O) wzrosły o ok. 50%, głównie z powodu zwiększonego użycia nawozów i wzrostu całkowitej produkcji rolnej.

Całkowite stężenie skuteczne gazów cieplarnianych w atmosferze wynosi obecnie ok. 455 ppm CO₂-eq. Uwzględniając efekt chłodzący aerozoli i innych zanieczyszczeń atmosfery oraz gazów związanych ze zmianą użytkowania terenu, o trzymujemy wartość skuteczną 311-435 ppm CO₂-eq. Jednak niepewność związana z emisjami aerozoli jest bardzo wysoka. Globalne emisje siarki zmalały z 75 ± 10 MtS w 1990 do 55-62 MtS w 2000.

W 2004 r. na globalny efekt cieplarniany składały się: w 26% emisje gazów cieplarnianych w sektorze energetycznym; w 19%, przemysł; w 17% wyłesianie, w 14% rolnictwo; w 13% transport, w 8% osadnictwo oraz sektor handlu i usług, a w 3% gospodarka odpadami.

W 2004 r. kraje Aneksu I, zamieszkiwane przez 20% światowej ludności, generowały aż 46% globalnych emisji CO₂. Kontrast między regionem o najwyższych i najniższych emisjach, tzn. między Ameryką Płn (kraje Aneksu I) i południową Azją (kraje poza Aneksem I), jest bardzo silny. Ameryka Północna jest zamieszkiwana przez zaledwie 5% ludności świata, a emituje aż 19,4% gazów cieplarnianych, natomiast południowa Azja jest zamieszkiwana przez 30,3% ludności świata, a emituje tylko 13,1% gazów cieplarnianych.

Jeśli nie będzie zmiany polityki energetycznej, można oczekiwać, że w roku 2030 emisje CO₂ związane z energetyką będą o 40-110% wyższe niż w 2000, przy czym większość (2/3 do 3/4) emisji będzie pochodzić z krajów spoza Aneksu I.

Strategia Unii Europejskiej

Z obszernego studium podjętego w Wielkiej Brytanii (Stern, 2007) wynika, że roczne straty spowodowane zmianami klimatu wzrosną do przynajmniej 5% światowego produktu, a rozważając szerszy wachlarz skutków i mniej prawdopodobne warianty – nawet do 20% i więcej. Natomiast koszt redukcji gazów cieplarnianych, umożliwiający uniknięcie najgorszych skutków zmian klimatu, wyniesie ok. 1% światowego produktu, zakładając, że celem jest ograniczenie maksymalnych stężeń dwutlenku węgla w atmosferze do 450-550 ppm CO₂-eq. 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 przedprzemysłowym (czyli o co najwyżej 1,5° C w porównaniu z okresem 1980-1999). Aby to osiągnąć, potrzeba globalnego ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (tak by atmosferyczne stężenie nie przekroczyło 450 ppm CO₂-eq.), a to byłoby bardzo trudne i drogie. Obecnie stężenie (po wygładzeniu wahań sezonowych związanych z roślinnością) sięga 383 ppm i szybko rośnie. Bez polityki ochrony klimatu, temperatura wzrosnąć może znacznie silniej, a adaptacja byłaby bardzo trudna.

Unia Europejska zadeklarowała gotowość do redukcji emisji gazów cieplarnianych do roku 2020 o przynajmniej 20%, w porównaniu do poziomu roku 1990. 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 o 50% do 2050.

Unia Europejska przoduje w inicjatywach podejmowanych na rzecz przeciwdziałania zmianom klimatu. Europa ma mało paliw kopalnych, a w porównaniu z innymi kontynentami, 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, o pokoleniach, które przyjdą po nas. Mówi się, że odziedziczyliśmy środowisko od pokolenia naszych rodziców, ale można też spojrzeć inaczej – „wypożyczamy” je od pokolenia naszych dzieci czy wnuków.

Jak przeciwdziałać zmianom klimatu?

Do atmosfery dostaje się za dużo dwutlenku węgla, za dużo metanu. Trzeba podjąć starania, żeby tych gazów było w atmosferze mniej, a nie coraz więcej. Potrzebne jest skoordynowane i globalne działanie w kierunku powstrzymania intensyfikacji efektu cieplarnianego, spowodowanego w znacznej mierze wzrostem spalania węgla, ropy i gazu, a także wylesieniem. Potrzebne są zharmonizowane działania globalne, i to we wszystkich sektorach, a w szczególności w tych, które są w wysokim stopniu odpowiedzialne za znaczną emisję gazów cieplarnianych – energia, rolnictwo (dotyczy metanu i podtlenku azotu), transport, osadnictwo, sektor handlu i usług, gospodarka odpadami. Ważna jest także dbałość o wiązanie (sekwestrację) dwutlenku węgla poprzez odpowiednie kształtowanie użytkowania terenu, w tym: zapobieganie wylesianiu i zalesianie (poprawiające bilans wiązania dwutlenku węgla przez rośliny).

Poprawa efektywności użycia energii jest najtańszą formą zapobiegania ociepleniu. Ale potrzeba znacznie więcej – „odwęglania” energii, tzn. stosowania takich źródeł energii, które nie powodują emisji gazów cieplarnianych i wzmacniania procesów „łapania” węgla, np. przez roślinność czy technologie CCS (*carbon capture and storage*). Może pomysły inżynierii planetarnej, które wyglądają jak *science fiction*, okażą się realne. Na przykład, silna erupcja wulkanu hamuje ocieplenie, więc człowiek myśli o naśladowaniu wulkanu – wprowadzaniu aerozoli do stratosfery.

Potrzebna jest gospodarka energooszczędna, z dywersyfikacją źródeł energii i coraz większym udziałem odnawialnych źródeł (elektrownie wodne, wiatrowe, pompy ciepłone). Trwają prace nad udoskonaleniem magazynowania energii słonecznej. Energetyka jądrowa jest poważnie rozważana (uwaga – potrzeba dużych ilości wody do chłodzenia).

Zasadniczą kwestią jest budownictwo. Komisja Europejska przymierza się do pracy nad rewizją przepisów, a w szczególności – nad dyrektywą o ocenie energetycznej budynków. Według wstępnych ocen z raportu Sterna, ocieplenie o 3-4 °C spowoduje, że koszty dodatkowe, związane z adaptacją infrastruktury i budynków, mogą sięgać 1-10% całkowitych kosztów zainwestowanych w budownictwo w krajach OECD (od 15 do 150

mld USD rocznie, czyli od 0,05 do 0,5% PKB). Jeśli temperatura wzrośnie jeszcze silniej, koszty adaptacji mogą gwałtownie wzrosnąć, a ich względna skuteczność spadnie.

Transport rośnie wraz z gospodarką, zwłaszcza w krajach rozwijających się, gdzie globalizacja powiększa strumienie handlu, a rosnące dochody jednostek powiększają potrzebę korzystania z samochodu. Obecnie transport opiera się na silnikach spaliniowych wykorzystujących paliwa oparte na ropie naftowej i jej pochodnych (95% z 83 EJ światowego użycia energii w transporcie w oku 2004). W roku 2004 energia zużyta na potrzeby transportu wynosiła aż 26% całkowitego zużycia energii na świecie. W krajach rozwiniętych zużycie energii w sektorze transportu wzrastało o ponad 1% rocznie. Ponieważ transport drogowy odpowiada teraz za 74% całkowitych globalnych emisji CO₂ związanych z transportem, więc poprawa efektywności energetycznej samochodów jest ważnym elementem ochrony klimatu. Obecnie koszt produkcji etanolu jest, z punktu widzenia ograniczeń emisji CO₂, nadmiernie wysoki, z wyjątkiem produkcji w krajach o taniej sile roboczej. Potencjał samochodów na paliwo wodorowe pozostaje niepewny. Pojazdy elektryczne mają ograniczoną penetrację rynku z powodu krótkiego zasięgu i krótkiej żywotności baterii. Wkład do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych wnoszą systemy transportu publicznego, których skuteczność zależy od ilości pasażerów. Wzrost taboru i uatrakcyjnienie oferty (przede wszystkim poprawa ilości połączeń, niezawodności i punktualności) mogą spowodować spadek emisji CO₂, gdyż ludzie chętnie korzystają z wygodnych i częstych połączeń komunikacyjnych z użyciem transportu publicznego.

Kosztów zapobiegania ociepleniu nie da się uniknąć. Ale ekonomiści oceniają, że koszty kontynuacji niefrasobliwego podejścia i niedostrzegania problemu będą wyższe niż koszty przeciwdziałania globalnemu ociepleniu. Koszty silnie zależą od zamierzonego poziomu stabilizacji dwutlenku węgla w atmosferze. Chcemy, by dwutlenku węgla było wokół Ziemi względnie mało – celem Unii Europejskiej jest ograniczenie ocieplenia globalnego do wartości nie wyższej niż 2° C do końca wieku (w porównaniu z temperaturą czasów przedprzemysłowych). Potrzebne są więc 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 wyzwanie, jakiego nie zna świat – 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. W niektórych krajach rozważa się podatki „klimatyczne” związane z samochodami, np. przy zakupie pojazdu, jego rejestracji, użyciu, parkowaniu, zakupie paliwa, ale wzrost podatków jest trudny do wprowadzenia.

Oprócz działań w wielkiej skali, potrzebne są działania masowe, które może i powinien podejmować każdy. Oszczędzając energię, np. przez umiarkowanie w ogrzewaniu

i chłodzeniu, sprawiamy, że emisja gazów cieplarnianych jest mniejsza. Różne pomieszczenia domu powinny mieć różne temperatury – w chłodnej sypialni śpi się lepiej niż w ciepłej. Ponieważ połowa podróży samochodowych to podróże poniżej 5 km, więc przestawienie się z samochodów na rowery, spacerów lub transport publiczny może odgrywać znaczną rolę w ograniczeniu emisji (dodatkowe ważne zalety – korzyści zdrowotne, mniej zanieczyszczeń powietrza, zatłoczenie dróg, bezpieczeństwo drogowe i koszt). Istnieją przykłady miast, w których kształtowanie świadomości pozwoliło na ograniczenie użycia samochodów o ponad 10%. Podjęcie masowych działań tego typu może dać znaczny efekt, gdyż na świecie żyje 6,6 mld ludzi, więc jeśli każdy wnieśli choć niewielki wkład, wynik sumaryczny stanie się ogromny. 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.

Polityka klimatyczna a rozwój zrównoważony

Odpowiednio przemyślane działania zapobiegające zmianom klimatu i przeciwdziałające niekorzystnym skutkom (adaptacja do zmian klimatu) mogą 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 SO_2), poprawy zdrowotności (zmniejszenie zachorowalności wskutek zanieczyszczenia powietrza, spadek wypadków w górnictwie). Również, ze wszech miar korzystne jest powiększanie retencji wodnej (zwłaszcza – małej retencji), np. oczka wodne, mokradła. 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. Takie elementy adaptacji, jak – odsalanie wody dla zwiększenia dyspozycyjnych zasobów wody słodkiej, pompowanie głębokiej wody gruntowej czy klimatyzacja łagodząca zdrowotne skutki fal upałów nie są korzystne dla przeciwdziałania ociepleniu. Wraz z globalnym ociepleniem przybliży się perspektywa spędzania lata w klimatyzowanym domu i w klimatyzowanym miejscu pracy. Klimatyzacja wymaga jednak użycia znacznych ilości energii, a więc „nakreca” efekt cieplarniany, wzmacniając ocieplenie.

Natomiast ochrona klimatu przez wiązanie węgla w roślinności może prowadzić do wzrostu problemów związanych ze spadkiem dyspozycyjnych zasobów wody (wysoka

ewapotranspiracja lasu). „Wielka” retencja wody (np. zapory i zbiorniki wodne) jest korzystna zarówno dla adaptacji, jak i ochrony klimatu. Jednak istnieją inne aspekty ograniczające stosowalność tego rozwiązania (konsekwencje ekologiczne, uniemożliwienie migracji ryb, konieczność przesiedlenia ludności).

UWAGI KOŃCOWE

Ocieplenie klimatu w ostatnim 50-leciu nie ulega wątpliwości, a wytłumaczyć je można przede wszystkim czynnikami antropogenicznymi (wzrost emisji gazów cieplarnianych i redukcja zdolności sekwestracji węgla wskutek wylesienia). Dalsze ocieplenie jest nieuniknione, a jego rozmiar 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. Konsekwencje globalnego ocieplenia mają znaczenie dla wszystkich sektorów, systemów i regionów, a niektóre z nich są szczególnie zagrożone.

Podziękowania

W artykule wykorzystano materiały zebrane podczas współpracy autora z IPCC oraz przy realizacji następujących projektów: *Ekstremalne zjawiska meteorologiczne i hydrologiczne w Polsce* (Projekt zamawiany, PBZ-KBN-086/P04/2003) oraz projekty zintegrowane Szóstego Programu Ramowego Unii Europejskiej: ENSEMBLES, ADAM, i WATCH.

Bibliografia

- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. et al. (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., D. Qin, M. Manning et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
<http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>
- Kundzewicz, Z.W., Gerstengarbe, F.-W., Österle, H. et al. (2008) *Recent anomalies of mean temperature of 12 consecutive months – Germany, Europe, Northern Hemisphere*, *Theor. and Appl. Climatol.* (w druku).
- Kundzewicz, Z.W., Józefczyk, D., Österle, H. (2007) *Warmest 12 consecutive months on record at the Potsdam meteorological station, Germany*. *Weather* 62 (10), 284-286.
- Kundzewicz, Z.W., Mańczak, R., Pińskwar, I., Radziejewski, M. (2008a) *Models of impacts of hydrometeorological extremes*. *Geogr. Polon* (w druku).

- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. et al. (2007a) Freshwater resources and their management. [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*, (red. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P. et al.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kundzewicz, Z. W. & Parry, M. L. (red.) (2001) Europe. [W:] *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (red. McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A. et al.), Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 641-692.
- Kundzewicz, Z. W., Radziejewski, M., Pińskwar, I. (2006) *Precipitation extremes in the changing climate of Europe*. „Clim. Res.” 31, 51-5
- Parry, M.L. (red.) (2000) *Assessment of the Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project*. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 320 pp.
- Stern, N. (2007) *The Economics of Climate Change (The Stern Review)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 692 str., por www.sternreview.org.uk
- United Nations (1998) *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- United Nations (1992) *United Nations Framework Convention on Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

Impacts of global climate change

The warming of the climate of the Earth has been unequivocal, most notably due to the man-caused increase of atmospheric concentration of greenhouse gases, leading to intensification of the greenhouse effect. Projections for the future explain that we are committed to further, possibly even more intense, warming, whose rate depends on the scenario of socio-economic development and effective climate change mitigation policy. If the global emissions grow in uncontrolled way and carbon sequestration potential decreases, the warming can attain a dangerous dimension. Global warming induces change in all variables of hydroclimatic systems. As demonstrated in the present contribution, the impacts of global climate change – both advantageous and (more often) adverse can be noted in all regions of the globe and in all systems and sectors, some of which are particularly vulnerable. Yet, many of these impacts can be avoided, reduced, or delayed, by effective climate change mitigation.

Key words climate change, climate change impacts, greenhouse effect, mitigation, projections