

ZBIGNIEW W. KUNDZEWICZ, KATARZYNA JUDA-REZLER

## Zagrożenia związane ze zmianami klimatu

### System klimatyczny Ziemi i jego zmiany

Klimat ziemski zmieniał się już wielokrotnie w historii Ziemi w wyniku takich mechanizmów zewnętrznych, jak: wahania promieniowania słonecznego (aktywność Słońca); zmiany parametrów orbity Ziemi wokół Słońca; zmiany składu ziemskiej atmosfery (gazy cieplarniane, pyły, aerozole); i zmiany właściwości powierzchni Ziemi (współczynnik odbicia, retencja wodna, zmiana użytkowania terenu). Pierwsze dwa wymienione mechanizmy przebiegają w sposób naturalny, bez udziału człowieka i są quasi-okresowe. Na pozostałe dwa mechanizmy wpływ mają zarówno czynniki naturalne, jak i – w coraz większym stopniu – działalność człowieka. Istnieją mocne przesłanki ku stwierdzeniu, że zachodzące obecnie globalne ocieplenie różni się w istotny sposób od wielu wcześniejszych okresów wzrostu temperatury, które wywołane były zmianami naturalnymi – aktywnością Słońca, parametrami orbitalnymi czy naturalną zmianą składu ziemskiej atmosfery. Oprócz wymienionych mechanizmów zewnętrznych zmian klimatu istotne są sprzężenia zwrotne zwiększające lub zmniejszające efekt całkowity.

Dotychczasowe zmiany klimatu odbywały się bez znaczącej obecności ludzkiej, np. podczas wyjścia z ostatniej epoki lodowcowej ludzi na całej Ziemi było mniej niż teraz w jednym wielkim mieście, a w XVII w. liczba ludności świata wynosiła około 0,5 mld. W roku 2010 żyje na Ziemi ok. 7 mld ludzi, którzy zużywają coraz więcej energii i drastycznie zmieniają powierzchnię naszej planety. Węgiel z zasobów kopalnych, które powstawały w skorupie ziemskiej przez wiele milionów lat, jest uwalniany do atmosfery w postaci dwutlenku węgla w skali czasowej dziesięcioleci. Atmosferyczne stężenie dwutlenku węgla rośnie również wskutek ograniczenia możliwości wiązania węgla przez roślinność z powodu wylesień. W wyniku rozwoju produkcji ryżu, hodowli bydła oraz topnienia wiecznej zmarzliny wzrasta atmosferyczne stężenie metanu). Wzrasta też stężenie podtlenku azotu z powodu rozwoju rolnictwa. W efekcie intensyfikacji efektu cieplarnianego „dach” naszej globalnej szklarni zatrzymuje coraz więcej promieniowania długofalowego emitowanego przez Ziemię, które bez tej intensyfikacji opuściłoby system ziemski.

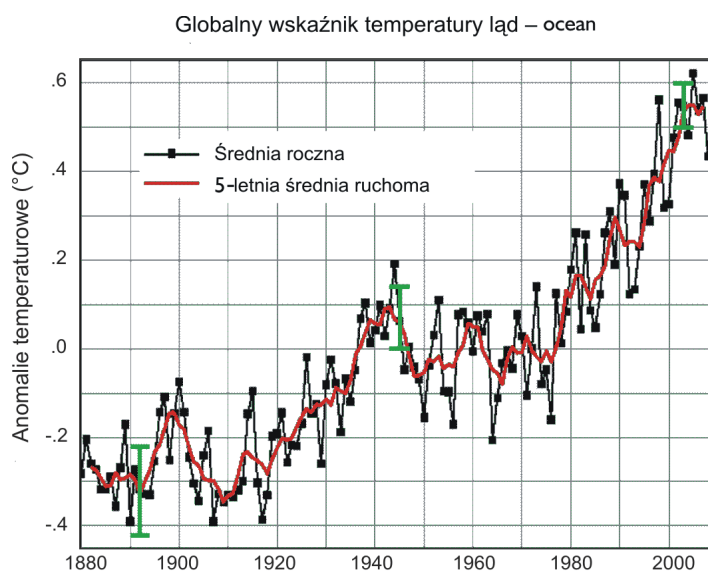
---

Prof. dr hab. Zbigniew W. Kundzewicz, członek korespondent PAN, Instytut Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN, Poznań; prof. nadzw. dr hab. inż. Katarzyna Juda-Rezler, Zakład Ochrony i Kształtowania Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

Dokonano szacunków różnych składowych tzw. wymuszenia radiacyjnego w okresie 1750-2005 (IPCC, 2007), które wzrosło o  $1,72 \text{ Wm}^{-2}$ , z czego czynniki antropogeniczne odpowiedzialne są za wzrost o  $1,6 \text{ Wm}^{-2}$ , a czynniki naturalne (Słońce) – o  $0,12 \text{ Wm}^{-2}$ . Według tej oceny, Słońce jest więc odpowiedzialne tylko za 7,5% ocieplenia w ostatnich 250 latach (a jeszcze mniej, procentowo, w ostatnich 100 czy 50 latach). Pośród czynników antropogenicznych gazy cieplarniane charakteryzujące się długim czasem przebywania w atmosferze odpowiadają za wzrost o  $2,64 \text{ Wm}^{-2}$ , ale kompensujący, wywołany przez człowieka, oziębiający efekt aerozoli atmosferycznych wyniósł  $-1,2 \text{ Wm}^{-2}$  (IPCC, 2007).

Analiza rdzeni lodowych pokazuje, że tak wysokich stężeń dwutlenku węgla w atmosferze jak obecnie nie było od co najmniej 650 000 lat (IPCC, 2007).

Nie ulega wątpliwości, że klimat ziemski ociepla się (ryc. 1). Każdy kolejny rok z ostatniego dwudziestolecia wpisuje się w obraz cieplejszego świata. Dziesięciolecie 2000-2009 jest zdecydowanie najcieplejsze w historii globalnych bezpośrednich obserwacji temperatury. Na wyraźną tendencję wzrostową temperatury nakłada się jednak silna zmienność naturalna. Temperatura globalna w konkretnym roku układa się czasem nieco pod (jak w latach 1996, 1999, 2000, 2008), a czasem nad (jak w latach 1998, 2005) linią trendu. Globalne ocieplenie nie ma jednostajnego tempa, przyspieszając w ostatnich kilku dekadach (ryc. 1).



Ryc. 1. Globalne anomalie temperatury dla systemu ląd-ocean (odchylenie temperatury rocznej od średniej z wielolecia). Pokazano też zmiany zakresu błędów dla trzech przykładowych lat.

Wykres odpowiada bazie danych GISS NASA. Źródło: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

Bardzo silne zmiany klimatu dostrzega się w kurczącej się kriosferze – lodowcach i lodach, pokrywie śnieżnej i zmarzlinie. W wyniku rozszerzalności cieplnej, a także topnienia kriosfery, podnosi się poziom oceanów w tempie ok. 3 mm rocznie. W cieplejszym klimacie rośnie też intensywność opadów – dłuższe okresy posuszne przedzielane są więc intensywnymi opadami. Świadczenie obserwacji wskazuje, że systemy fizyczne i biologiczne podlegają oddziaływaniu regionalnych zmian klimatu, a zwłaszcza wzrostu temperatury i wzrostu poziomu morza.

Detekcja globalnych zmian klimatu, a jeszcze bardziej wyjaśnienie ich przyczyn, nie są łatwe z powodu dość niskiej wartości stosunku sygnału do szumu.

W najnowszym raporcie Międzyrządowego Zespołu do spraw Zmian Klimatu (IPCC, 2007), zawierającym ocenę bieżącego stanu wiedzy o zmianach klimatu, ich konsekwencjach oraz możliwościach adaptacji i przeciwdziałania, znajdujemy mocne stwierdzenie: „Większość zaobserwowanego wzrostu średniej temperatury globalnej od połowy XX wieku jest bardzo prawdopodobnie spowodowana wywołanym przez człowieka wzrostem stężenia gazów cieplarnianych”. Brak jest alternatywnego sposobu poważnego wyjaśnienia przyczyn globalnego ocieplenia w ostatnich dekadach.

Badania modelowe wzmocniają argumenty o antropogenicznym podłożu obecnych zmian klimatu. Na ich podstawie – przy założeniu wymuszeń naturalnych (aktywność słoneczna, erupcje wulkanów) i antropogenicznych (wzrost atmosferycznych stężeń gazów cieplarnianych i wzrost, a potem spadek atmosferycznej zawartości aerozoli oraz wylesienie), jesteśmy w stanie odtworzyć zasadnicze cechy zaobserwowanego przebiegu temperatury globalnej, w tym brak wzrostu temperatury w latach 1945-1975. Natomiast gdyby założyć wyłącznie wymuszenia naturalne, temperatura w ciągu ostatnich 40 lat nie powinna rosnąć (IPCC, 2007).

Oprócz skali globalnej, klimat ociepla się we wszystkich innych skalach przestrzennych – w Europie i w Polsce. Zmienia się rozkład sezonowy opadu – w Polsce wzrósł stosunek sumy opadów w półroczu chłodnym do sumy opadów w półroczu ciepłym. Innymi słowy, kubatura opadów zimowych rośnie, a letnich nie rośnie. Coraz częściej zimą pada deszcz, a nie śnieg.

### **Projekcje zmian klimatu i ich konsekwencje**

Klimat w XXI wieku będzie, z wysokim prawdopodobieństwem, znacząco różny od tego w XX wieku, a globalne ocieplenie, według obecnej wiedzy, jest nieuniknione. Przy niewielkim ociepleniu globalnym zagregowane efekty globalne zmian klimatu mogą być pozytywne, choć już nawet małe ocieplenie może być niekorzystne dla konkretnego regionu czy sektora. Ocenia się, że jednostopniowy wzrost temperatury maksymalnej powoduje 10-procentowy spadek plonów ryżu. Samo istnienie małych krajów wyspiarskich (np. Malediwy, Tuvalu, Kiribati) jest zagrożone wzrostem poziomu morza, nie-

uchronnie towarzyszącego ociepleniu. Ocenia się, że przy znaczniejszym ociepleniu straty przeważałyby nad korzyściami. Istotna jest nierównomierność rozkładu konsekwencji zmian klimatu – kraje rozwinięte położone w wysokich i średnich szerokościach geograficznych mogą skorzystać, ale straci większość krajów rozwijających się. Istnieje wysokie prawdopodobieństwo pojawienia się kategorii uchodźców „klimatycznych”, opuszczających tereny, na których coraz trudniej będzie przeżyć.

Projekcje zmian klimatu opracowywane są za pomocą globalnych modeli klimatycznych. Danymi wejściowymi do tych modeli są scenariusze rozwoju świata, w których zakłada się, w jaki sposób będą w przyszłości funkcjonowały systemy będące źródłami emisji gazów cieplarnianych. Każdy ze scenariuszy opiera się na innych założeniach odnośnie wzrostu liczby mieszkańców świata i przewidywanego rozwoju gospodarki światowej w aspekcie technologicznym, ekonomicznym i ekologicznym. Projekcje modeli klimatycznych określają zakres wzrostu średniej globalnej temperatury do roku 2100 od 0,6 do 5,9°C ponad wartość z okresu przedprzemysłowego, w zależności od scenariusza (IPCC, 2007). Równocześnie oczekuje się znacznego regionalnego zróżnicowania zmian temperatury, w tym większego ocieplenia nad lądami i w wyższych szerokościach geograficznych półkuli północnej, a mniejszego nad oceanami. Projekcje dotyczące opadów są obciążone większą niepewnością. Modele wskazują jednak, że obszary suche staną się jeszcze bardziej suche, a obszary wilgotne – jeszcze bardziej wilgotne. Bardzo prawdopodobne jest, że częściej będą występować ekstremalne ulewami, a także fale upału. Uważa się za prawdopodobne, że przyszłe tropikalne cyklony będą bardziej intensywne, z większymi maksymalnymi prędkościami wiatru i większymi ulewami.

Fakt istnienia silnych niepewności w projekcjach zmian klimatu nie zwalnia z konieczności oceny potencjalnych skutków oddziaływania tych zmian na systemy ekologiczne i społeczno-ekonomiczne.

Najpoważniejsze skutki w skali globalnej odczują kraje najbiedniejsze, w tym kraje Afryki, zwłaszcza subsaharyjskie, które są szczególnie zagrożone ze względu na małą zdolność adaptacyjną. Kraje Afryki emitują mało gazów cieplarnianych do atmosfery (i mają niewielki udział w kumulowanym efekcie antropogenicznego ocieplenia), ale już odczuwają dotkliwie skutki zmian klimatu. Grozi im spadek dostępności wody pitnej, drastyczny spadek plonów rolnych, a w konsekwencji – susza i głód.

Drugim regionem świata o dużym stopniu zagrożenia jest Arktyka, ze względu na istnienie cennych systemów naturalnych i ich rolę w kształtowaniu klimatu oraz ze względu na wielkość ocieplenia, która według projekcji dwukrotnie przewyższy średnie ocieplenie globalne.

Obszary wybrzeży są szczególnie wrażliwe na zmiany klimatu, a zagraża im wzrost poziomu mórz i oceanów. Aktualnie prawie 50% ludności świata, 15 z 20 największych

miast oraz znaczna ilość światowych zasobów skoncentrowana jest w strefie wybrzeży. Szczególnie podatne na zalanie są płaskie obszary delt i ujść rzek, w tym „megadelta” wielkich rzek Azji, ze względu na położone w ich obszarze megamiasta, silną ekspozycję na podnoszenie się poziomu mórz, powodzie oraz sztormy. Setkom milionów ludzi, którzy mieszkają w deltach wielkich azjatyckich rzek, mogą zagrażać masy wodne zarówno z rzek jak i z oceanów. Częściowe zalanie, a nawet zniknięcie z powierzchni, grozi kolejnym wrażliwym regionom, jakim są małe wyspy, ze względu na silną ekspozycję ludności i infrastruktury na wzrost poziomu mórz oraz zwiększoną intensywność sztormów.

We wszystkich regionach świata zagrożona jest bioróżnorodność. Konsekwencją globalnego ocieplenia są istotne zakłócenia w funkcjonowaniu, składzie i produktywności ekosystemów, zwłaszcza tych szczególnie podatnych. Naturalne ekosystemy lądowe mają zdolność do adaptacji do zmian klimatu przez przesunięcie do 50 km w ciągu stulecia. Najbardziej podatne na zmiany klimatyczne i zagrożone wśród ekosystemów lądowych są tundra, lasy borealne, ekosystemy górskie i typu śródziemnomorskiego, a wśród ekosystemów wybrzeży – bagna mangrowe i słone błota. Wśród ekosystemów oceanicznych najbardziej zagrożone są rafy koralowe i biomy obszarów polarnych (IPCC, 2007). Nawet przy wzroście temperatury globalnej o „tylko” 2°C spodziewane są nieodwracalne zmiany w ekosystemach światowych oceanów, mórz, rzek i jezior.

Zasoby wodne w średnich szerokościach geograficznych i suchych tropikach są zagrożone zmniejszoną ilością opadów i większą ewapotranspiracją. Rolnictwu w niskich szerokościach geograficznych grozi zmniejszona dostępność wody, podczas gdy bogate kraje strefy umiarkowanej mogą odnotować wzrost wydajności rolnictwa.

Trzeba jednak podkreślić, że we wszystkich częściach świata występują regiony, sektory i społeczności, które są szczególnie podatne na negatywne skutki globalnego ocieplenia, są to np. małe dzieci, ludzie starsi, chorzy czy ubodzy (IPCC, 2007). Zdrowie ludzkie może być narażone w sposób bezpośredni lub pośredni. Bezpośrednie skutki to zwiększone narażenie na upały, susze, powodzie i katastrofalne sztormy. Skutki pośrednie wynikają z potencjalnego zagrożenia chorobami, dla których zmienia się zasięg występowania wektorów. Uważa się, że zmiany towarzyszące ociepleniu (zmiana wilgotności, prędkości i kierunku wiatru) spowodują, iż organizmy przenoszące choroby (owady, gryzonie i glony) będą miały sprzyjające warunki do migracji na obszary, na których do tej pory nigdy nie występowały. Na przykład, w Szwecji zaobserwowano znaczne przesunięcie na północ zasięgu występowania kleszczy. Skutki pośrednie mogą wynikać także z potencjalnego pogorszenia stanu odżywiania ludności. Schorzenia związane ze zmianami klimatycznymi prawdopodobnie dotkną milionów ludzi, zwłaszcza tych o niewielkich możliwościach adaptacyjnych, czyli mieszkańców krajów najbiedniejszych (IPCC, 2007).

W Europie spodziewany jest znaczny wzrost temperatury oraz wzrost opadów w północnej części kontynentu i ich spadek w części południowej. Nastąpią więc znaczne zmiany w środowisku. Klimat „podzieli” europejski kontynent – południe straci, a północ zyska (Schröter et al., 2005).

W Polsce zmiany klimatu niosą szanse (np. wyższa temperatura wody w Bałtyku czy jeziorach Pojezierza Mazurskiego – bardziej przyjazna dla amatorów kąpeli; mniejsza zachorowalność i śmiertelność oraz oszczędność na opale zimą), ale i zagrożenia (Starkeł, Kundzewicz, 2008). Projekcje dla Polski wskazują, że ekstremalne zjawiska pogodowe będą występowały częściej i staną się bardziej intensywne. Letnie opady mogą być gwałtowne i obfite, wywołując powodzie w górskich dopływach Wisły i Odry, a także transformację fali wezbraniowej w dół wielkich rzek. Przewiduje się dalszy wzrost poziomu Bałtyku, który może zagrozić zalaniem nisko położonych obszarów na wybrzeżu. Szczególnie zagrożone są Żuławy, których znaczna część leży w depresji. Wysokie wybrzeża klifowe mogą doświadczyć silnej erozji, co zagrozi miejscowościom wypoczynkowym położonym w tych rejonach. Przewiduje się wzrost częstości fal upałów i suszy w sezonie wegetacyjnym; a także silnych wiatrów. Rolnictwo w Polsce może odczuć pozytywne zmiany związane z wydłużeniem średniego okresu wegetacyjnego i poszerzeniem arealu upraw niektórych roślin ciepłolubnych, jak kukurydza, słonecznik i soja, ale wzrost temperatury i niekorzystne zmiany sezonowe zasobów wodnych będą negatywnie wpływały na plony ziemniaka i pszenicy. Per saldo, Polska na pewno nie będzie wielkim przegranym w zmieniającym się klimacie, jednak np. problemy z wodą (zob. Kundzewicz i in., 2010) mogą się nasilić. Trzeba będzie optymalnie „zagospodarować” zmiany korzystne; a skutecznie zaadaptować się do zmian niekorzystnych.

### **Przeciwdziałanie zmianom i adaptacja**

Ograniczenie emisji gazów cieplarnianych jest bardzo trudnym wyzwaniem, ponieważ rosnąca produkcja energii (w znacznym stopniu opartej na paliwach kopalnych) jest nierozzerwalnie związana z podstawowymi potrzebami człowieka. Silny wzrost globalnej populacji, produkcji i konsumpcji, jaki nastąpił w XX w., spowodował silny wzrost emisji gazów cieplarnianych i zmniejszenie możliwości naturalnego pochłaniania dwutlenku węgla. Wciąż brak jest metod oczyszczania gazów odlotowych z CO<sub>2</sub>, które zdały egzamin w skali technicznej. W tej sytuacji do najskuteczniejszych metod ograniczenia wzrostu emisji gazów cieplarnianych należą: zmniejszenie energochłonności gospodarek narodowych oraz poprawa wydajności energetycznej w zakresie wytwarzania i zużycia energii. Bardzo istotna jest także zmiana struktury pokrycia potrzeb energetycznych świata, w kierunku zwiększenia udziału gazu i odnawialnych źródeł energii, a także wykorzystywanie tzw. czystych technologii spalania węgla. Postulat ten ma szczególne

znaczenie dla takich krajów, jak Polska, w których węgiel ma dominujący udział w strukturze pozyskania i zużycia energii pierwotnej. Nowoczesne technologie spalania węgla (paleniska fluidalne), wysokosprawne czyste technologie węglowe (bloki gazowo-parowe oparte na zgazowaniu węgla, bloki na parametry nadkrytyczne), przyspieszenie w wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii (zwłaszcza biomasy) energetyka jądrowa, a także poligeneracja – wydają się najlepszymi rozwiązaniami dla Polski – zarówno w aspekcie bezpieczeństwa energetycznego, jak i redukcji emisji gazów cieplarnianych. Istotnym źródłem emisji CO<sub>2</sub> jest także transport, zwłaszcza drogowy. Tutaj potrzebna jest zmiana zachowań i upodobań kierowców, sprawne zarządzanie ruchem w miastach, tzw. ekójazda (*eco-driving*), a także wykorzystanie nowych technologii w zakresie silników (np. silniki hybrydowe) czy paliw (biopaliwa, wodór).

Dalsze ocieplenie zależy od tego, jaki scenariusz rozwoju społeczno-ekonomicznego i polityki przeciwdziałania ociepleniu się ziści. Przy znacznym ociepleniu nie wystarczy adaptacja w reakcji na już zaistniałe skutki zmian klimatu. Potrzebna staje się więc aktywna ochrona klimatu (poprzez redukcję emisji i zwiększanie możliwości wiązania dwutlenku węgla), by negatywne konsekwencje zmian klimatu w przyszłości nie przekraczały możliwości adaptacji. Ponieważ dalsze ocieplenie jest nieuchronne, potrzebna będzie jednak także adaptacja do zmian. A więc odpowiedź na pytanie: „przeciwdziałanie czy adaptacja?” jest oczywista – potrzebne jest jedno i drugie.

Zmiany klimatu powodują zmiany zarówno korzystne, jak i niekorzystne we wszystkich regionach świata i we wszystkich sektorach i systemach. Istnieją więc wygrani i przegrani. Można ogólnie uznać, że człowiek zaadaptował się do już istniejącego klimatu, więc każda zmiana klimatu wymaga (potencjalnie kosztownego) dostosowania się do nowych warunków.

Prawdopodobieństwo i dotkliwość niekorzystnych konsekwencji zmian klimatu rosną wraz ze wzrostem szybkości i amplitudy zmian (Stern, 2006).

Mechanizmy zmian klimatu są skomplikowane. Istnieje wiele elementów nieliniowych i sprzężeń zwrotnych, a niepewność projekcji pozostaje wysoka mimo osiągniętego postępu w zrozumieniu procesów i modelowaniu matematycznym. Powstaje więc problem – do jakich warunków należy się adaptować? Adaptacja niektórych sektorów (np. leśnictwo czy gospodarka wodna) jest procesem długotrwałym, bo las rośnie powoli, a budowa zbiorników czy obwałowań trwa długo (uwzględniając niezbędne, i trudne, konsultacje społeczne) i drogo kosztuje.

Jednak sektory i systemy mogą i powinny racjonalnie adaptować się do zmieniającego się klimatu. Wraz z postępami nauki o klimacie powiększa się bowiem dostępna informacja o konsekwencjach jego zmian. Założenie, że zrozumienie przeszłości jest kluczem do prognozowania przyszłych zmian klimatu nie jest właściwe, bo obecne zmiany klimatu mają inny charakter od poprzednich, naturalnych (por. Milly i in., 2008).

Bardzo potrzebne są współpraca multidyscyplinarna i szybki transfer informacji w obie strony – od nauki do praktyki (rozpowszechnianie wiedzy o projekcjach zmian) i od praktyki do nauki (artykułowanie praktycznych potrzeb i możliwości).

### Literatura

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Red.: Solomon S., Qin D., Manning M. et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm.pdf>
- Kundzewicz Z.W., Zalewski M., Kędziora A. et al. (2010) *Zagrożenia związane z wodą* „Nauka” nr 4, s. 87-96.
- Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M. et al. (2008) *Stationarity is Dead: Whither Water Management?* „Science” 319: 573-574.
- Schröter D., Cramer W., Leemans R. et al. (2005). *Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe*. „Science” 310 (5752), 1333-1337. DOI: 10.1126 /science.1115233
- Starkel L., Kundzewicz Z.W. (2008) *Konsekwencje zmian klimatu dla zagospodarowania przestrzennego kraju*, „Nauka” nr 1, s. 85-101.
- Stern N. (2006) *The Economics of Climate Change* (The Stern Review). Cambridge University Press, Cambridge, UK, [www.sternreview.org.uk](http://www.sternreview.org.uk)

### Climate change related risk

Mechanisms of change of Earth's climate are presented and the global warming clearly observed in recent decades is interpreted. Climatic projections for the future and climate change impacts in sectors and systems, resulting from model simulations are discussed. A review of possibilities of climate change mitigation and adaptation to climate change consequences is offered. The range of spatial scale considered embraces global, through European, to Polish scales.

**Key words:** climate change, climate change impacts, climate change mitigation, climate adaptation to change