



Zmiana klimatu, modele, przyczyny i zagrożenia

prof. dr hab. Mariusz Figurski
dr Adam Jaczewski

Centrum Modelowania Meteorologicznego
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy



METEO
IMGW-PIB
meteo.imgw.pl

Klimat definiuje się jako długoterminowe wzorce pogodowe na danym obszarze. Najprostszym sposobem opisanie klimatu jest spojrzenie na średnią temperaturę i opady w czasie.



POGODA



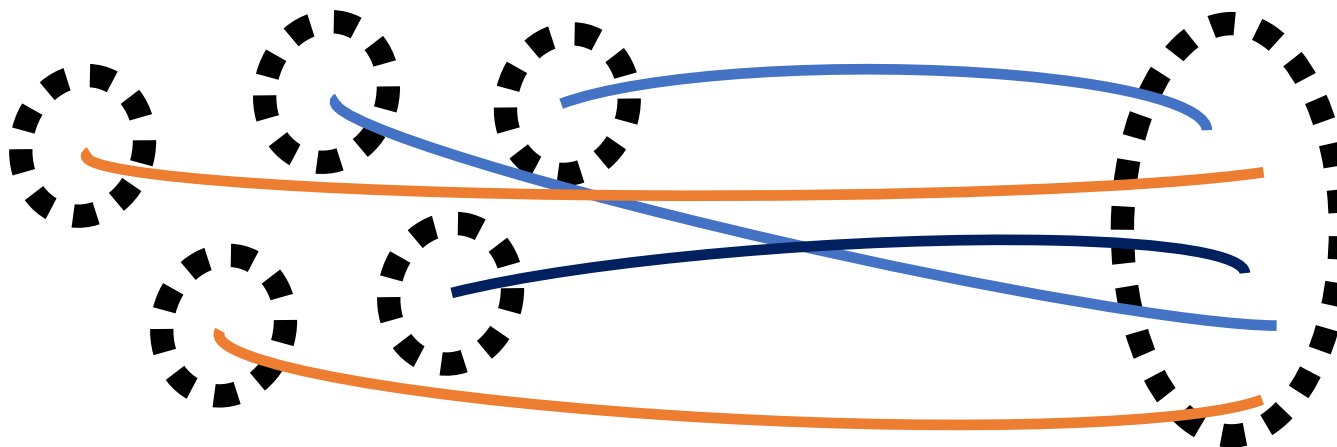
Może się zmienić w ciągu
kilku minut lub godzin



KLIMAT

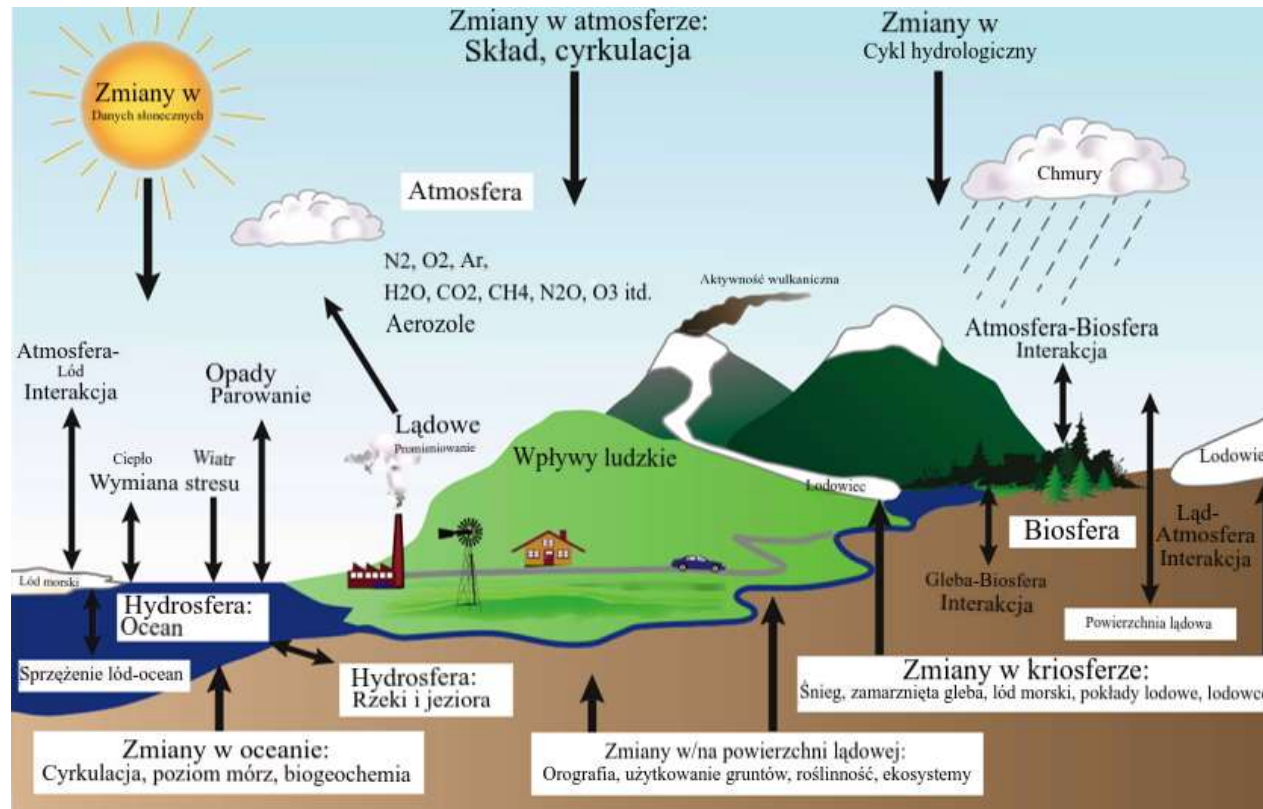


Zmiany zajmują
wielolecia



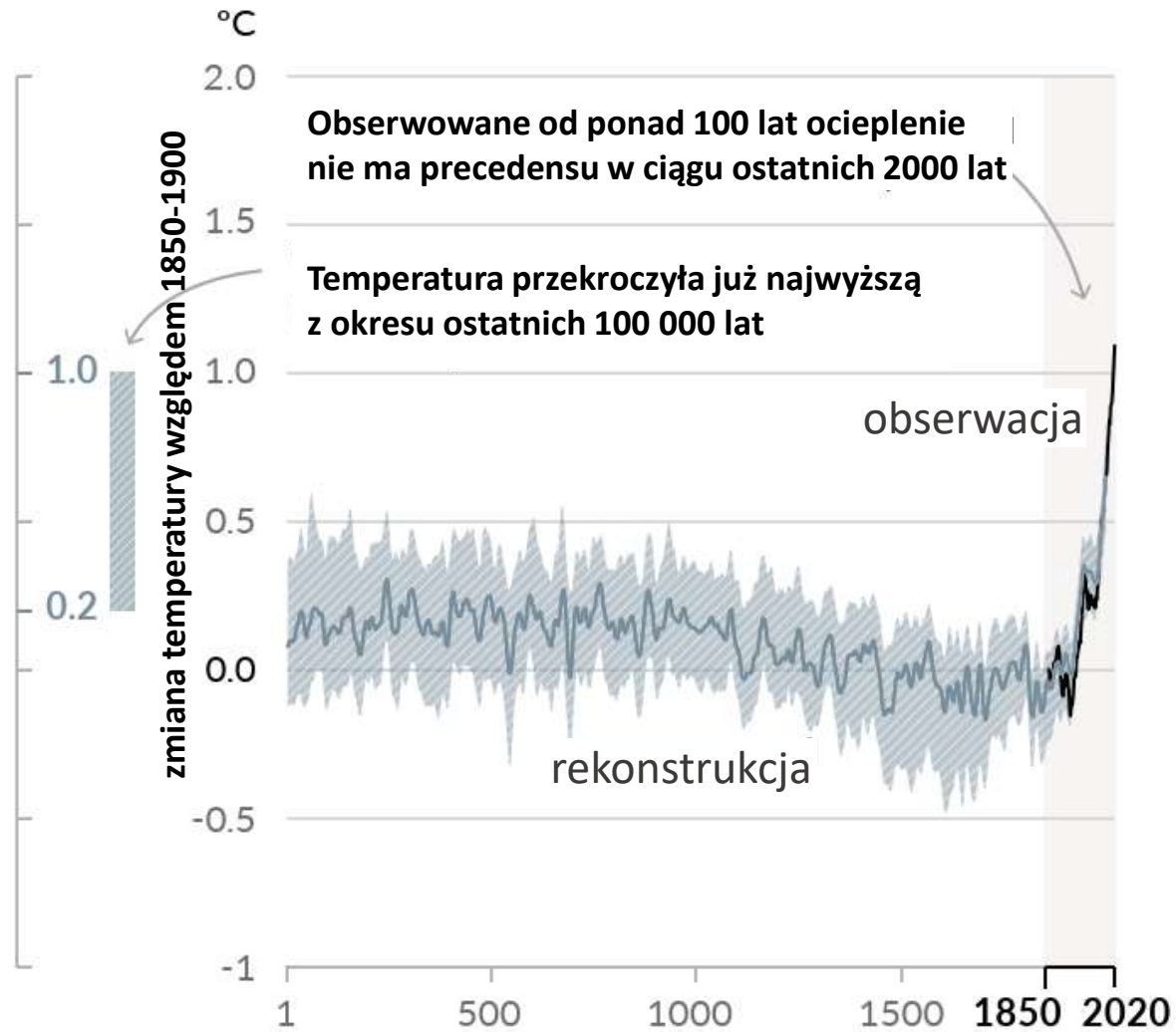
Zmiana klimatu to zmiana wzorców pogodowych i powiązane z nią zmiany w oceanach, powierzchni lądów i pokrywach lodowych, które definiują klimat lokalny, regionalny i globalny na Ziemi oraz zachodzą w skali czasowej trwającej dziesięciolecia lub dłużej.





SYSTEM KLIMATYCZNY to wzajemnie powiązany układ atmosfery, hydrosfery, biosfery, kriosfery i litosfery

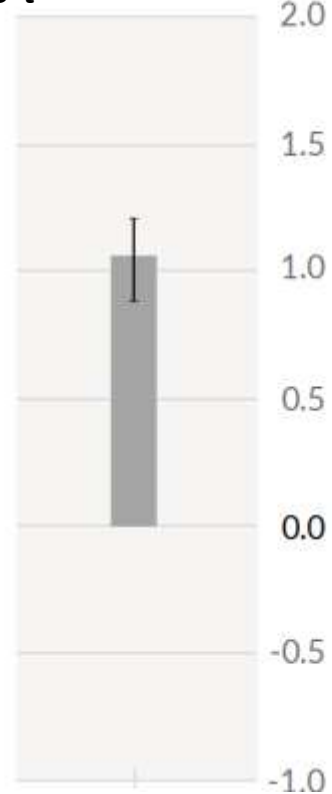
Współczesne ocieplenie klimatu



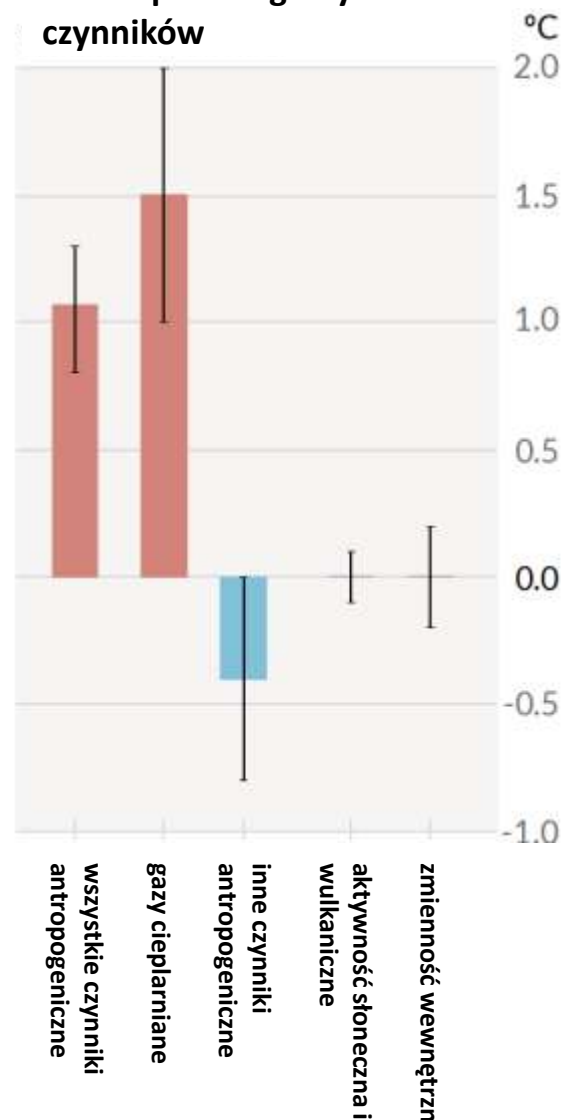
Działalność człowieka, w szczególności emisje gazów cieplarnianych zatrzymujących ciepło, powstające w wyniku spalania paliw kopalnych, wylesiania i zmiany użytkowania gruntów, są główną przyczyną zmian klimatycznych obserwowanych w epoce przemysłowej.

Czynniki wpływające na ocieplenie klimatu

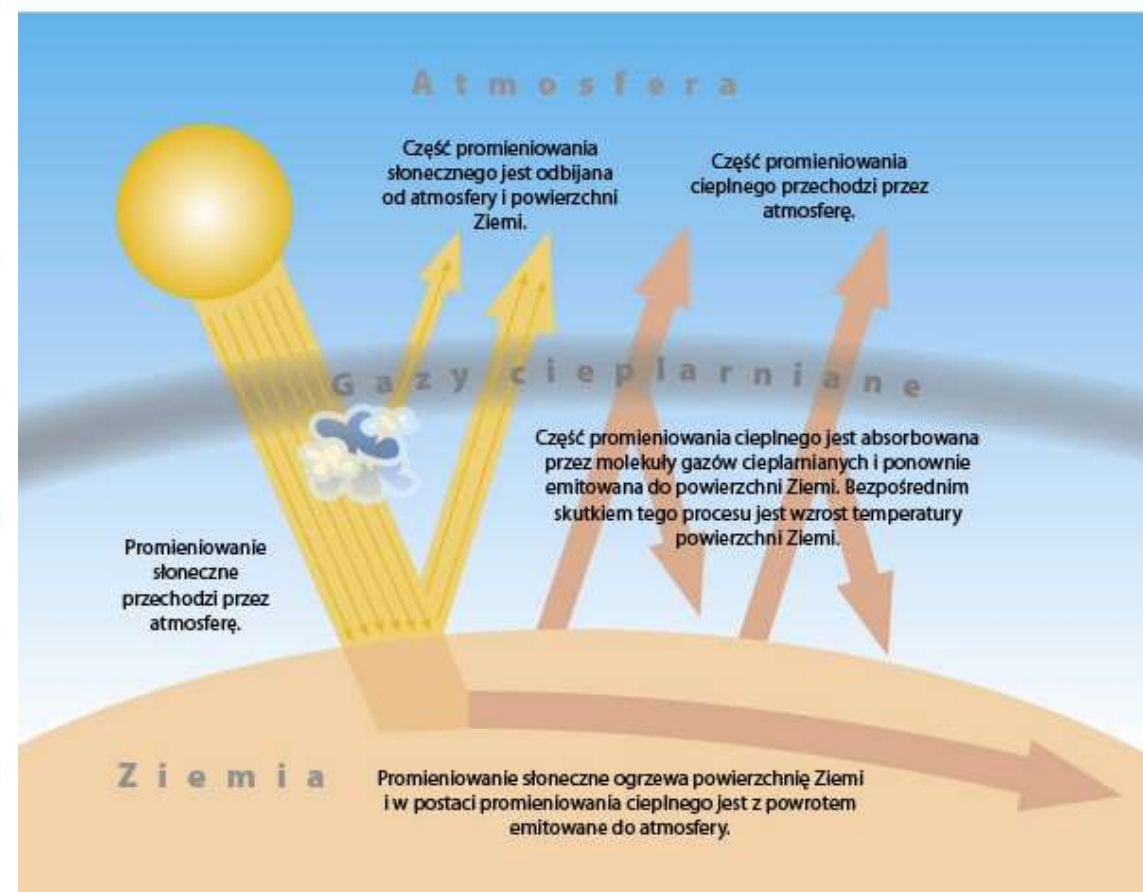
Obserwowane
ocieplenie 2010-2019
względem 1850-1990 °C



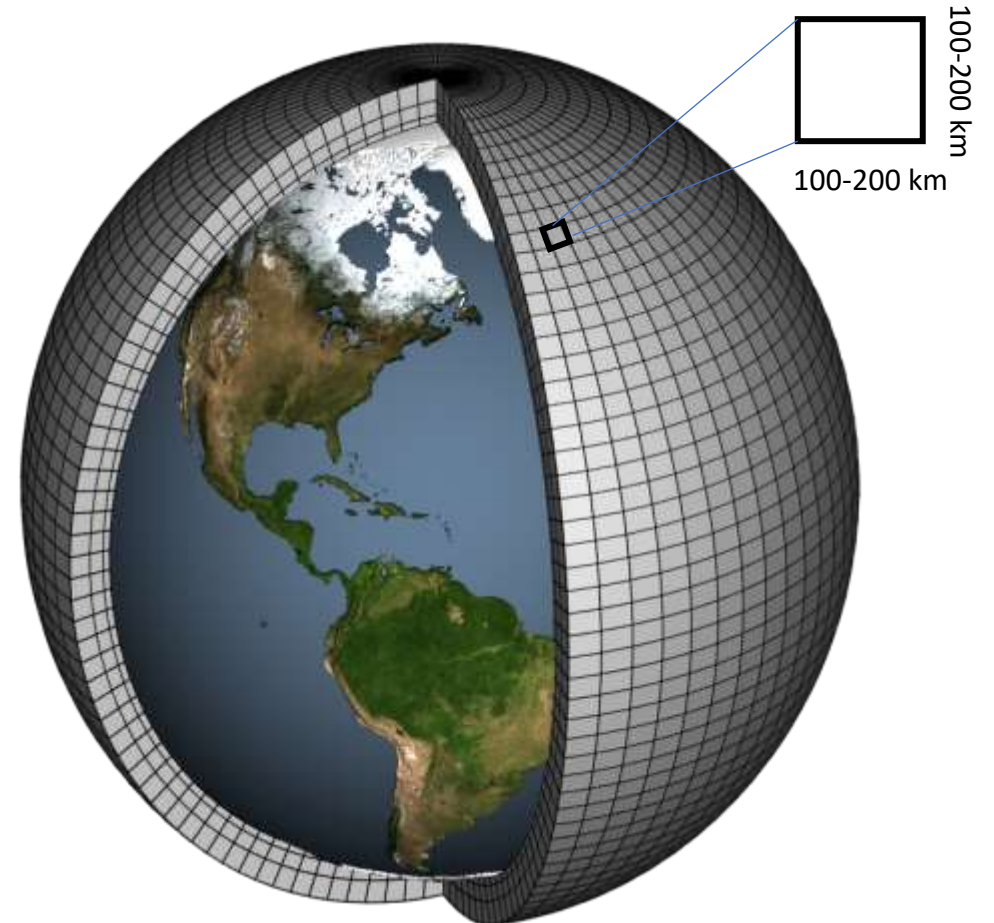
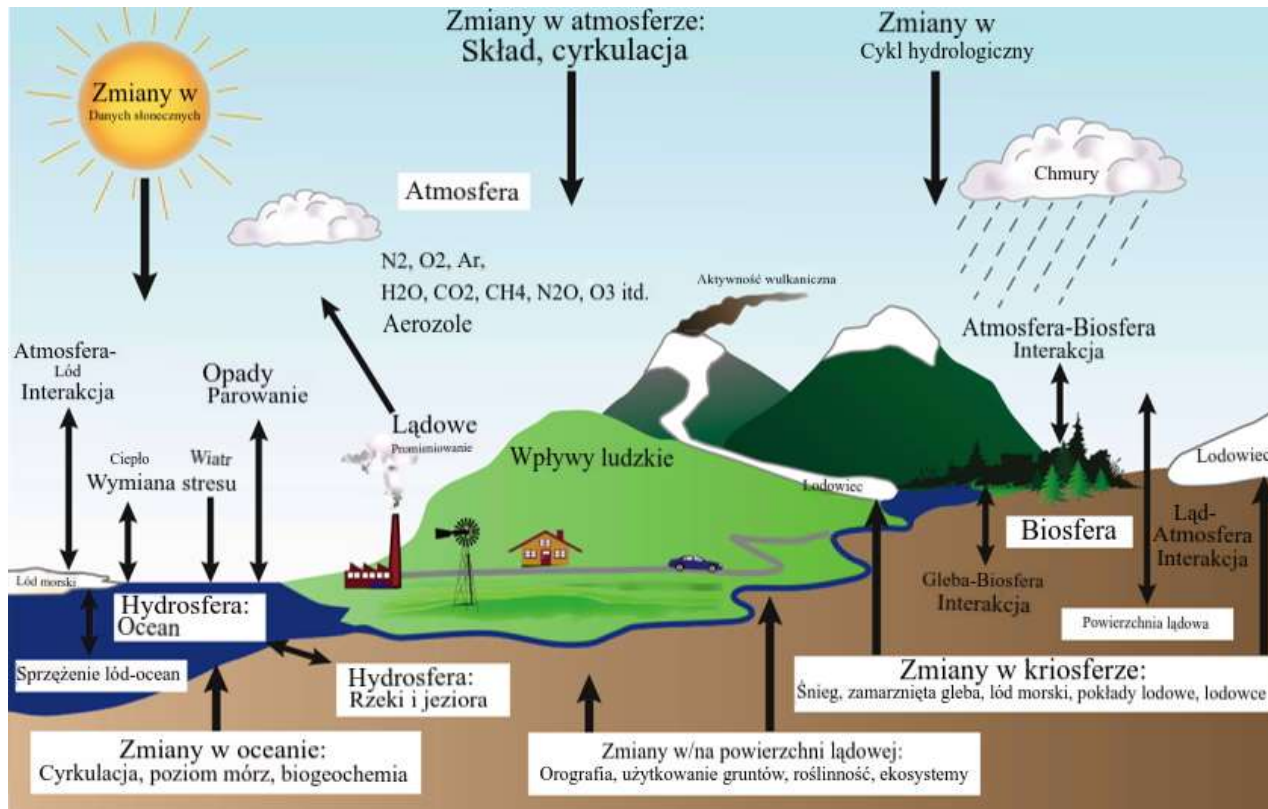
Wkład poszczególnych
czynników



EFEKT CIEPLARNIANY



[https://ziemianarozdrozu.pl/encyklopedia/12/efekt-cieplarniany-wprowadzenie,](https://ziemianarozdrozu.pl/encyklopedia/12/efekt-cieplarniany-wprowadzenie)
<http://student.agh.edu.pl/~angrzywa/>



Modele przedstawiają powierzchnię Ziemi i atmosferę jako wirtualny świat składający się z oddziałujących na siebie, trójwymiarowych pudełek.

Globalny model klimatu (GCM, *global climate model*)

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= \eta v - \frac{\partial \Phi}{\partial x} - c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} - z \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{\partial(\frac{u^2+v^2}{2})}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\eta \frac{u}{v} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} - c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} - z \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\partial(\frac{u^2+v^2}{2})}{\partial y} \\ \frac{\delta T}{\delta t} &= \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \\ \frac{\delta W}{\delta t} &= u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial p}{\partial \sigma} &= u \frac{\partial}{\partial x} x \frac{\partial p}{\partial \sigma} + v \frac{\partial}{\partial y} y \frac{\partial p}{\partial \sigma} + w \frac{\partial}{\partial z} z \frac{\partial p}{\partial \sigma}\end{aligned}$$

Modele klimatu i numerycznych modeli pogody są konstruowane przy użyciu 5 podstawowych zestawów równań

- **Równania ruchu**
- **Równania stanu**
- **Równania termodynamiczne**
- **Równanie bilansu wodnego**
- **Równanie bilansu masy**

Musimy zdać sobie sprawę, że te podstawowe równania wywodzą się fundamentalnych zasad fizyki i są dobrze nam znane.

Równania przepisywane są na kod komputerowy

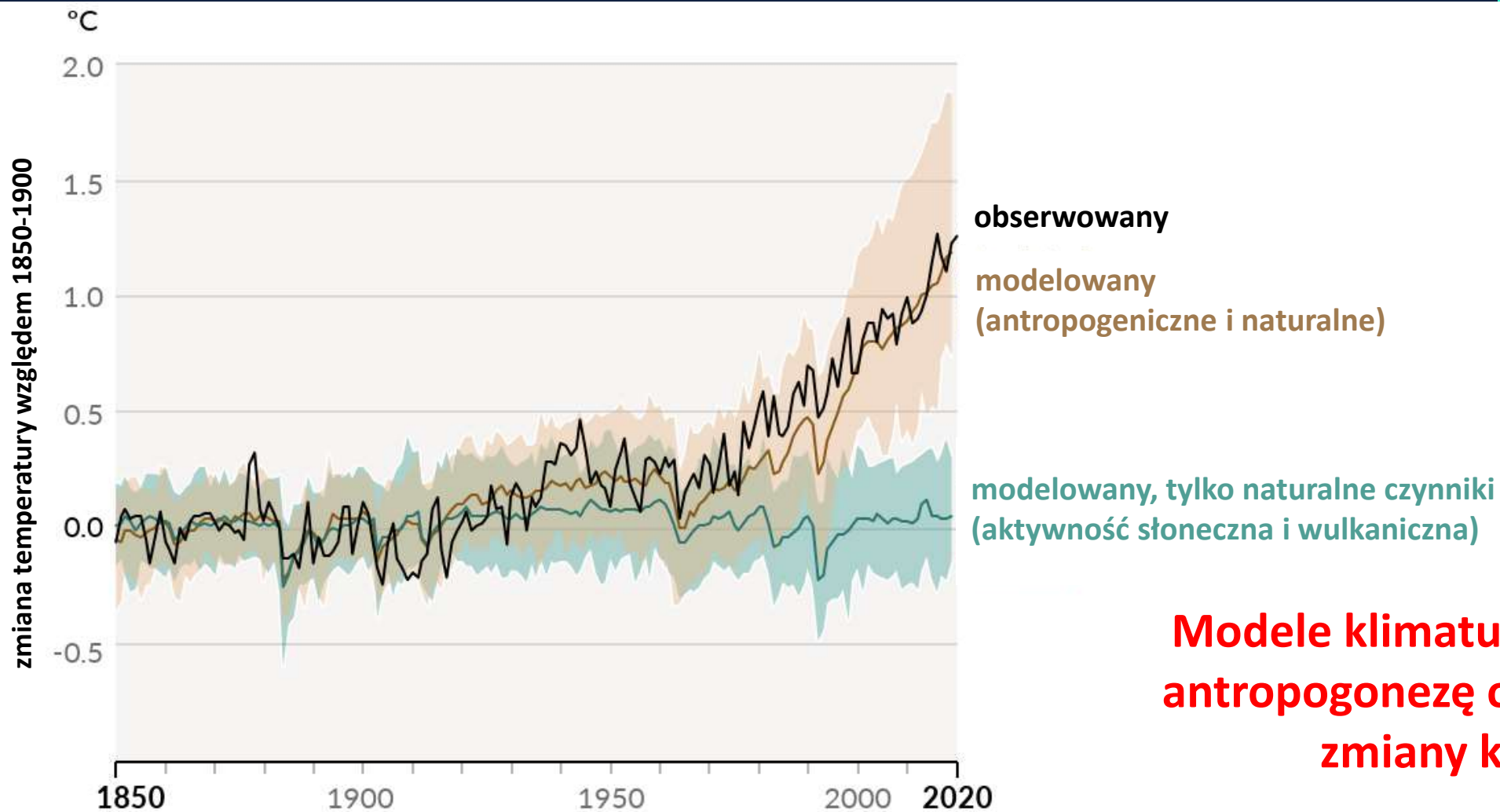
```
if (diagts .and. eots) then
  do 1500 m=1,nt
    do 1490 k=1,km
      fx = cst(j)*dym(j)*dzt(k)/(c2dtts*dtxccl(k))
      do 1480 i=2,intnl
        boxfx      = fx*dxt(i)*fm(i,k,jc)
        sddt       = (ta(i,k,m)-t(i,k,jc,nm,m))*boxfx
        svar       = (ta(i,k,m)**2-t(i,k,jc,nm,m)**2)
                   *boxfx
        n          = 0
        termbt(k,1,m,n) = termbt(k,1,m,n) + sddt
        tvar(k,m,n)    = tvar(k,m,n)      + svar
        n            = nhreg*(mskvr(k)-1) + mskhr(i,j)
        if (n .gt. 0 .and. mskhr(i,j) .gt. 0) then
          termbt(k,1,m,n) = termbt(k,1,m,n) + sddt
          tvar(k,m,n)    = tvar(k,m,n)      + svar
```



Superkomputer rozwiązuje równania
i zapisuje wyniki do plików



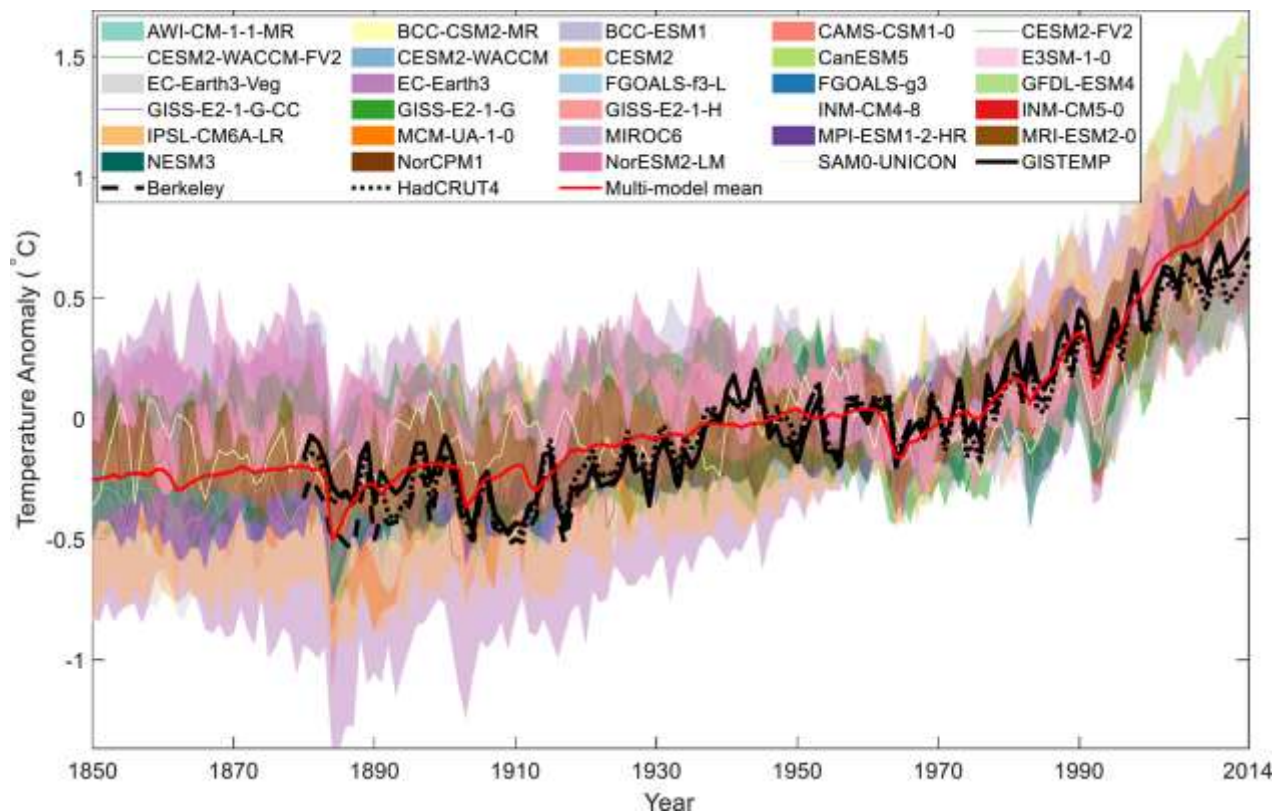
Antropogeneza obserwowanej zmiany klimatu



Modele klimatu potwierdzają antropogenezę obserwowanej zmiany klimatu

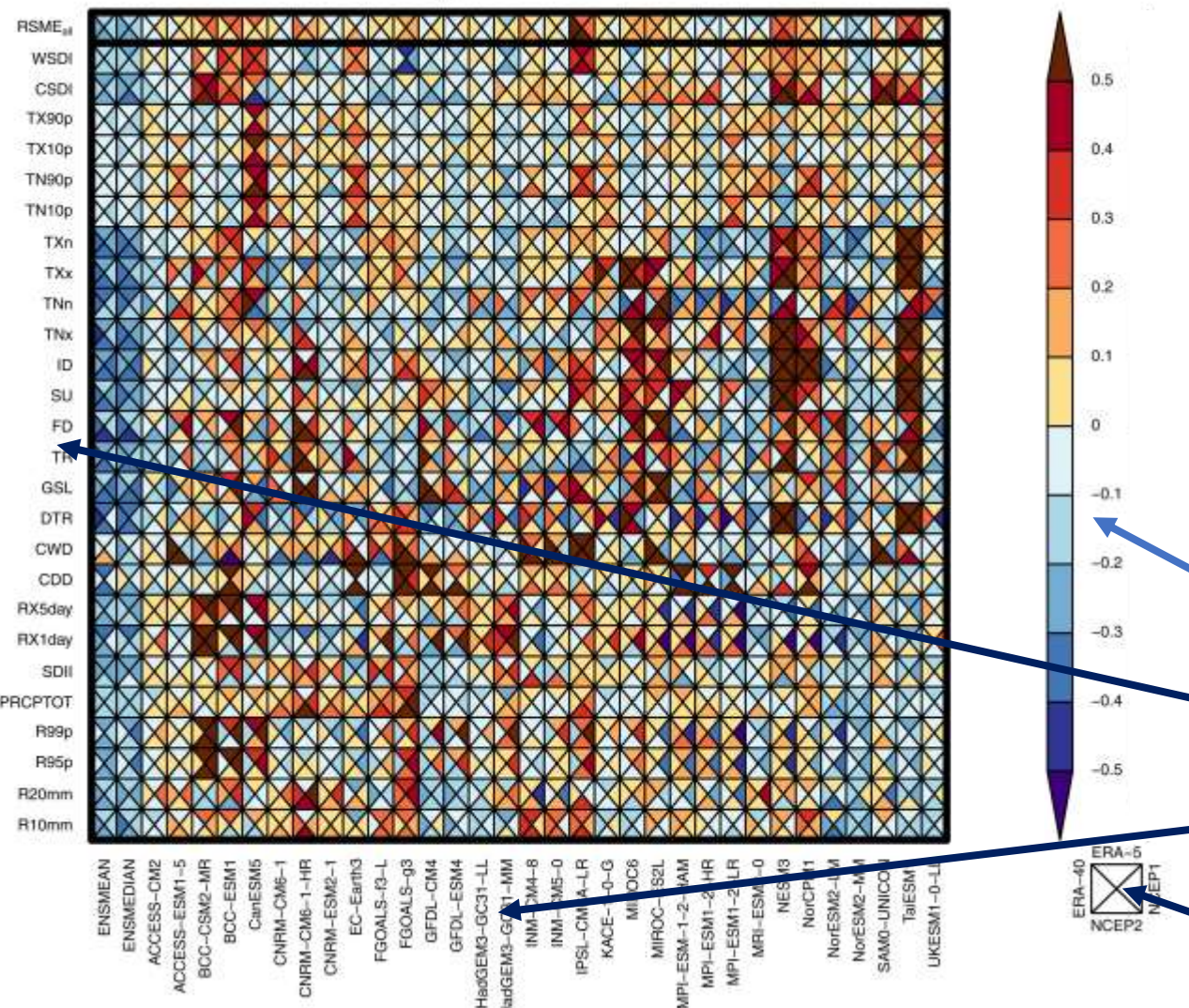
Ocena dokładności modeli (ewaluacja)

Modele są testowane i udoskonalane poprzez symulację klimatu z przeszłości a następnie sprawdzane, jak dobrze wyniki pokrywają się z obserwacjami



Ewaluacja modeli – porównanie z obserwowanym klimatem

CMIP6 global land 1981–2000



Modele różnią się dokładnością. Jedne mogą lepiej przewidywać opady, inne temperaturę. Niektóre lepiej radzą sobie z modelowaniem zjawisk ekstremalnych.

Docelowo korzystamy z **wiązki** najdokładniejszych **modeli**

błąd

wskaźników termicznych i opadowych

różnych modeli globalnych względem

różnych reanaliz

Niepewność, jak klimat będzie się zmieniał w przyszłości

Naturalna zmienność klimatu | Złożone procesy klimatyczne | Tempo przyszłych emisji

Wiele zestawów projekcji modeli klimatycznych

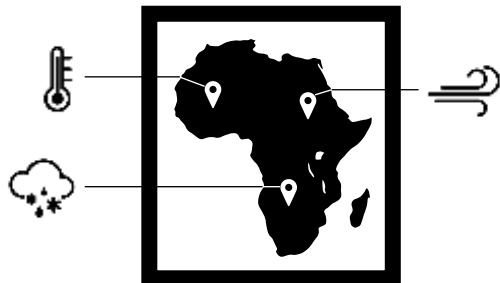


Wiele sposobów przedstawiania projekcji

Wszystkie mają swoje zalety i wady

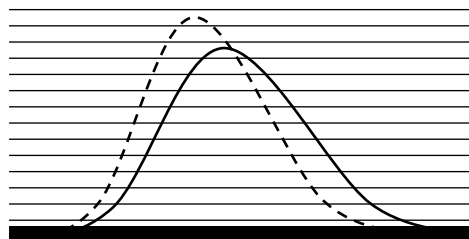
Infografiki

Łatwe do interpretacji, ale mogą nadmiernie podkreślać pewność



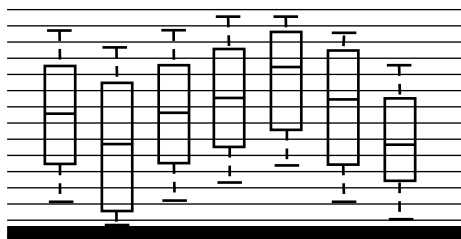
Oparte na prawdopodobieństwie

Wskazują poziom prawdopodobieństwa wystąpienia ekstremów, ale mogą być trudne w interpretacji



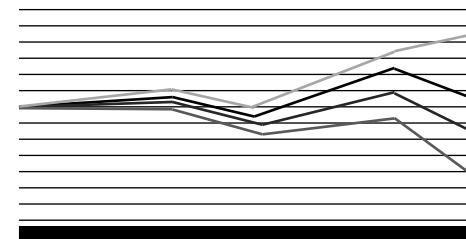
Zakresy

Podkreślają zakres w modelach, ale są trudne w interpretacji



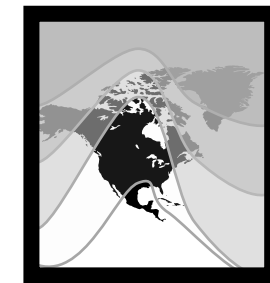
Szeregi czasowe

Podkreślają ekstrema i zmienność, mogą również obejmować zakres globalnych modeli klimatu



Mapy

Pokazują przestrzenne wzorce zmian, mogą również obejmować zakres globalnych modeli klimatu



Zmiany w:

- Lodowce i pokrywy lodowe
- Zmiana poziomu morza
- Lód morski
- Obfite opady deszczu na całym świecie
- Ekstremalna susza
- Spadek produktywności upraw
- Zmiany w ekosystemach
- Huragany
- Wzrost temperatury
- Zakwaszenie wody morskiej

Photo credit UCSUSA



Photo credit David Paul Morris, Bloomberg

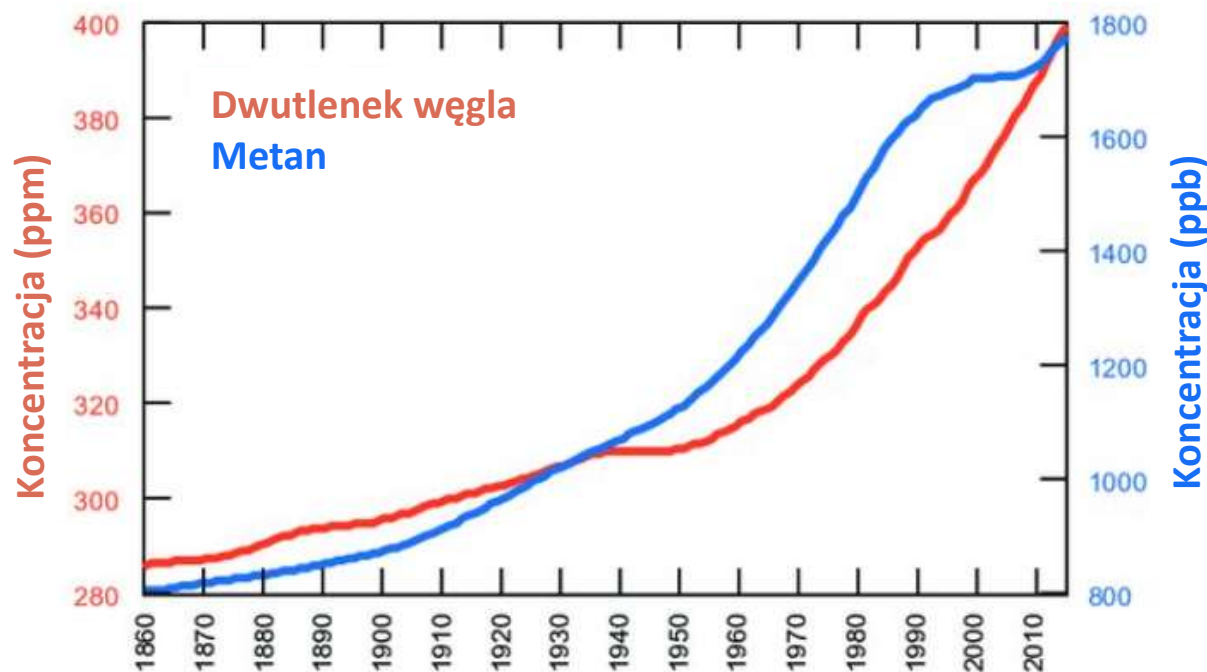


Photo credit AFP



Koncentracje gazów cieplarnianych w atmosferze

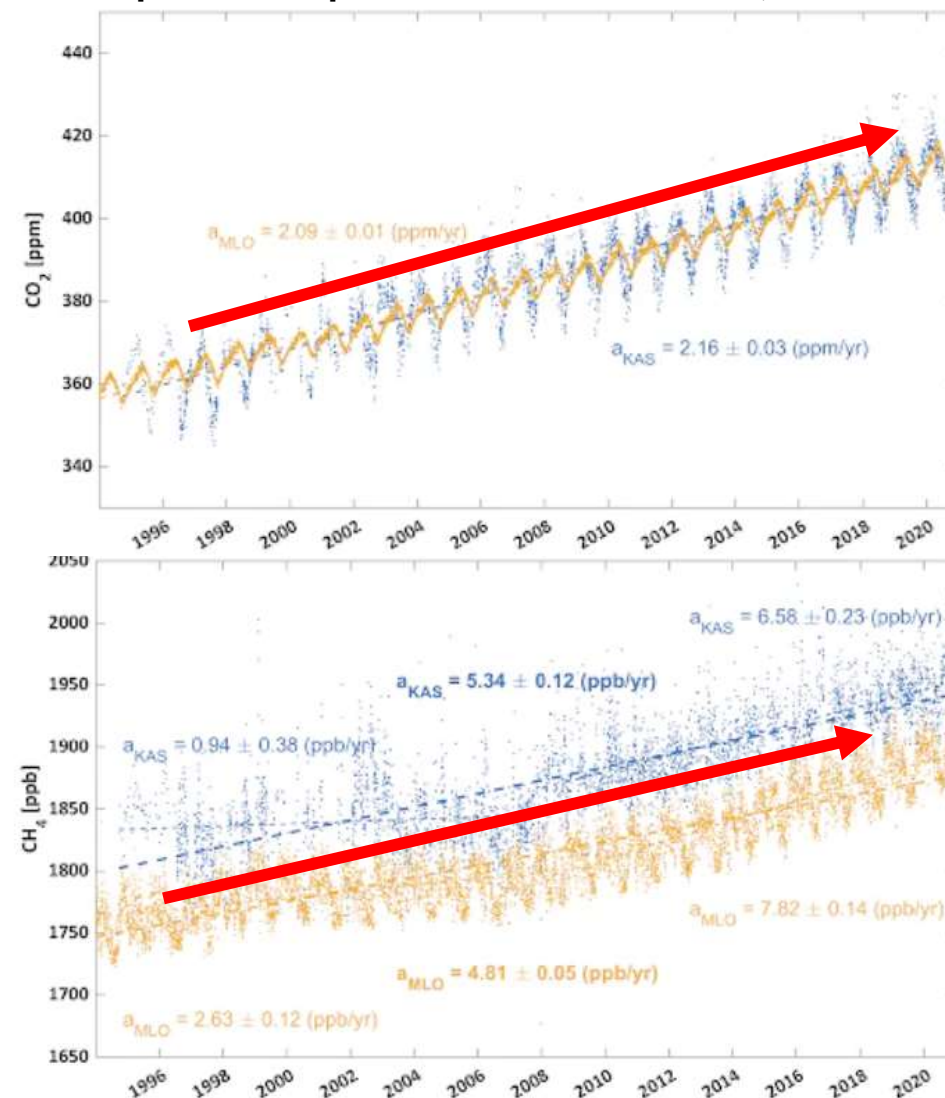
Koncentracja dwutlenku węgla i metanu zaczęła rosnąć wraz z początkiem epoki przemysłowej.



tłum. Adam Jaczewski za Ocko et al. (2018)

Metan jest 28rotnie silniejszym gazem cieplarnianym od dwutlenku węgla

Stężenie metanu i dwutlenku węgla na podstawie pomiarów AGH KASLAB, IMGW-PIB



Kraków przygotowuje się na kolejną falę upałów. Czas na kąpiele

Arkadiusz Maciejowski

1 lipca 2015, 6:00



20 lat od powodzi stulecia w Gdańsku

9 lipca 2021, godz. 07:00 (257 opinii) autor: Maciej Korolczuk

Historia



Najstydniejsze zdjęcie, dokumentujące powódź z 9 lipca 2001 roku. Zalane tory przy Dworcu Głównym w Gdańsku. "Wodospad" płynie z ul. 3 Maja, fotoreporter wykonał zdjęcie stojąc na wiadukcie w ciągu ul. Hicisko.

Trasa S8 w Warszawie zalana. Intensywne opady deszczu zmieniły jezdnię na ponad 10 kilometrów

Martyna Konieczek 31 sierpnia 2023, 10:32



Raport Międzyrządowego Panelu ds. Zmiany Klimatu (IPCC)

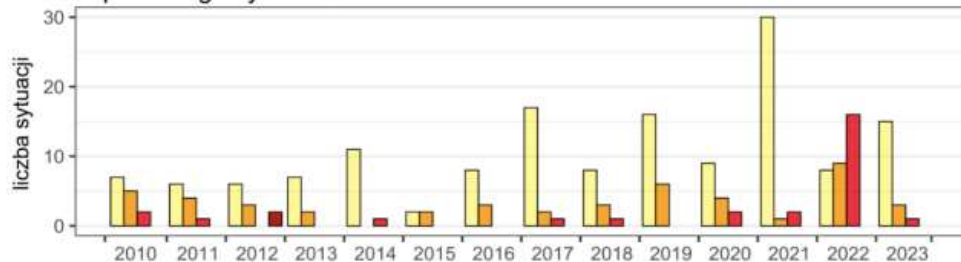
- Jest faktem stwierdzonym, że emisje gazów cieplarnianych wywołane przez człowieka doprowadziły do **zwiększenia częstotliwości i/lub intensywności ekstremalnych warunków pogodowych i klimatycznych** od czasów przedprzemysłowych.

Seneviratne, S.I. et al., 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi:10.1017/9781009157896.013.

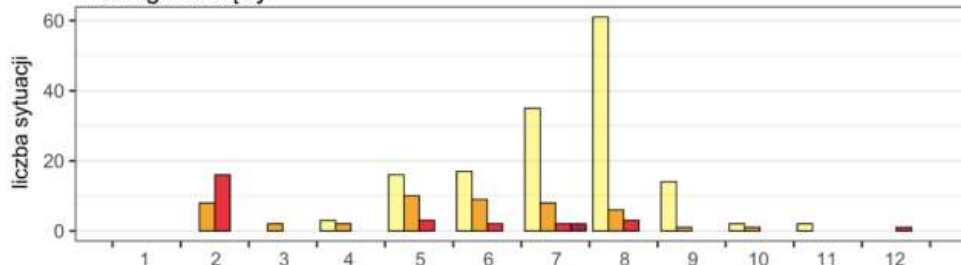


Trąby powietrzne w Polsce w latach 2010-2023

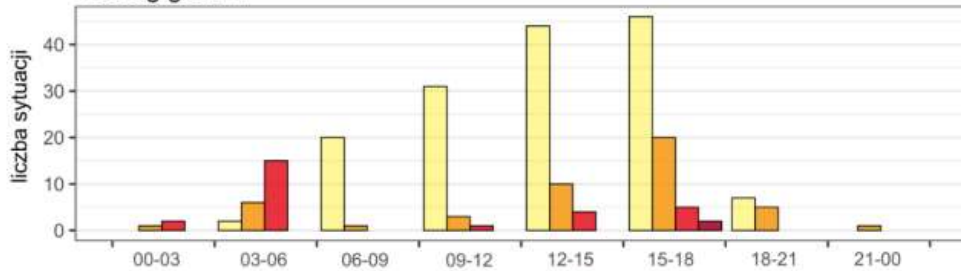
w poszczególnych latach



według miesięcy



według godzin*



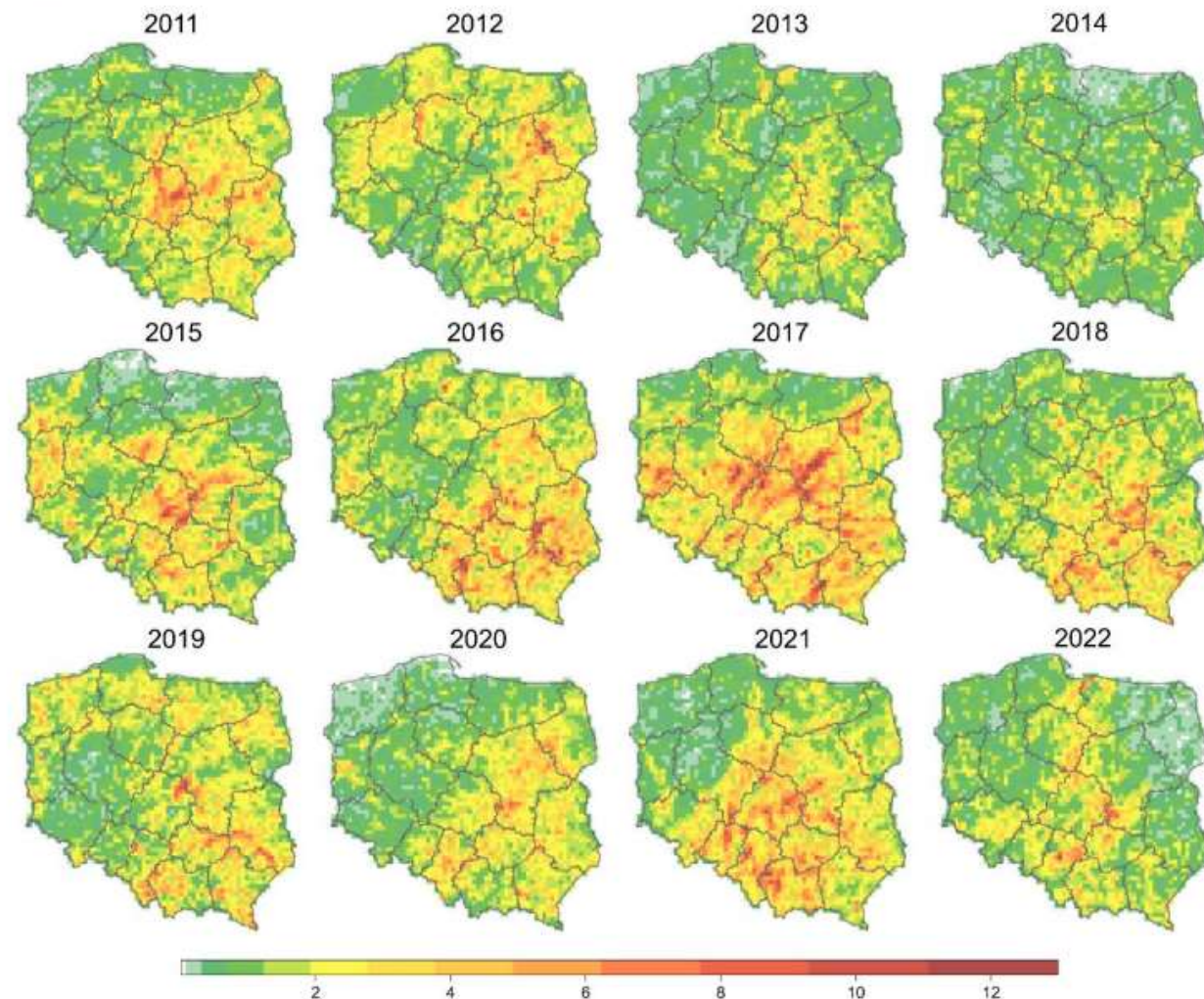
NO/F0 F1 F2 F3

*czas UTC
Dane: European Severe Weather Database

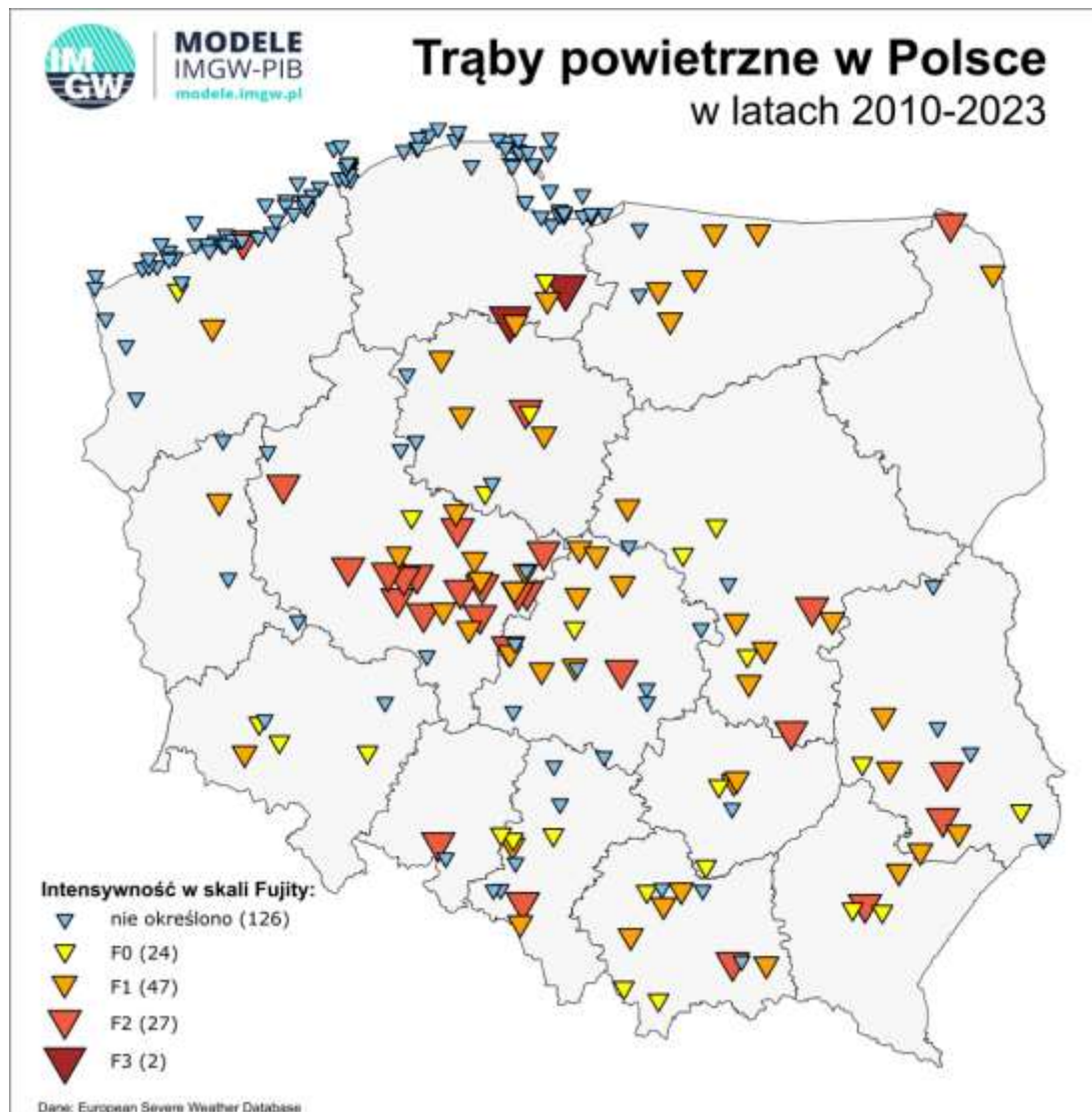


Liczba doziemnych wyładowań atmosferycznych

dane: PERUN (IMGW-PIB)

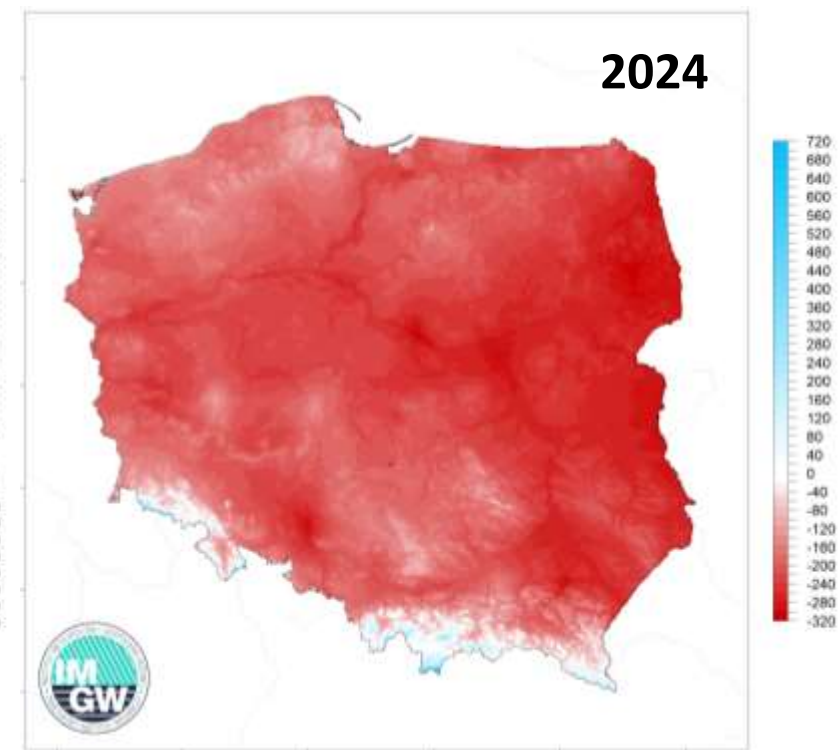
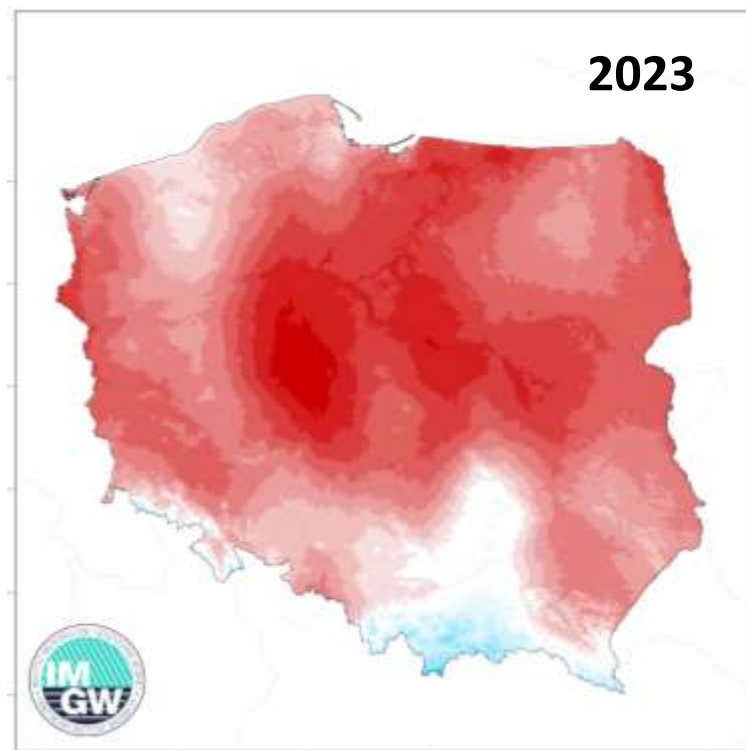
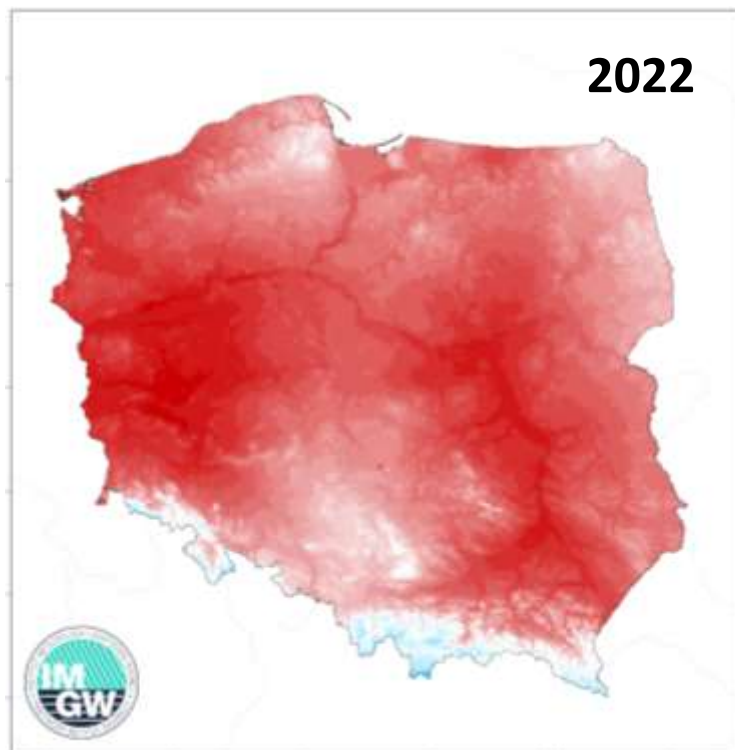


Rozkład przestrzenny występowania trąb powietrznych w Polsce w latach 2010-2023.



Oprac. własne na podstawie danych European Severe Weather Database

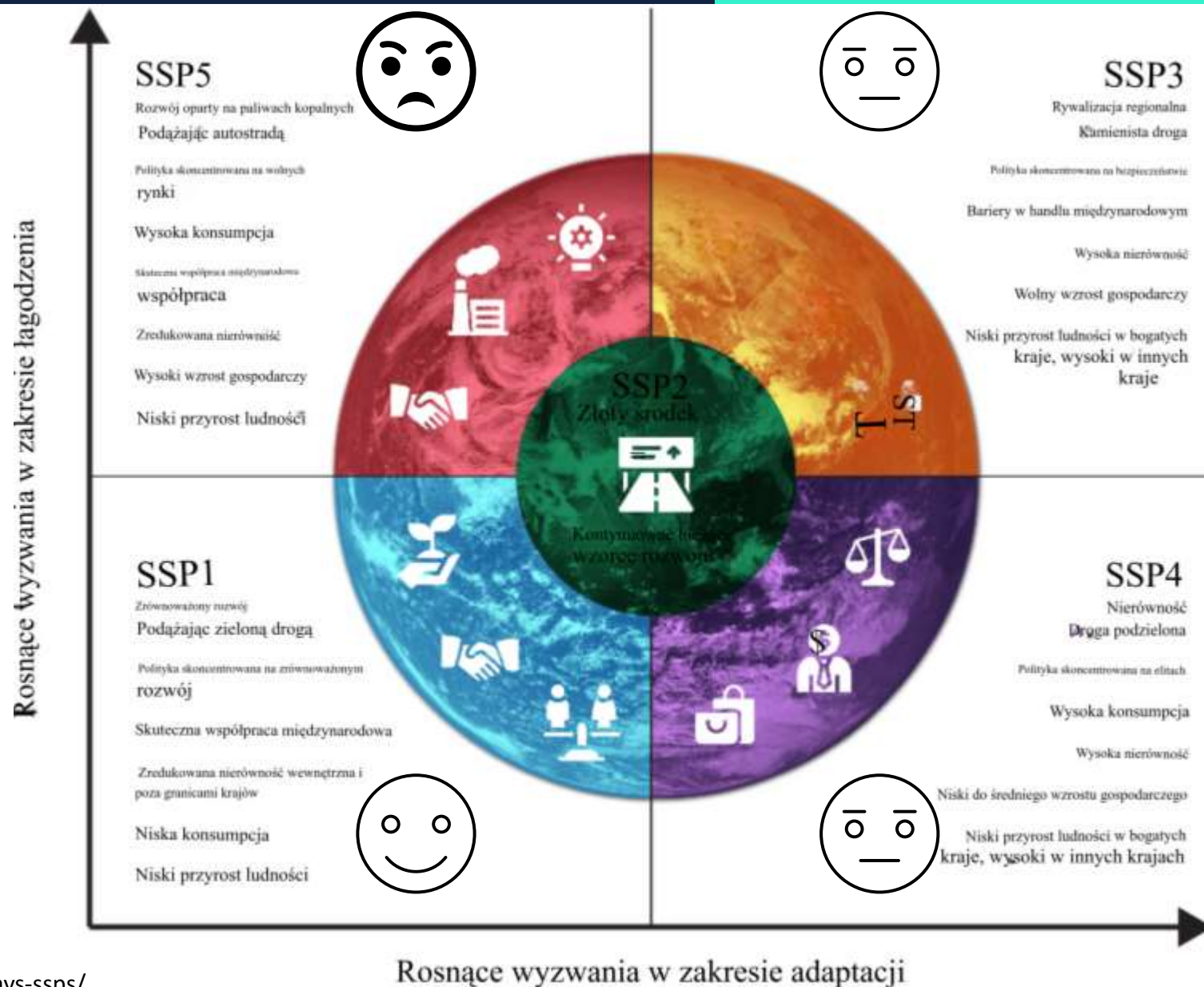
Sumaryczny klimatyczny bilans wodny (KBW) maj - październik



W kolejnych latach doświadczamy niedoboru wody w okresie dużego zapotrzebowania gospodarki na wodę

Scenariusze przyszłości

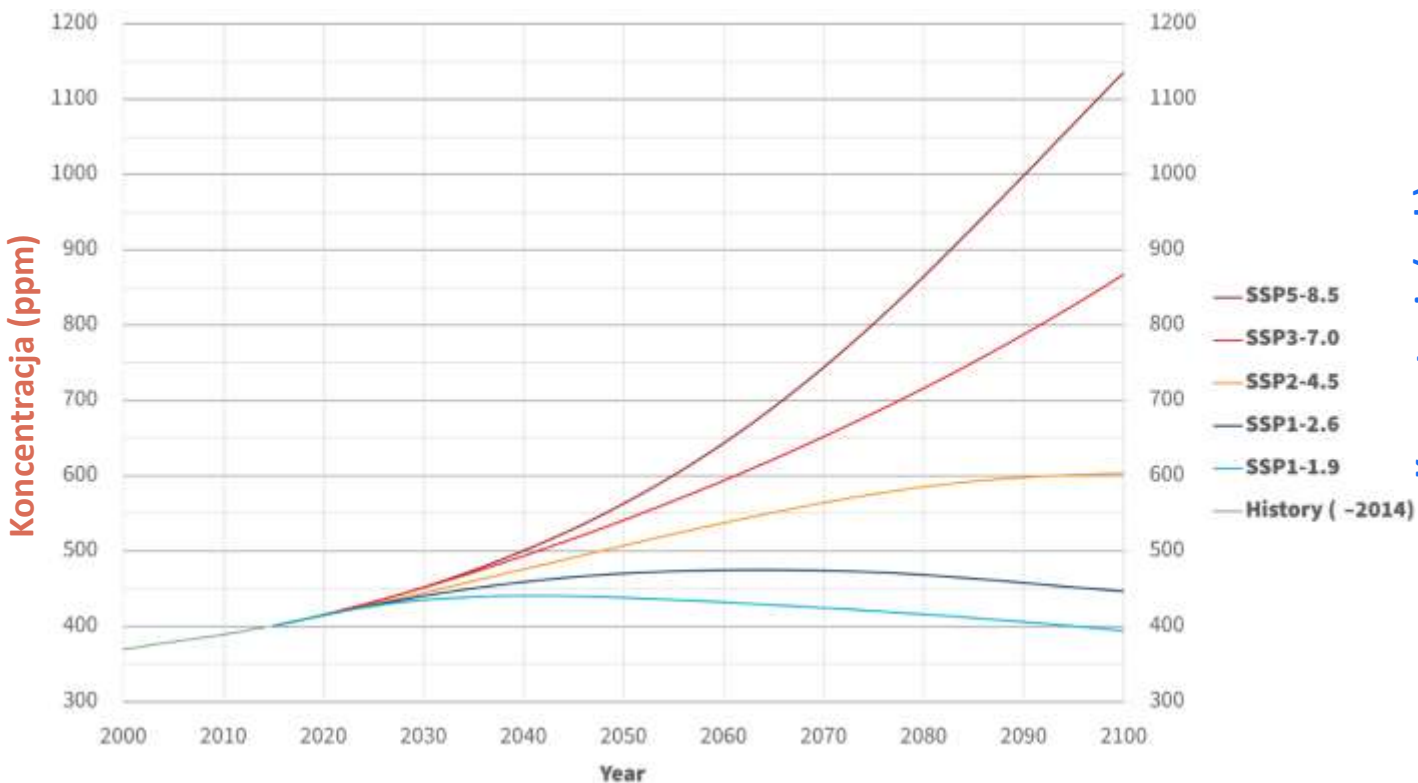
Obecnie scenariusze używane do scharakteryzowania możliwych przyszłych ścieżek rozwoju społeczeństw ludzkich są znane jako **Wspólne Ścieżki Społeczno-Ekonomiczne (w skrócie SSP)**. Opierają się one na założeniach dotyczących tego, jak **populacja, edukacja, zużycie energii, technologia** – i nie tylko – mogą się zmienić w ciągu następnego stulecia, i łączą je z założeniami dotyczącymi poziomu ambicji w zakresie adaptacji do zmiany klimatu. **Czynniki społeczno-ekonomiczne i ambicje w zakresie łagodzenia zmiany klimatu przekładają się na scenariusze emisji gazów cieplarnianych.**



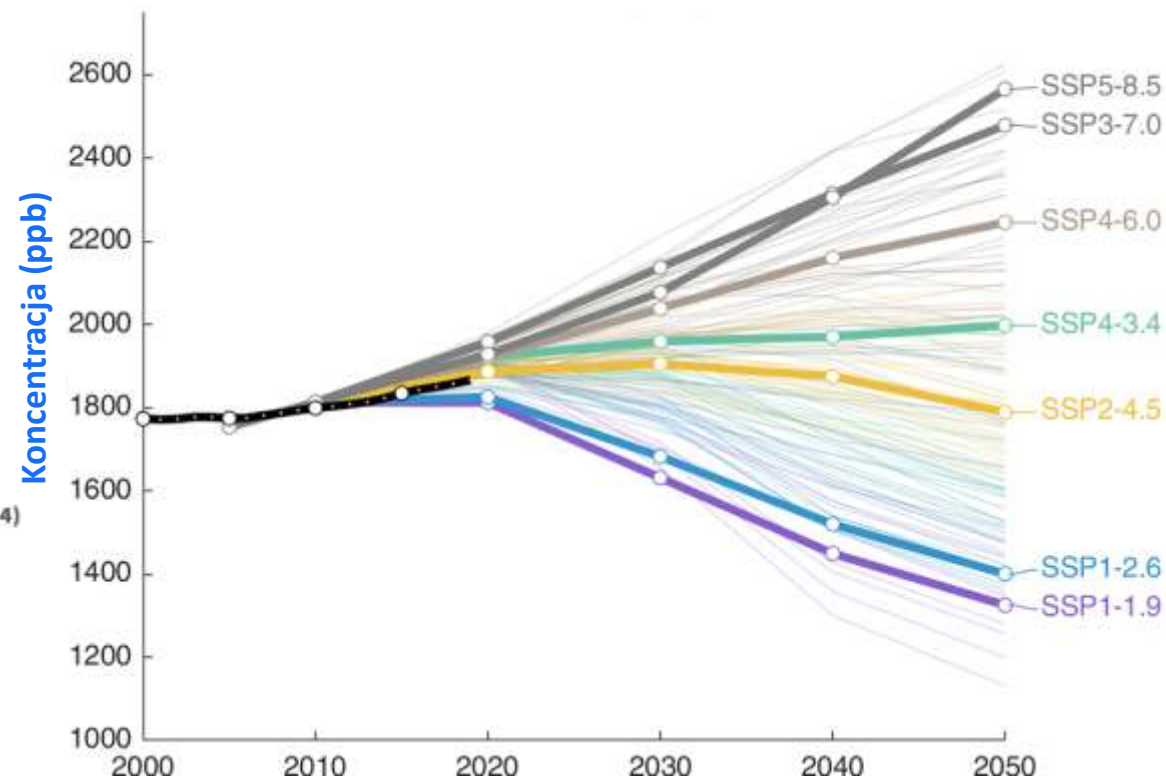
Przewidywane emisje gazów cieplarnianych w przyszłości



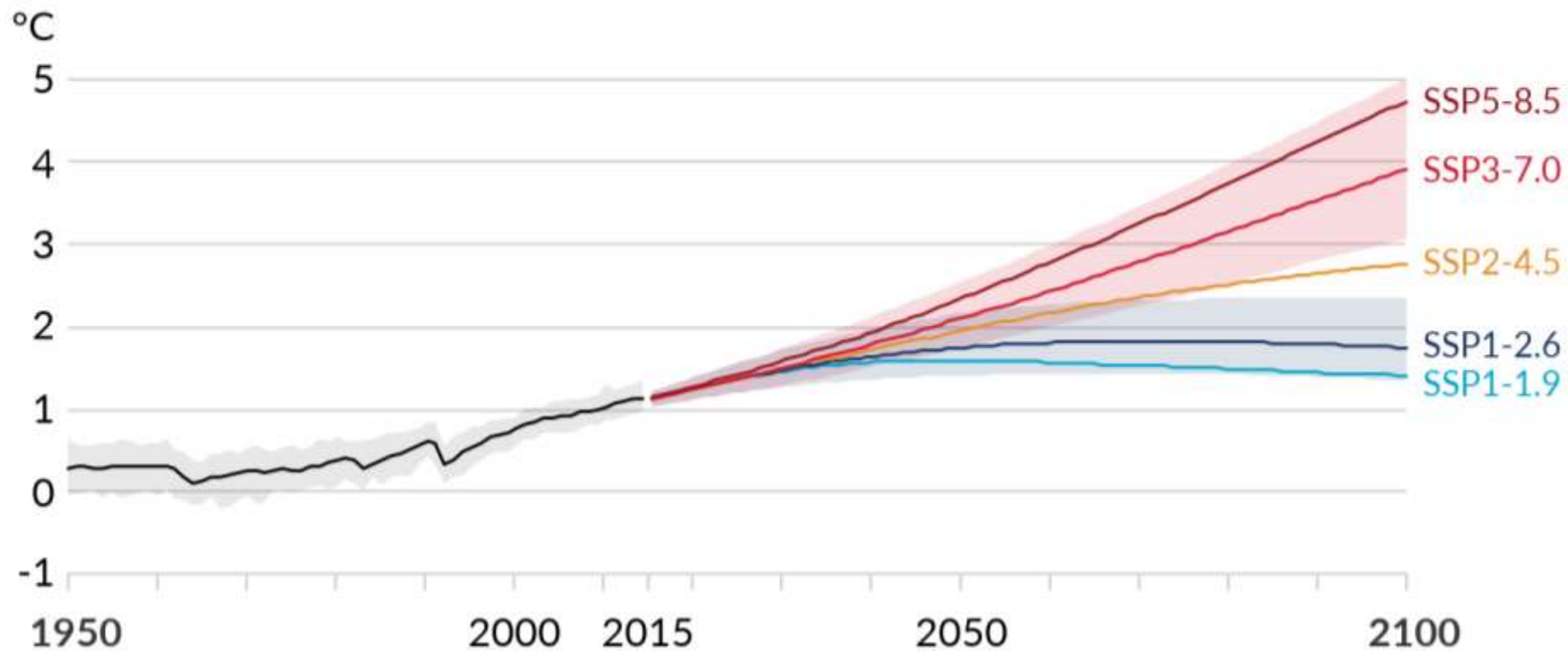
Dwutlenek węgla



Metan



Zmiana globalnej temperatury względem średniej z okresu 1850-1900



ADAPTACJA

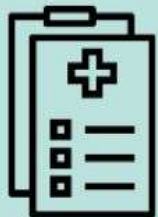
dostosowanie gospodarki, społeczeństwa oraz środowiska do skutków zmiany klimatu



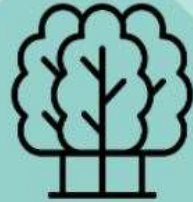
ochrona przeciwpowodziowa



konstrukcja infrastruktury budynków



zarządzenie kryzysowe i ciągłość działania



zielen miejska



oszczędzanie wody i energii

ŁAGODZENIE

ograniczanie emisji gazów cieplarnianych i zwiększenie ich pochłaniania przez ekosystemy



zrównoważony transport

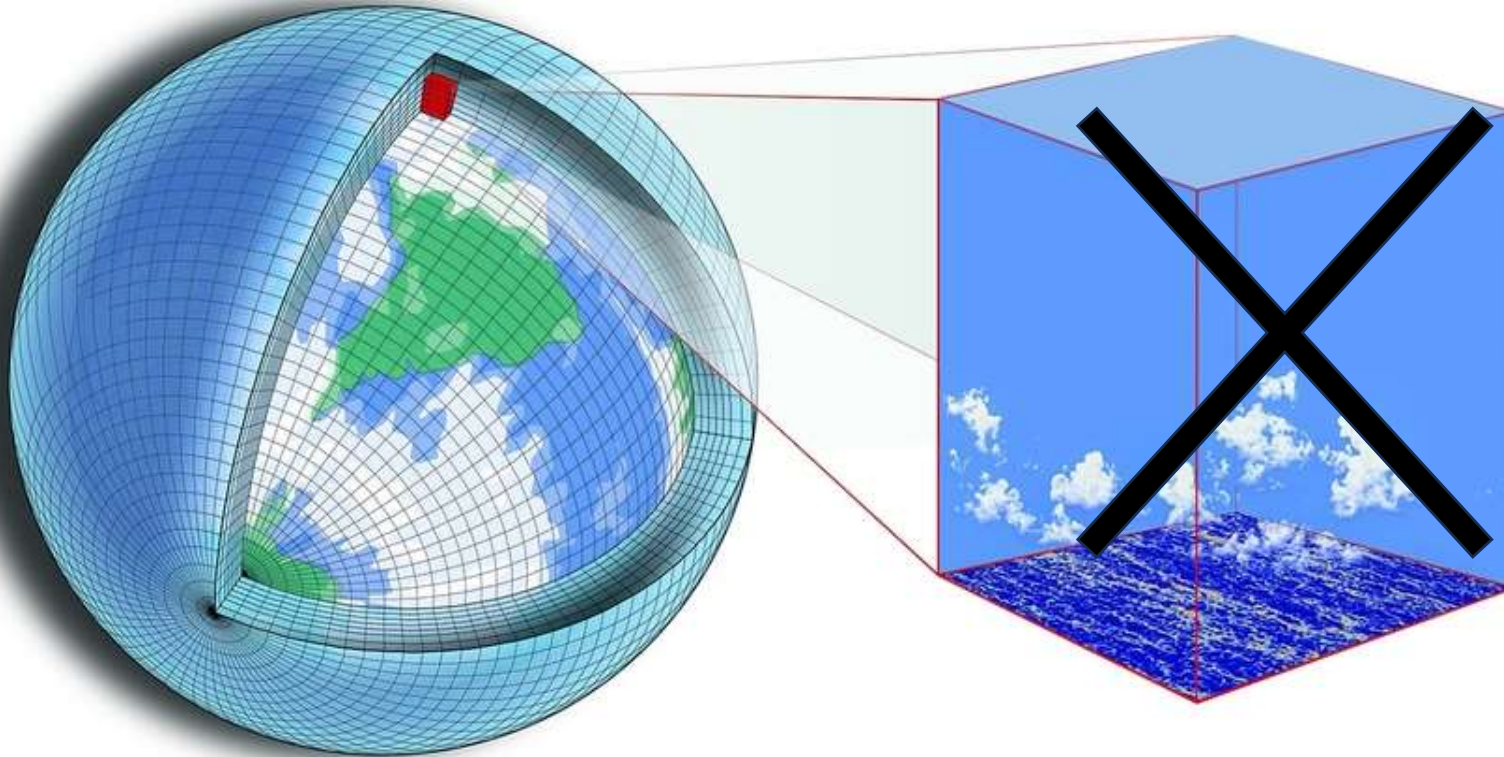


efektywność energetyczna

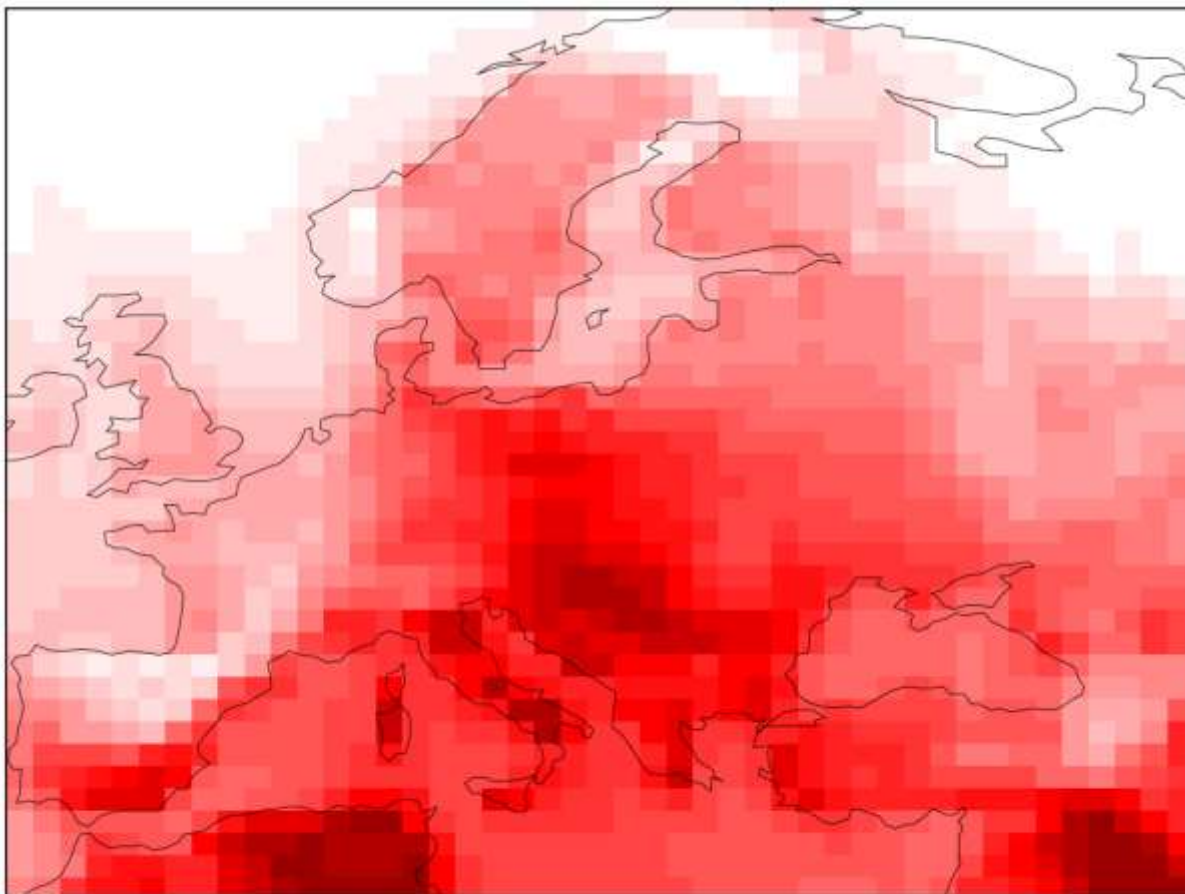


energia odnawialna

Do określenia zakresu tych działań niezbędna jest wiedza o rodzaju i poziomie zagrożeń jakie wywoła zmiana klimatu w przyszłości



Model globalny nie pozwala na symulowanie procesów zachodzących w mniejszej skali czy ekstremalnych zjawisk pogodowych i klimatycznych. Wykorzystanie jego wyników w w skali lokalnej jest ograniczone. Można go wykorzystać do oceny działań adaptacyjnych o większym zasięgu przestrzennym.



Temperatura powietrza przy powierzchni [stopnie Celsiusa]

10 16 22 28 34 40

Przy rozdzielczości modelu globalnego rzędu 100 km odwzorowanie zjawisk zachodzących w mniejszych skalach jest niedokładne lub niemożliwe

Model oceny oddziaływania (*impact model*)

ADAPTACJA

dostosowanie gospodarki, społeczeństwa oraz środowiska do skutków zmiany klimatu



ochrona przeciwpowodziowa

konstrukcja infrastruktury budynków



zarządzenie kryzysowe i ciągłość działania



zielen miejska



oszczędzanie wody i energii

ŁAGODZENIE

ograniczanie emisji gazów cieplarnianych i zwiększenie ich pochłaniania przez ekosystemy



efektywność energetyczna

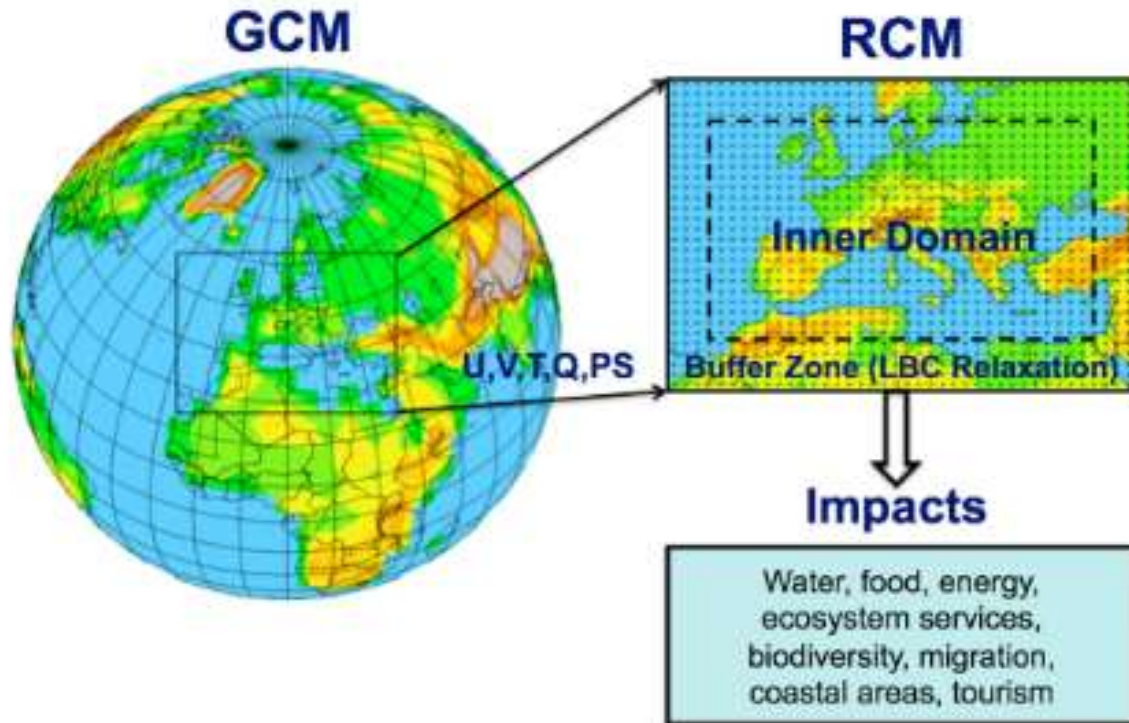


zrównoważony transport



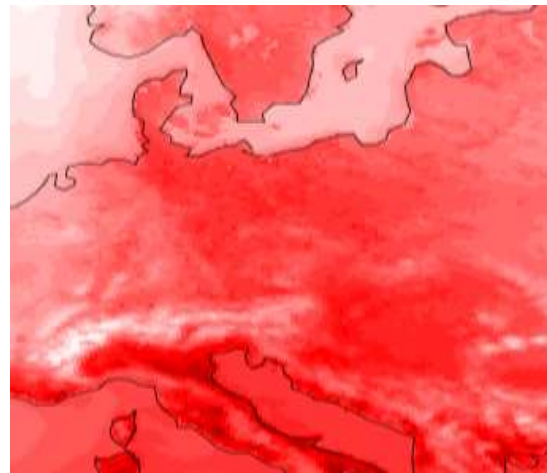
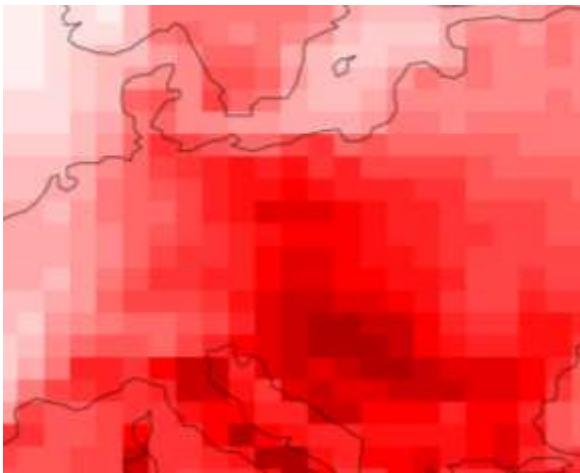
energia odnawialna

Do określenia zakresu tych działań adaptacyjnych wykorzystuje się modele oceny oddziaływania, które w większości wymagają rozdzielczości przynajmniej 50 km

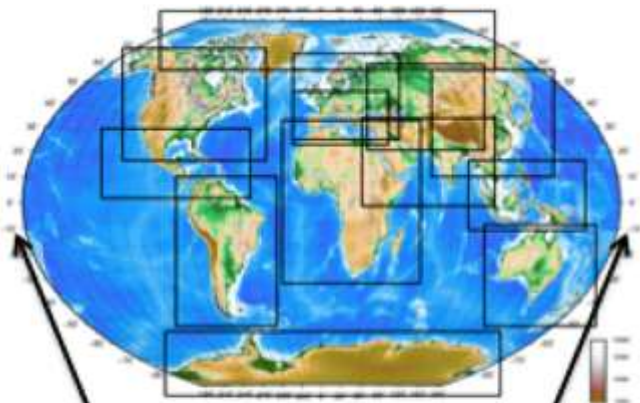


W celu uzyskania większej rozdzielczości model globalny poddajemy regionalizacji (downscalingowi). Jednym z najczęściej używanych metod regionalizacji jest **downscaling dynamiczny**, w którym w modelu globalnym (GCM) „zanurzamy” regionalny modelu klimatu (RCM).

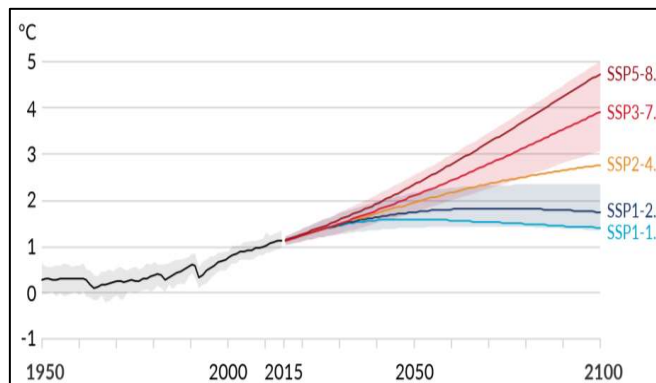
Wynik **downscalingu** stanowi wejście dla **modeli impaktowych**. Zastosowanie w ocenach **podatności, skutków i adaptacji**



wiele domen

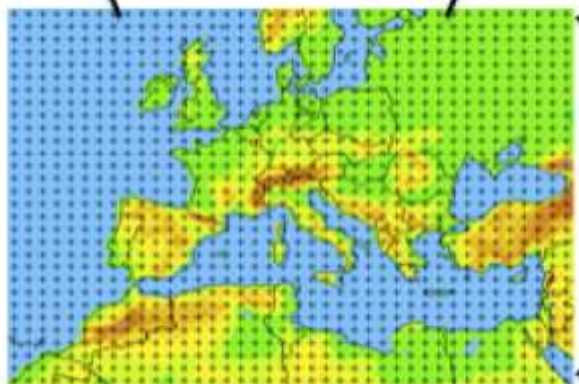


wiele scenariuszy

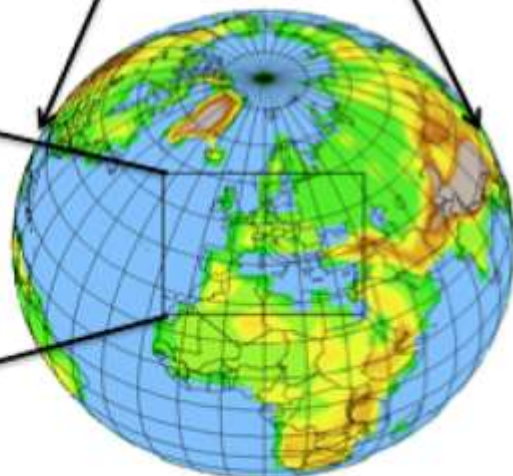


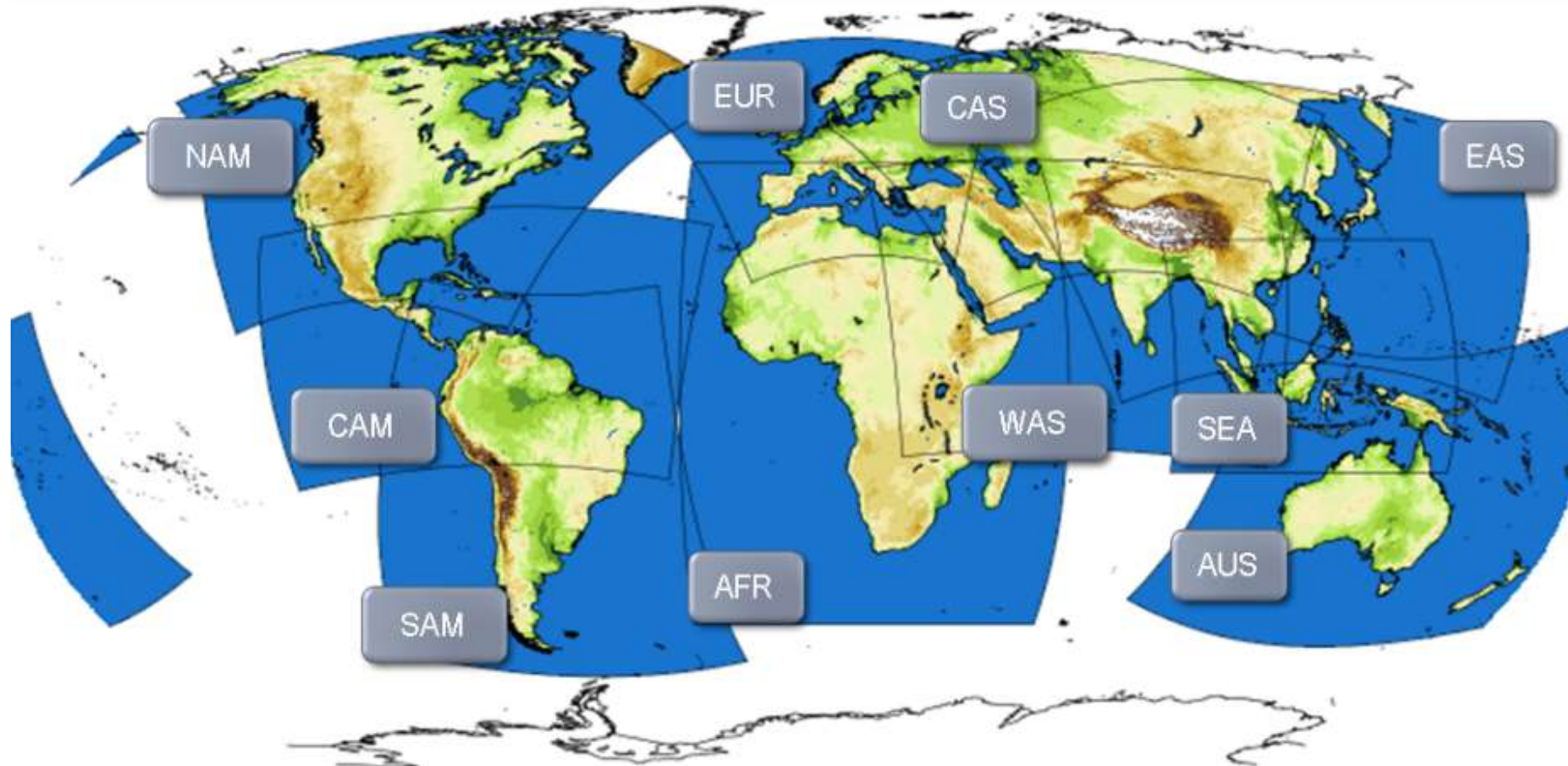
Regionalizacji poddaje się **wiele modeli globalnych** z użyciem **wielu modeli regionalnych** i **wielu scenariuszy**.

wiele modeli regionalnych



wiele modeli globalnych





W celu uzyskania zgodnych metodycznie wyników proces ten jest koordynowany przez inicjatywę **CORDEX** i prowadzony osobno dla każdego z kontynentów.

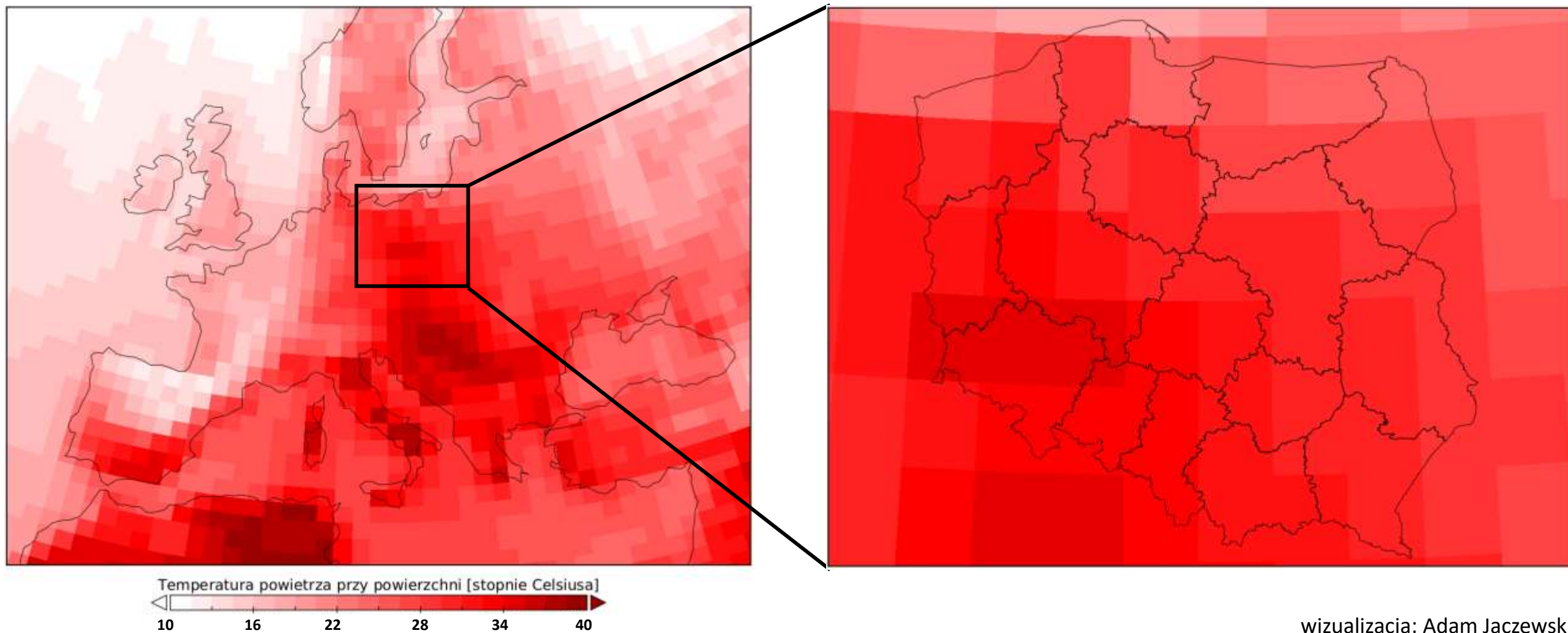
CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiments)



Centrum Modelowania
Meteorologicznego IMGW-
PIB przystąpiło do inicjatywy
EURO-CORDEX, w ramach
której wykonuje modelami
WRF, ICON i COSMO
symulacje historyczne 1951-
2014 i scenariuszowe 2015-
2100 w rozdzielczości 12,5 km
dla Europy.

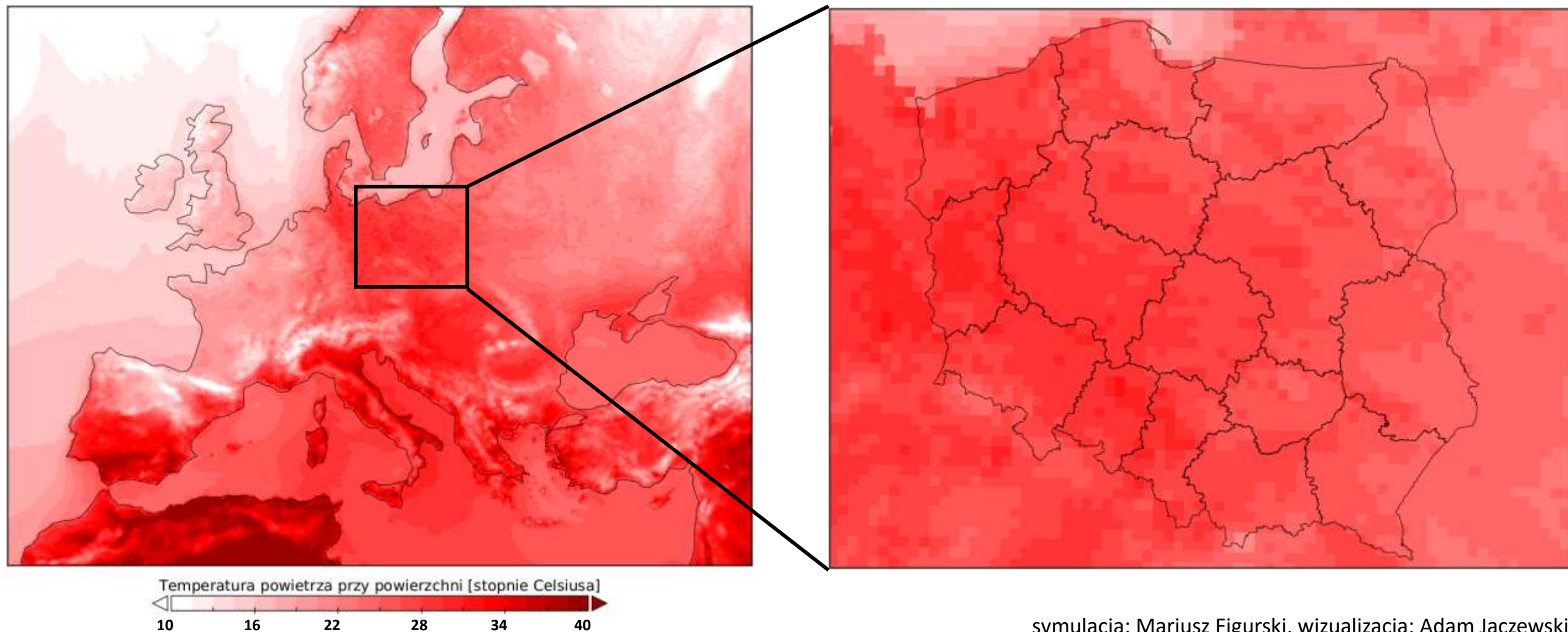
Rozdzielczość modelu globalnego

wybrane pole temperatury (7 lipca 1970) na przykładzie globalnego modelu klimatu CMCC-CM2-SR5 (100 km)



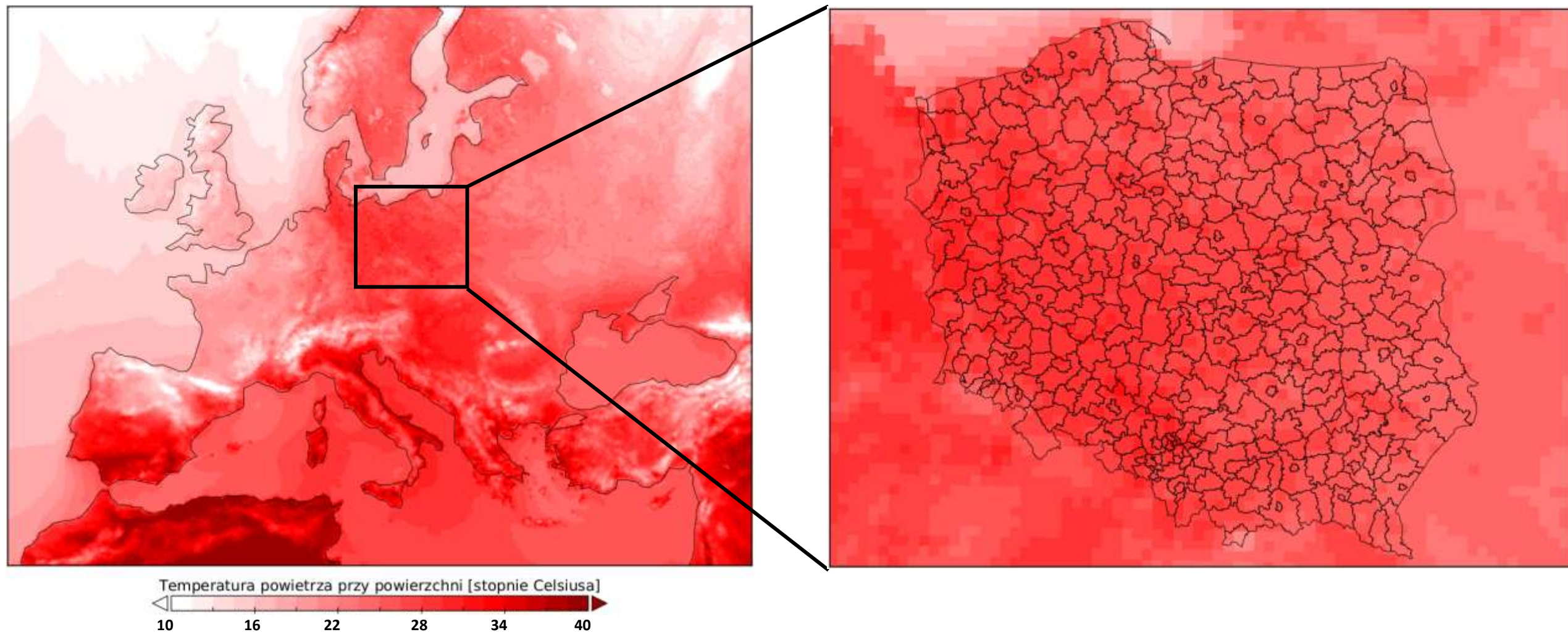
Przykład downscalingu - temperatura

wynik downscalingu za pomocą regionalnego modelu klimat WRF pozwala na uzyskanie większej dokładności (12,5 km)

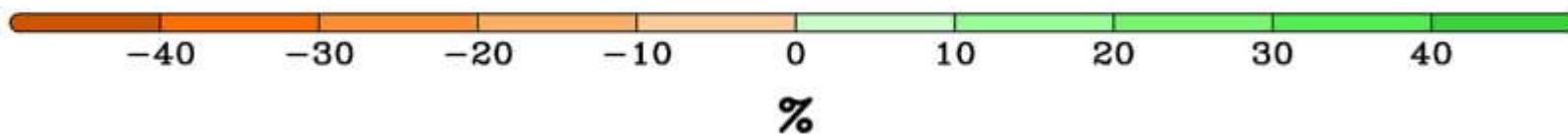
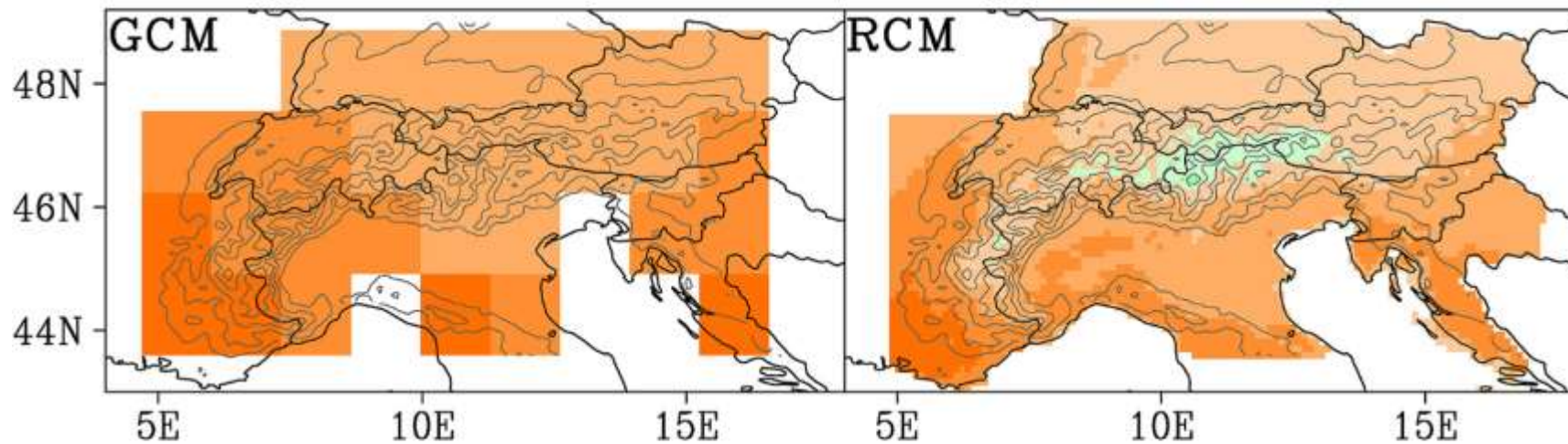
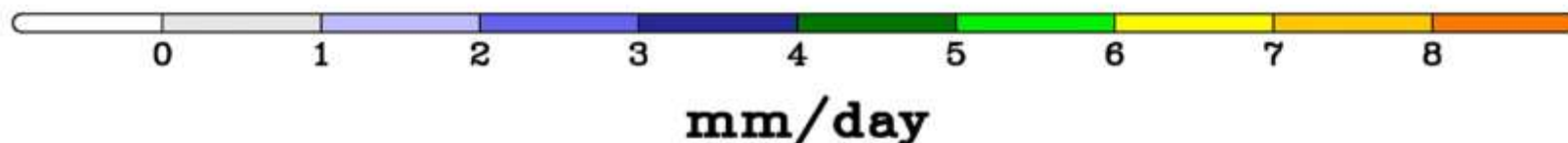
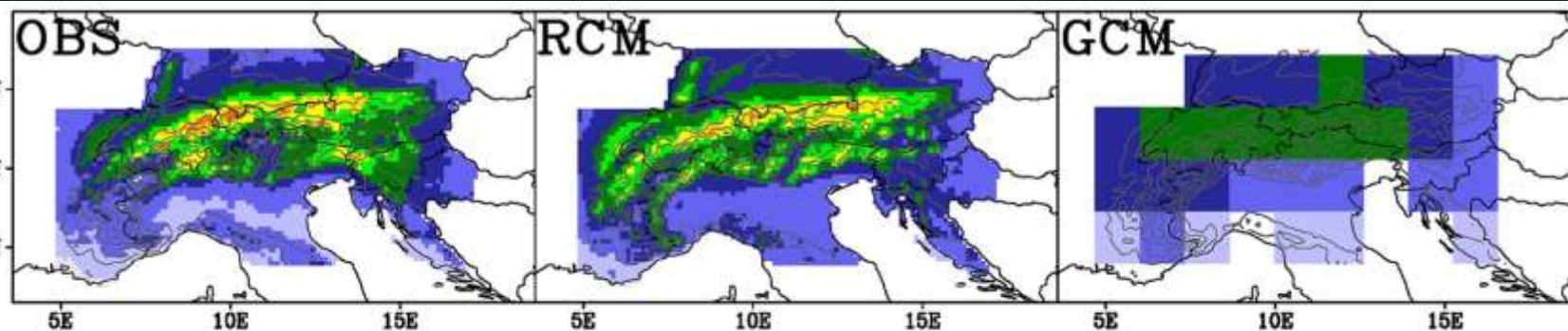


Przykład downscalingu - temperatura

wyniki mogą być wykorzystane w modelach oceny oddziaływania w skali powiatu



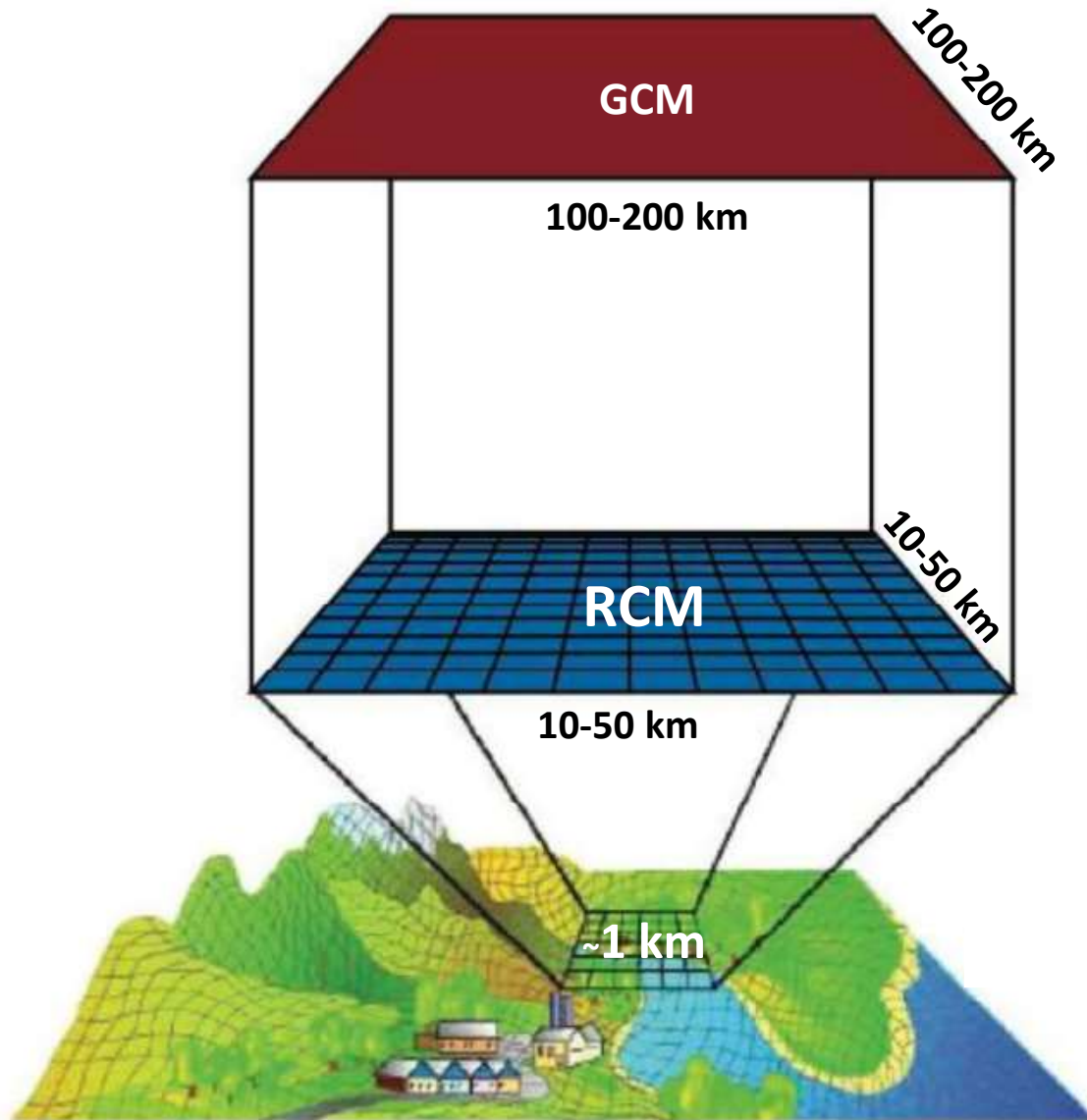
Przykład downscalingu – wysokość opadu



Porównanie wysokości opadu w Alpach latem w modelach GCM, RCM względem obserwacji

Różnica między okresami 2079-2099 (RCP8.5) i 1975-2004 w modelach GCM i RCM

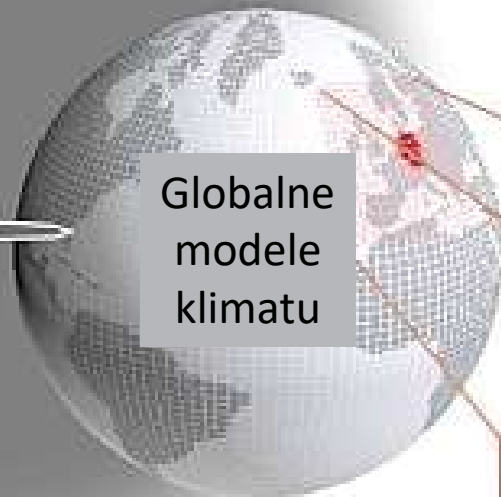
Wynik downscalingu jako informacja dla modeli oceny oddziaływania



Za pomocą modeli RCM
uzyskujemy informację, która
może być wykorzystana w
modelach oceny oddziaływania.

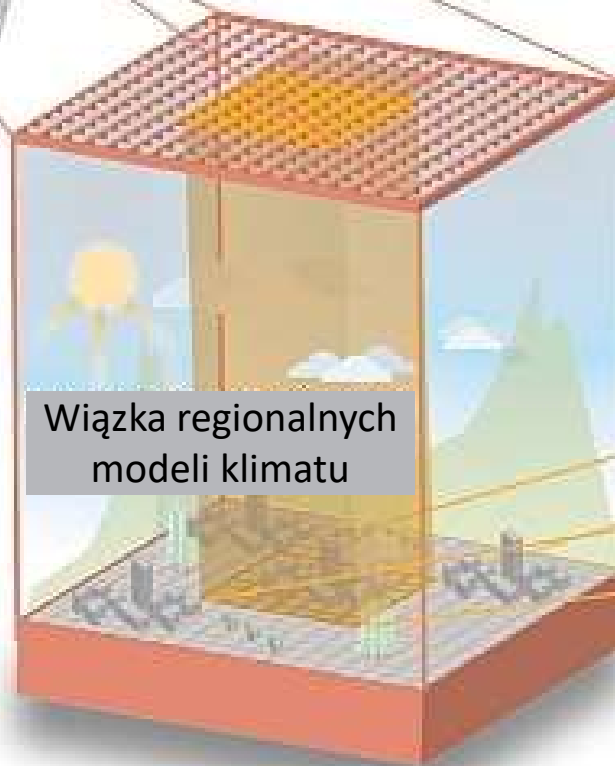
Regionalizacja projekcji klimatycznych

globalne scenariusze
przyszłości

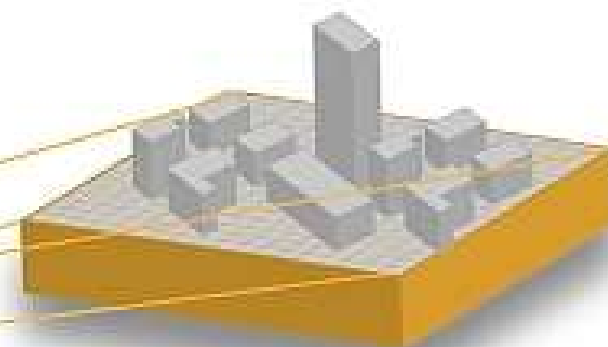


Globalne
modele
klimatu

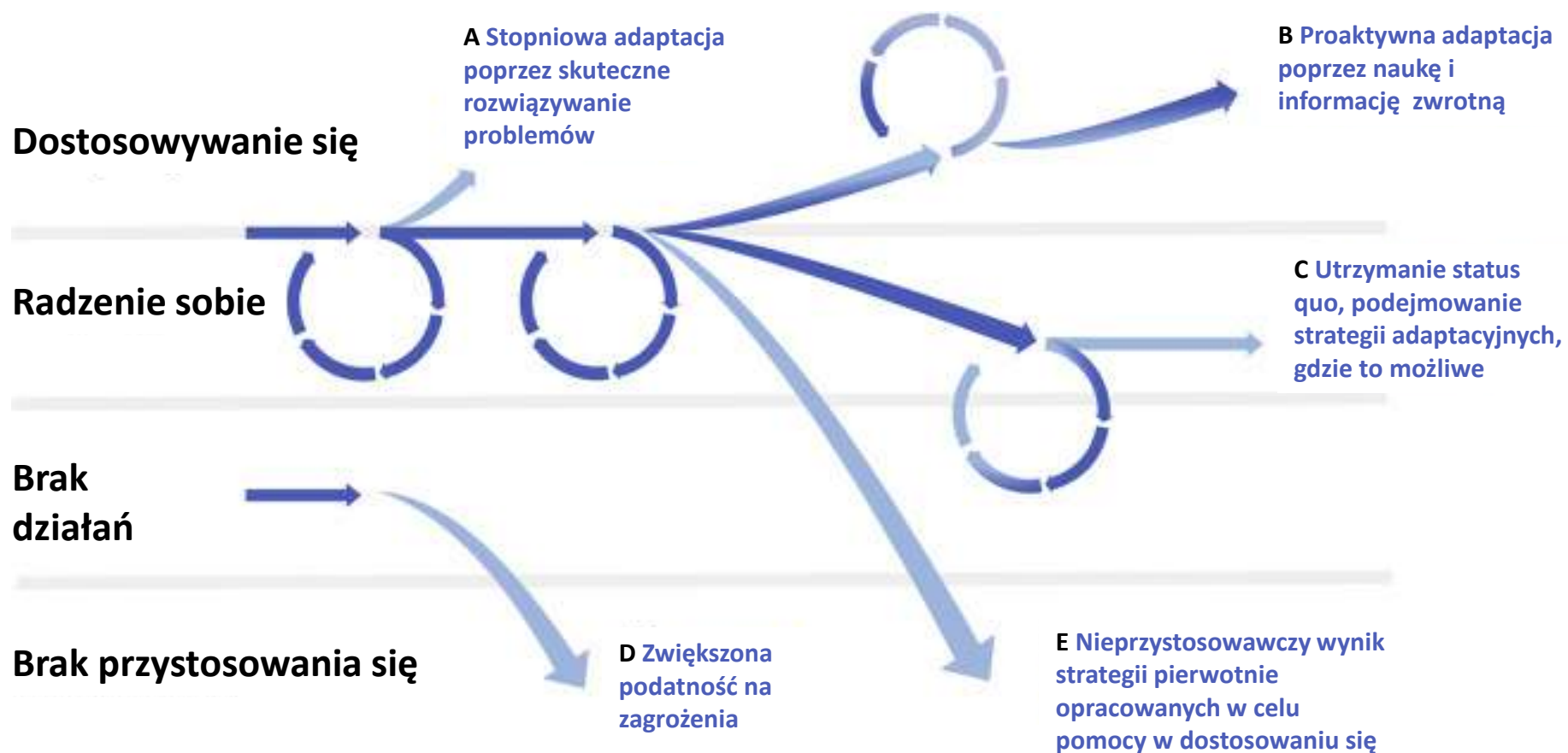
na przykładzie modelu klimatycznego miasta



Wiązka regionalnych
modeli klimatu



Modele impaktowe np.:
miejski model klimatyczny



Przykład anty-adaptacji

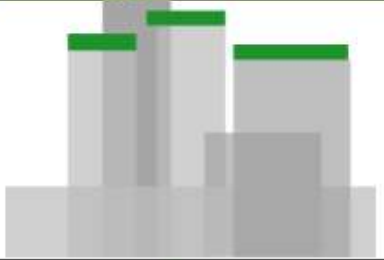
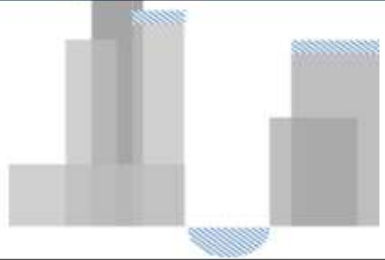
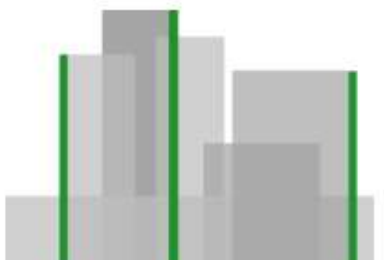
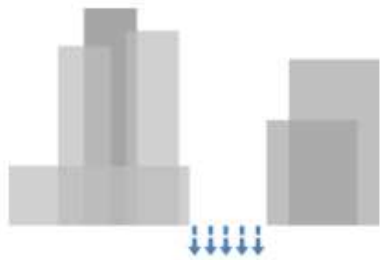

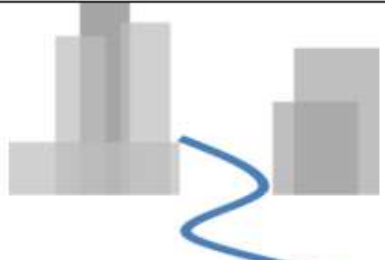
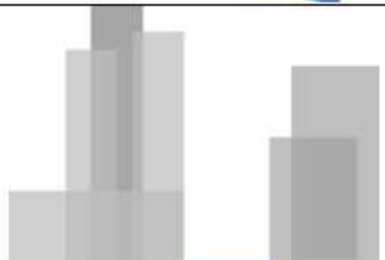
Włocławek



Kielce



Przykład działań adaptacyjnych w mieście

Zielona infrastruktura – działania związane z instalacją roślin w mieście		Niebieska infrastruktura – system gospodarowania wodą	
	Zielone dachy - dachy budynków pokryte roślinnością		Retencja wodna - elementy miejskiego systemu wodnego mające na celu retencjonowanie wody opadowej
	Zielone ściany – ściany budynków pokryte roślinnością		Drenaż - elementy miejskiego systemu wodnego, których zadaniem jest odwadnianie/odprowadzanie wody deszczowej
	Tereny zielone - niezabudowane tereny miejskie pokryte roślinnością		Renaturalizacja cieków wodnych - otwarte elementy wodne w krajobrazie miasta z wodą płynącą, np. rzeki, strumienie
			Renaturalizacja zbiorników wodnych - otwarte elementy wodne w krajobrazie miasta z wodą stojącą

Źródło: Podręcznik adaptacji dla miast
wytyczne do przygotowania Miejskiego
Planu Adaptacji do zmian klimatu

Dziękuję

Mariusz Figurski
Centrum Modelowania Meteorologicznego

24/10/2024,



METEO
IMGW-PIB
meteo.imgw.pl