

MARCIN POPKIEWICZ  
ALEKSANDRA KARDAŚ  
SZYMON MALINOWSKI

# NAUKA O KLIMACIE

OBSERWACJE ZMIAN KLIMATU TERAZ I W PRZESZŁOŚCI

MECHANIZMY DZIAŁANIA SYSTEMU KLIMATYCZNEGO

DAWNE ZMIANY KLIMATU – CO, KIEDY, JAK I DLACZEGO

OBECNA ZMIANA KLIMATU – OBSERWACJE, PRZYCZYNY

PRZYSZŁA ZMIANA KLIMATU – DOKĄD ZMIERZAMY

KLIMATYCZNE KONTROWERSJE

*post*  
FACTUM

  
WYDAWNICTWO  
SONIA DRAGA

  
WYDAWNICTWO  
NIEOCZYWISTE

Warszawa 2018

# SPIS TREŚCI

<b>1. WPROWADZENIE</b> .....	15
<b>1.1. KLIMATYCZNE KONTROWERSJE I METODA NAUKOWA</b> .....	16
Stanowisko nauki na temat obecnej zmiany klimatu i jej przyczyn. Metoda naukowa, literatura recenzowana i wiarygodność informacji.	
<b>1.2. KLIMAT WCZORAJ I DZIŚ</b> .....	22
Wprowadzenie: zmiany klimatu w przeszłości i obecna zmiana na ich tle – zmiany temperatury, stężeń gazów cieplarnianych.	
<b>2. MASZYNA KLIMATYCZNA</b> .....	37
<b>2.1. BILANS ENERGETYCZNY</b> .....	38
Pojęcie bilansu energetycznego i konsekwencji zaburzenia równowagi energetycznej.	
<b>2.2. PROMIENIOWANIE</b> .....	43
Przekaz energii przez promieniowanie. Ciało doskonale czarne, prawa Plancka, Stefana-Boltzmannia i Wiena. Własności absorpcyjno-emisyjne różnych rodzajów powierzchni, ciało doskonale szare. Cechy charakterystyczne promieniowania słonecznego i promieniowania termicznego Ziemi.	
<b>2.3. ALBEDO</b> .....	51
Zdolność odbijania promieniowania przez ciało oraz jej znaczenie dla bilansu energetycznego planety.	
<b>2.4. TEMPERATURA EMISYJNA PLANETY</b> .....	55
Równowaga energetyczna planety i określanie temperatury planety na podstawie obserwacji jej promieniowania.	
<b>2.5. EFEKT CIEPLARNIANY – MODEL SZYBY</b> .....	57
Rozróżnienie temperatury emisyjnej i temperatury powierzchni Ziemi, efekt cieplarniany. Proste oszacowanie efektu cieplarnianego na podstawie tzw. modelu szyby.	
<b>2.6. TERMICZNA STRUKTURA ATMOSFERY</b> .....	61
Struktura atmosfery ziemskiej i sposoby transportu energii w atmosferze. Zmiany temperatury wraz z wysokością. Rola pary wodnej.	
<b>2.7. ZMIANY STRUMIENIA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO</b> .....	69
Zmiany strumienia docierającego do Ziemi promieniowania słonecznego: ich przyczyny, wielkość i skale czasowe. Pojęcie wymuszenia radiacyjnego.	
<b>2.8. GAZY CIEPLARNIANE I ICH CECHY</b> .....	75
Gazy cieplarniane – przegląd, mechanizm działania, występowanie w atmosferze.	

<b>2.9. WPŁYW GAZÓW CIEPLARNIANYCH NA WIDMO PROMIENIOWANIA ZIEMSKIEGO . . .</b>	<b>78</b>
Wpływ gazów cieplarnianych na widmo promieniowania termicznego planety, jej bilans radiacyjny i temperaturę powierzchni.	
<b>2.10. ZMIANY KONCENTRACJI GAZÓW CIEPLARNIANYCH A TRANSPORT ENERGII . . . . .</b>	<b>83</b>
Wpływ zmian koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze na widmo promieniowania długofalowego opuszczającego planetę i jej bilans radiacyjny. Ocieplanie troposfery i ochładzanie wyższych warstw atmosfery przy wzroście stężeń gazów cieplarnianych.	
<b>2.11. CHMURY . . . . .</b>	<b>92</b>
Rola chmur w kształtowaniu albedo planety i efekcie cieplarnianym. Wpływ promieniowania kosmicznego na zachmurzenie.	
<b>2.12. AEROSOL . . . . .</b>	<b>99</b>
Znaczenie aerozolu atmosferycznego w bilansie energii. Bezpośredni i pośredni efekt aerozolowy. Aerozole wulkaniczne.	
<b>2.13. BILANS ENERGETYCZNY ZIEMI . . . . .</b>	<b>103</b>
Regionalny bilans energii, transport energii z rejonów międzyzwrotnikowych do polarnych.	
<b>2.14. GLOBALNA CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA I STREFY KLIMATYCZNE . . . . .</b>	<b>107</b>
Komórki cyrkulacji atmosferycznej: równikowa (Hadleya), polarna i strefy szerokości umiarkowanych (Ferrela). Prądy strumieniowe na granicach komórek. Lokalne efekty klimatyczne związane z rozmieszczeniem oceanów i lądów oraz rzeźbą terenu.	
<b>2.15. OCEANY . . . . .</b>	<b>121</b>
Rola oceanów w kształtowaniu klimatu. Cyrkulacja termohalinowa: podstawy działania, wpływ na klimat, konsekwencje zmian cyrkulacji dla klimatu. Krótkoterminowe oscylacje oceaniczne El Niño-La Niña, PDO, AMO.	
<b>2.16. SZYBKIE CYKL WĘGLOWY . . . . .</b>	<b>132</b>
Rezerwuary i przepływy węgla w środowisku: atmosfera, oceany, biosfera, gleba, wieczna zmarzlina i hydraty metanu. Dwutlenek węgla i metan w szybkim cyklu węglowym.	
<b>2.17. SPRZĘŻENIA W SYSTEMIE KLIMATYCZNYM ZIEMI . . . . .</b>	<b>149</b>
Sprzężenia dodatnie i ujemne w ziemskim systemie klimatycznym: zmiany rozmiaru czap polarnych, zmiany zachmurzenia i działanie pary wodnej. Sprzężenia w szybkim cyklu węglowym w oceanach i na lądach.	
<b>2.18. WOLNY CYKL WĘGLOWY I TERMOSTAT WĘGLOWY . . . . .</b>	<b>166</b>
Wolny cykl węglowy: wulkany, wietrzenie skał, formowanie osadów węglanów. Działanie termostatu węglowego i jego rola w stabilizowaniu klimatu Ziemi.	
<b>2.19. IMPULS WĘGLOWY . . . . .</b>	<b>172</b>
Los szybko wyemitowanej do atmosfery dużej porcji dwutlenku węgla.	

	Wpływ na klimat, rozprzestrzenianie się po innych rezerwuarach węgla, procesy stopniowo usuwające nadwyżkę dwutlenek węgla z szybkiego cyklu węglowego.	
<b>2.20.</b>	<b>CZUŁOŚĆ KLIMATU</b> .....	180
	Pojęcie czułości klimatu w różnych skalach czasowych. Rola sprzężeń zwrotnych. Metody określania czułości klimatu: modele komputerowe, badania paleoklimatyczne, pomiary instrumentalne. Podsumowanie.	
<b>2.21.</b>	<b>CZUŁE PUNKTY SYSTEMU KLIMATYCZNEGO</b> .....	187
	Lodowce, lądolody, rafy koralowe, cyklony – podstawy funkcjonowania i wpływ zmiany klimatu.	
<b>2.22.</b>	<b>PODSUMOWANIE</b> .....	198
<b>3.</b>	<b>ZMIANY KLIMATU W HISTORII ZIEMI</b> .....	99
<b>3.1.</b>	<b>EPOKI LODOWE</b> .....	200
	Cykle epok lodowych i ich mechanizm. Rola wymuszeń orbitalnych i sprzężeń w ziemskim systemie klimatycznym. Holocen. Zmiany poziomu morza podczas maksimum epok lodowych i interglacjałów.	
<b>3.2.</b>	<b>DALEJ WSTECZ W CZASIE</b> .....	213
	Zmiany klimatu w kenozoiku. Rola termostatu węglowego i innych czynników.	
<b>3.3.</b>	<b>PALEO-EOCENSKIE MAKSYMUM TERMICZNE (PETM)</b> .....	218
	Epizod hipertermiczny sprzed 56 milionów lat. Przebieg, przyczyny, następstwa i niepewności.	
<b>3.4.</b>	<b>WIELKIE WYMIERANIA</b> .....	221
	Okresy wielkich wymierań w historii Ziemi – obserwacje, przyczyny, przebieg, konsekwencje. Rola wulkanów i ich emisji.	
<b>3.5.</b>	<b>ZIEMIA-ŚNIEŻKA</b> .....	226
	Wejście Ziemi w stan (prawie?) całkowitego pokrycia lodem. Procesy prowadzące do wejścia i wyjścia z tego stanu.	
<b>3.6.</b>	<b>PODSUMOWANIE</b> .....	228
<b>4.</b>	<b>OBECNA ZMIANA KLIMATU</b> .....	229
<b>4.1.</b>	<b>ŚWIAT PALIW KOPALNYCH</b> .....	230
	Emisje dwutlenku węgla w epoce przemysłowej: spalanie paliw kopalnych, wylesianie, produkcja cementu. Światowe źródła energii, rola ropy, węgla i gazu. Emisje dwutlenku węgla a zużycie energii i PKB. Globalne i regionalnie zmiany emisji.	

<b>4.2. ZABURZONY CYKL WĘGLOWY</b> .....	242
Znaczenie antropogenicznych emisji dwutlenku węgla dla cyklu węglowego. Zmiany w cyklu węglowym: atmosfera, oceany, ekosystemy lądowe.	
<b>4.3. INNE GAZY CIEPLARNIANE</b> .....	253
Obserwowane zmiany koncentracji metanu, tlenków azotu i gazów przemysłowych. Równoważnik emisji dwutlenku węgla. Zestawienie wpływu antropogenicznych źródeł emisji i gazów cieplarnianych na zmianę klimatu.	
<b>4.4. ZMIANA BILANSU RADIACYJNEGO ZIEMI</b> .....	258
Wpływ antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych, aerozoli (efekt bezpośredni i pośredni), zmian użytkowania terenu i innych czynników na bilans radiacyjny planety w zestawieniu z czynnikami naturalnymi. Obserwacje zmian widma i strumienia promieniowania długofalowego.	
<b>4.5. BILANS ENERGETYCZNY ZIEMI: GDZIE PRZYBYWA ENERGII?</b> .....	266
Zmiany energii skumulowanej w ziemskim systemie klimatycznym: atmosfera, oceany, lądy, lodowce, pomiary in-situ i satelitarne. Bilans i nierównowaga radiacyjna.	
<b>4.6. FLUKTUACJE WZROSTU TEMPERATURY</b> .....	270
Wpływ czynników szybkozmiennych na zmiany średniej temperatury globalnej: aktywność słoneczna, oscylacje oceaniczne, wulkany. Zestawienie czynników naturalnych i antropogenicznych.	
<b>4.7. OBSERWACJE I NIEKTÓRE KONSEKWENCJE ZMIANY KLIMATU</b> .....	273
„Globalne ocieplenie” a „Zmiana klimatu”. Wzrost temperatury i przesuwanie się stref klimatycznych, zmiany w Arktyce, lód morski wokół Antarktydy, topnienie lodowców i lądolodów, wzrost poziomu morza, zakwaszanie się oceanów, zmiany w występowaniu huraganów, spadek temperatury górnych warstw atmosfery, koszty gospodarcze.	
<b>4.8. KLIMATYCZNE KONTROWERSJE</b> .....	310
W jakim stopniu antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych, a w szczególności dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych, są przyczyną obecnej zmiany klimatu. Przegląd dowodów i weryfikacja wcześniejszych prognoz klimatologów.	
<b>4.9. PODSUMOWANIE</b> .....	322
<b>5. PROGNOZA NA PRZYSZŁOŚĆ</b> .....	323
<b>5.1. ODPOWIEDŹ KLIMATU NA EMISJE GAZÓW CIEPLARNIANYCH</b> .....	324
Oszacowanie ocieplenia wynikającego z wprowadzenia do szybkiego cyklu węglowego określonej ilości dwutlenku węgla. Kluczowe znaczenie emisji skumulowanej.	

<b>5.2. POTENCJALNA PULA EMISJI</b> .....	328
Ilość możliwych do wydobycia i spalania paliw kopalnych: rezerwy i zasoby.	
<b>5.3. SCENARIUSZE EMISJI I ZMIANY KLIMATU</b> .....	533
Scenariusze emisji i zmiany klimatu – dwutlenek węgla i inne gazy cieplarniane. Budżet węglowy i jego rozmiar dla różnych scenariuszy.	
<b>5.4. ZMIANY W CYKLU WĘGLOWYM</b> .....	339
Sprzężenia cyklu węglowego w obliczu ocieplenia klimatu: tajanie wieloletniej zmarzliny, efekt nawożenia roślin dwutlenkiem węgla, lasy tropikalne, hydraty metanu.	
<b>5.5. SKUTKI OCIEPLANIA SIĘ KLIMATU</b> .....	345
Prognozowane skutki ocieplania klimatu: przesuwanie się stref klimatycznych, zmiany temperatury i opadów, wzrost poziomu morza, wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe, wymieranie gatunków i inne. Punkty krytyczne systemu klimatycznego. Konsekwencje dla Polski. Perspektywy na nową epokę lodową.	
<b>5.6. CZARNY SCENARIUSZ</b> .....	363
Czego możemy się spodziewać, kontynuując rozwój oparty na paliwach kopalnych: wpływ wysokich stężeń dwutlenku węgla na inteligencję, groźne dla życia temperatury, migracje i inne. Scenariusz wysokich emisji w kontekście dawnych zmian klimatu i wielkich wymierań. Scenariusz Wenus?	
<b>5.7. GEOINŻYNIERIA</b> .....	377
Inżynieria klimatu w skali planetarnej. Technologie usuwania węgla z szybkiego cyklu węglowego: wychwyt i magazynowanie dwutlenku węgla, zalesianie, bioenergia z wychwytem dwutlenku węgla, biowęgiel, przyspieszenie oceanicznej pompy biologicznej, sztuczne drzewa, sztuczny termostat węglowy. Technologie zmniejszania strumienia energii słonecznej: przesłony w kosmosie, rozpylanie aerozoli w stratosferze, wybielanie chmur, zwiększenie albedo powierzchni Ziemi.	
<b>5.8. PRÓG 2°C</b> .....	389
Pochodzenie progu „niebezpiecznej zmiany klimatu”. Przełożenie progu 2°C na dostępny budżet węglowy. Ujemne emisje. Niezbędne zmiany w emisjach z energetyki i przemysłu oraz rolnictwa. Kwestia podziału budżetu węglowego.	
<b>5.9. Z POLSKIEJ PERSPEKTYWY</b> .....	400
Polskie trendy emisji gazów cieplarnianych. Dotychczasowe redukcje. Kwestia polskich złóż węgla.	
<b>5.10. DRÓGA DO PRZYSZŁOŚCI</b> .....	406
Efektywność energetyczna i czyste źródła energii. Stosowanie zasady „zanieczyszczający płaci”. Wnioski końcowe.	

<b>6. MATERIAŁY DODATKOWE</b> .....	417
<b>6.1. HISTORIA BADAŃ KLIMATU</b> .....	417
Badania klimatu od XVIII wieku do współczesności – ciągłość badań naukowych.	
<b>6.2. BADANIE KLIMATU – TERAŹNIEJSZOŚĆ I NIEDAWNA PRZESZŁOŚĆ</b> .....	429
Metody badania klimatu: pomiary temperatury na lądach i homogenizacja danych, pomiary temperatury na oceanach i w ich głębinach, pomiary satelitarne, inne współczesne narzędzia i metody pomiarowe.	
<b>6.3. BADANIE KLIMATU – PALEOKLIMAT</b> .....	449
Metody badania dawnego klimatu: zapisy historyczne, zasięg lodowców, słoje drzew, izotopy, rdzenie lodowe, niebieski lód, resztki nieorganiczne w osadach oceanicznych, odwierty głębinowe, nacieki jaskiniowe, aparaty szparkowe, pyłki oraz pozostałości roślinne i zwierzęce na lądach, resztki organiczne w osadach oceanicznych, koralowce, paleozole i inne.	
<b>6.4. ŹRÓDŁA KONTROWERSJI W KWESTII ZMIANY KLIMATU</b> .....	470
Zmiana klimatu jako wyzwanie społeczne, psychologiczne i gospodarcze. Przemysł sfabrykowanych wątpliwości. Tragedia wspólnego pastwiska. Psychologia zmiany klimatu. Dyskontowanie przyszłości.	
<b>6.5. MITY KLIMATYCZNE – INSTRUKCJA OBSŁUGI</b> .....	481
Mechanizmy powstawania mitów klimatycznych. Przykłady mitów i sposoby ich wyjaśniania.	
<b>6.6. POCHŁANIANIE I EMISJA PROMIENIOWANIA PRZEZ GAZY</b> .....	495
Podstawy fizyczne pochłaniania i emisji promieniowania przez gazy.	
<b>6.7. MODELE NUMERYCZNE</b> .....	500
Podstawowe informacje o modelach klimatu: elementy składowe, zasady działania, ewolucja. Modelowanie pogody a modelowanie klimatu. Ograniczenia modeli i ich wiarygodność z punktu widzenia symulowania dawnego klimatu i jego przyszłych zmian.	
<b>6.8. ŹRÓDŁA DANYCH KLIMATYCZNYCH</b> .....	510
<b>ODPOWIEDZI DO ZADAŃ</b> .....	512
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	514
<b>SPIS ILUSTRACJI</b> .....	528