

Przyczyny i skutki zmian klimatu

Antonina Sikorska

Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii

E-mail: a.sikorska.637@studms.ug.edu.pl

tutor: dr Mirosława Malinowska

Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii,

Katedra Oceanografii Fizycznej i Badań Klimatu, Pracownia Badań Klimatu

Słowa kluczowe: zmiana klimatu, globalne ocieplenie, gazy cieplarniane, cykle Milankowicia

Streszczenie: Globalne ocieplenie jest faktem, ale dlaczego jest to tak ważny problem? Jakie są jego przyczyny oraz skutki? Czy tylko ludzie są winni? Niniejszy esej stanowi próbę odpowiedzi na powyższe pytania. Przedstawia naturalne oraz antropogeniczne przyczyny zmiany klimatu oraz prezentuje wybrane, aktualnie już widoczne, skutki tego zjawiska.

Wprowadzenie

Zmiana klimatu Ziemi to obecnie coraz częściej poruszany temat konwersacji. Ocieplenie się klimatu nie podlega wątpliwości (IPCC raport, Climate Change 2013). Obserwacje wskazują na wzrost średniej globalnej temperatury powietrza i oceanów, powszechne topnienie pokryw lodowych oraz podnoszenie się poziomu mórz i oceanów. Współczesne globalne ocieplenie można z bardzo dużym prawdopodobieństwem przypisać emisji gazów cieplarnianych związanych z działalnością człowieka (Haigh, 2011). Tempo

tego zjawiska jest bardzo duże, a działalność antropogeniczna je zwiększa. Natomiast istnieją również naturalne przyczyny globalnego ocieplenia, które trzeba wziąć pod uwagę analizując zmiany i zmienność klimatu. W tym esej omówione zostały zarówno naturalne, jak i antropogeniczne czynniki wpływające na klimat Ziemi oraz wybrane konsekwencje zmiany klimatu, które już są odczuwalne na Ziemi.

Naturalne przyczyny zmian klimatu

Cykliczne składowe ruchu orbitalu Ziemi (cykle Milankowicia i nie tylko)

Ziemia porusza się wokół Słońca po orbicie w kształcie elipsy. W ciągu roku nasza planeta znajduje się w perihelium (punkt na orbicie najbliższy Słońcu), a następnie w aphelium (punkt na orbicie najdalej położony od gwiazdy naszego układu). Oczywiście wpływa to na ilość dochodzących promieni słonecznych do atmosfery, a następnie do powierzchni Ziemi. Natomiast nie jest to jedyny zmienny czynnik związany z położeniem tej planety na orbicie. W 1941 Milankowicz (za Feluch, 2011) wyróżnił trzy cykliczne

ruchy wykonywane przez Ziemię podczas okrążania Słońca.

Pierwszym z ruchów opisanych przez Milankovicia są zmiany mimośrod (ekscentryczności) orbity Ziemi (eccentricity, e):

$$e = \frac{a}{d}$$

e – ekscentryczność/mimośród orbity,

a – odległość ogniska od środka elipsy ,

d - długość półosi wielkiej orbity eliptycznej.

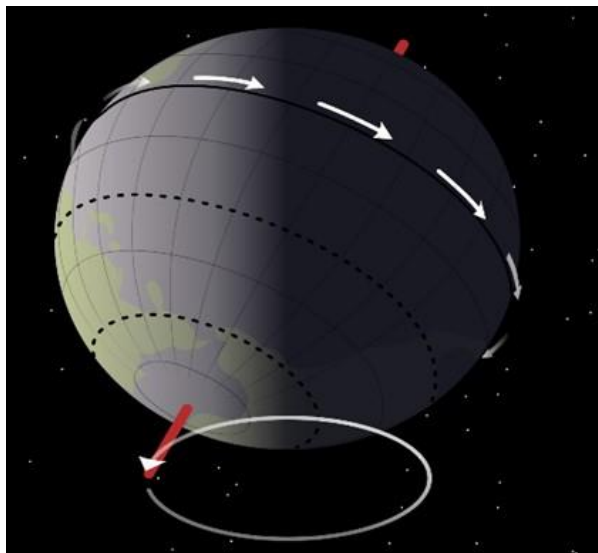
Gdyby kształt orbity był kołem, to mimośród przyjąłby wartość zerową, natomiast im bardziej wydłużoną elipsą się staje, tym jego wartość jest bliższa jedności (gdyby $e=1$, to byłby to kształt paraboli). Ekscentryczność ulega niewielkim wahaniom (w zakresie 0,005–0,058 w okresie ok. 95 tys. lat). Aktualnie wynosi ona 0,0167 (Feluch, 2011) i maleje, co oznacza, że kształt orbity ziemskiej zbliża się coraz bardziej do kształtu koła. Przy takim ułożeniu orbity, do Ziemi znajdującej się w peryhelium dociera 6% więcej promieniowania słonecznego niż, gdy planeta jest w aphelium. Natomiast gdy orbita przyjmuje bardziej eliptyczny kształt różnice w dostarczanej ilości energii słonecznej między peryhelium i aphelium dochodzą nawet do 20-30% (Feluch, 2011). Im mniejsze zróżnicowanie w ilości docierających promieni słonecznych do Ziemi, tym mniejszy kontrast termiczny między zimą a latem. Wartość ekscentryczności wyraźnie koreluje z okresami ocieplenia (interglacja) i oziębienia (glacja). Każde maksimum mimośrod jest powiązane z okresem ciepłym, a minimum z okresem zimnym. Aktualne zmniejszanie się ekscentryczności Ziemi wskazuje, że współczesny ciepły okres dobiega końca i można spodziewać się ochłodzenia klimatu (Hrynowiecka, 2016).

Drugim czynnikiem opisanym przez Milankovicia są zmiany w nachyleniu osi

Ziemi. Kąt między osią obrotu Ziemi, a płaszczyzną orbity (ekliptyki) waha się między 21,5° a 24,5° w cyklu 41 tys. lat. Podczas niskiego (i malejącego) kąta nachylenia osi względem ekliptyki zróżnicowanie w ilości dostarczanego promieniowania słonecznego między zimą a latem jest nieznaczące. Jednakże, gdy nachylenie jest duże (i rosnące) różnice w ilości dostarczanej energii w różnych porach roku również rosną. Powoduje to duży kontrast temperatur okresów letnich do zimowych oraz w niskich i wysokich szerokościach geograficznych, co wpływa z kolei na hamowanie rozwoju pokrywy lodowej. Współcześnie kąt nachylenia wynosi 23,4° i zmniejsza się 0,5°/rok (Hrynowiecka, 2016). Spowoduje to powolne zmniejszanie się różnic w wielkości dostarczanej energii słonecznej latem i zimą, w konsekwencji mniejsze zróżnicowanie termiczne między obydwoma porami roku, a co za tym idzie sprzyjające warunki do budowania pokrywy lodowej (Hrynowiecka, 2016).

Ostatnim zjawiskiem zaliczanym do cykli Milankovicia jest ruch precesyjny Ziemi. Nasza planeta oprócz ruchu obiegowego wokół Słońca wykonuje również ruch obrotowy. Oś Ziemi nie jest prostopadła do jej orbity. Dlatego, gdy Ziemia kręci się z zachodu na wschód oś naszej planety obraca się w przeciwnym kierunku (Ryc. 1.). Jest to ruch rotacyjny, który powoduje, że oś Ziemi porusza się po bocznej powierzchni stożka. Pełen obrót trwa około 23-26 tys. lat, około 1° na 72 lata. Zjawisko to powoduje przesuwanie się punktów równonocy i przesilen (Hrynowiecka, 2016). W 2023 roku peryhelium przypadło na 4 stycznia, a aphelium na 6 lipca [1], a więc różnica w ilości energii dostarczonej zimą i latem na półkuli północnej jest mniejsza, niż gdyby w lipcu Ziemia byłaby w peryhelium, a w styczniu w aphelium. Obecny (2023r.) stosunek energii docierającej do na-

szej planety sprzyja powstaniu pokryw lodowych w obszarach podbiegunowych (Hryniewiecka, 2016).

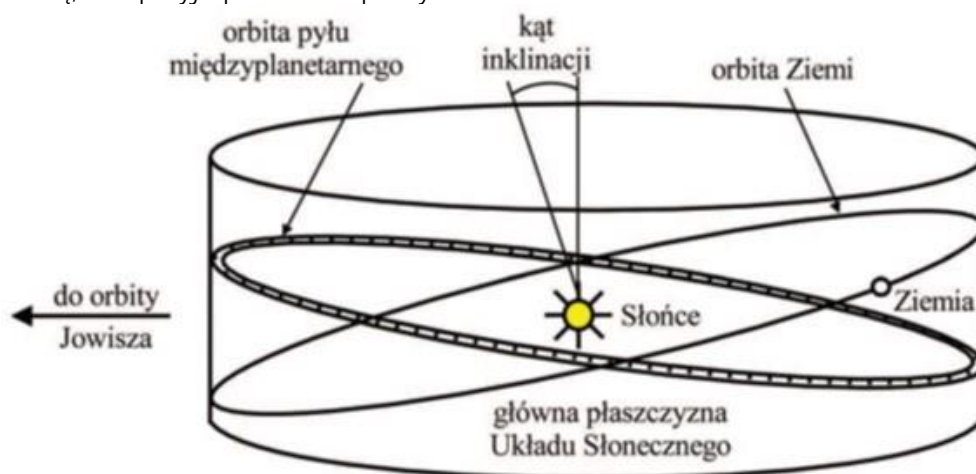


Ryc.1. Nachylenie osi obrotu Ziemi [2]

Według teorii Milankovicia cykl glacialno-interglacialny trwa około 100 tys. lat i pokrywa się z cyklem zmian mimośrodowości orbity ziemskiej. Na zlodowacenie przypada około 90 tys. lat, a na ocieplenie około 10 tys. lat. Od około miliona lat cykl ten się powtarza, a interglacjał, w którym aktualnie żyjemy trwa już 11 700 lat. Ziemia znajduje się w perihelium zimą, co sprzyja powstaniu pokryw

lodowych. Mimo to nie wydaje się, żeby interglacjał zbliżał się ku końcowi. W przeszłości geologicznej interglacjały również ulegały wydłużeniu z powodu „przeskoczenia” jednego cyklu precesyjnego. Przyczyną takiej sytuacji była ówczesna konfiguracja ekscentryczności, nachylenia i precesji osi Ziemi, która umożliwiała dłuższe utrzymywanie się cieplejszych średnich temperatur i niepowstawanie lądolodów. Taki układ ma miejsce również współcześnie. Zmiany orbity Ziemi są uznawane za stymulator przemian między glacjałami i interglacjałami, jednak nadal nie wiadomo, jakie procesy fizyczne oddziałują przez zmianę nasłonecznienia na objętość lądolodów. Najlepszym dowodem na zależność globalnych zmian klimatycznych od przekształceń orbity Ziemi są trendy temperaturowe, zapisane w rdzeniach arktycznych i oceanicznych w ciągu obecnego okresu interglacialnego (Hryniewiecka, 2016).

Milankovic w swojej teorii pominął dwa elementy ruchu orbitalnego Ziemi, które podlegają zmianom cyklicznym: inklinację oraz nutację. Pierwszym z nich jest nachylenie orbity ziemskiej względem tzw. głównej płaszczyzny Układu Słonecznego (tworzą ją Słońce i planety wokół niego krążące – w szczególności największa z nich, czyli Jowisz) (Ryc. 2).

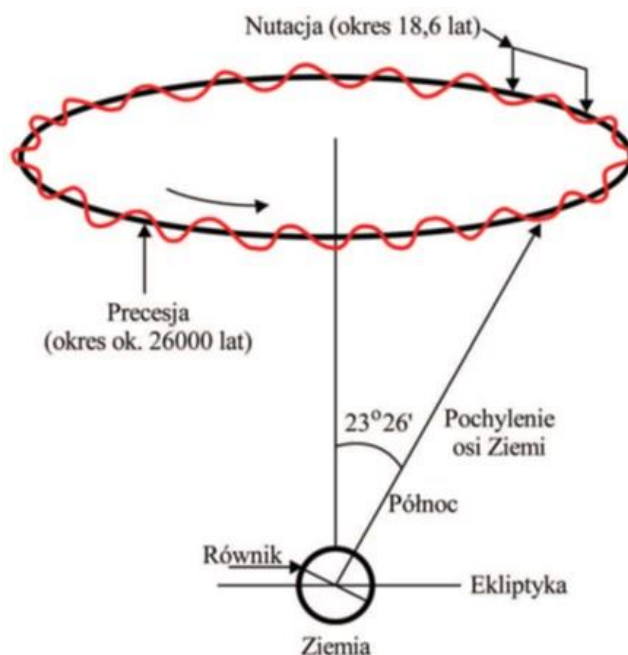


Ryc.2. Cyklicznie zmieniające się nachylenie orbity Ziemi do głównej płaszczyzny Układu Słonecznego, na której może znajdować się pył międzyplanetarny lub drobny gruz kosmiczny (Feluch, 2011)

Pełny okres zmiany inklinacji trwa około 100 tys. lat (Feluch, 2011), więc jest prawie zbieżny z cyklem zmiany mimośrodów wg Milankowicia, który trwa 95 tys. lat. Nachylenie orbity Ziemi do głównej płaszczyzny Układu Słonecznego waha się między 0° a 3° . Momenty, gdy nachylenie jest równe 3° (maksimum) pokrywają się z okresami glacialnymi, natomiast gdy kąt ten wynosi 0° , występuje okres interglacjału. Wynika z tego, że 95-tysiącletnia cykliczność zmian klimatycznych może nie zależeć od mimośrodowych zmian odległości od Słońca, ale od kąta nachylenia orbity Ziemi, albo łącznie od obydwu tych czynników. Przy takim cyklicznym ruchu orbity to jednak nie nachylenie ma bezpośredni wpływ na ilość padających na Ziemię promieni słonecznych, lecz koncentracja pyłu międzyplanetarnego,

który przy mniejszych nachyleniach orbity ziemskiej dostaje się do atmosfery. Powoduje to ochłodzenie. Przy nachyleniach większych dochodzi do ocieplenia klimatu (Feluch, 2011). Potwierdzeniem tej koncepcji mogą być tzw. mezoferyczne obłoki (Noctilucent Clouds), świecące w nocy. Ich częstość osiąga maksimum w okresach przecięcia orbity Ziemi z główną płaszczyzną Układu Słonecznego.

Drugim cyklem pominiętym przez Milankowicia jest nutacja (Ryc. 3.). Jest to ruch osi Ziemi, który występuje przy ruchu precesyjnym. Przyczyną powstania nutacji są siły pływowe Słońca oraz Księżyca. Główny jej cykl trwa 18,6 roku i jest równy okresowi precesji księżyca.



Ryc.3. Nutacja w relacji z ruchem precesyjnym osi Ziemi (Feluch, 2011)

Wpływ tego ruchu jest nadal badany. Natomiast dopuszczalny jest fakt, że nutacja może mieć wpływ na zmiany sejsmiczności Ziemi oraz przyczynić się do tzw. kataklizmu sejsmicznego (silne trzęsienie Ziemi, wybuch

wulkanu czy powstanie nowego wulkanu) (Feluch, 2011). Erupcje wulkaniczne z kolei mogą mieć wpływ na klimat Ziemi poprzez zwiększenie zapylenia atmosfery, co z kolei

powoduje zmniejszenie ilości promieniowania słonecznego, docierającego do powierzchni Ziemi i spadek temperatury (Mather, 2015).

Promieniowanie słoneczne

Słońce to podstawowe źródło energii docierającej do naszej planety. Jego energia umożliwia zachodzenie różnorodnych procesów, które są niezbędne do funkcjonowania Ziemi. Energia słoneczna w formie promieniowania elektromagnetycznego absorbowana jest przez powierzchnię Ziemi. Ziemia jest położona w idealnej odległości od tej gwiazdy by być ogrzewaną na tyle, aby powstały i rozwijały się organizmy. Czynnikiem uznawanym za warunkujący możliwość powstania życia na planecie jest woda, jednakże by związek H₂O powstał, muszą panować odpowiednie warunki klimatyczne, na które duży wpływ ma energia Słońca. Zatem jest to silny regulator warunków panujących na Ziemi (Haigh, 2011).

Średnia odległość Ziemi od Słońca to około 150 milionów kilometrów, czyli jedna jednostka astronomiczna (1 AU). Dystans ten warunkuje, że strumień promieniowania słonecznego, tzw. stała słoneczna czyli całkowita energia, jaką promieniowanie słoneczne przenosi w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca (1 AU) na wejściu do atmosfery wynosi około 1365 W/m² (Haigh, 2011). Średnio 30% tego promieniowania zostaje odbite od Ziemi i atmosfery przez obiekty o wysokim albedo, np.: chmury i pokrywy lodowe. Część jest absorbowana poprzez podmioty o niskim albedo, np.: asfalt, dachy budynków i ciemne rodzaje ziem, ogrzewając powierzchnię Ziemi i atmosferę. Ilość promieniowania słonecznego padającego na Ziemię wpływa na temperaturę planety. Ze względu na zmiany położenia Ziemi między perihelium i aphelium, w sezonie letnim

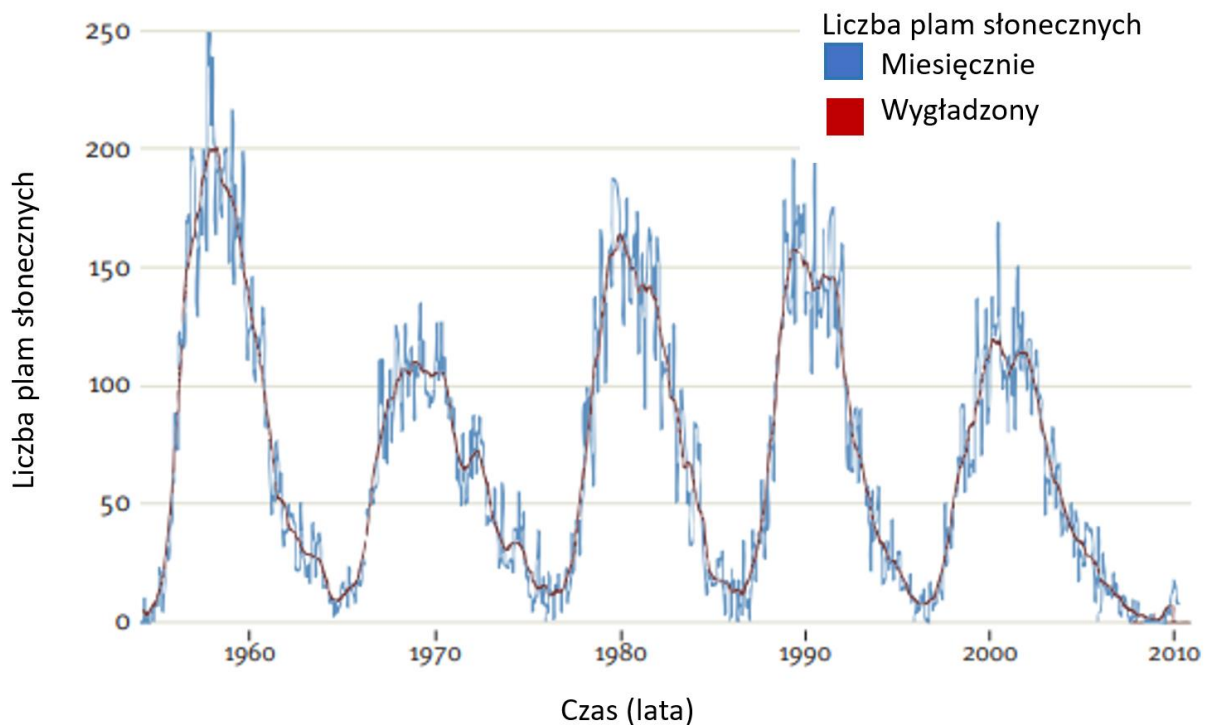
większe natężenie promieniowania słonecznego występuje na półkuli południowej niż na półkuli północnej. Rozkład natężenia promieniowania słonecznego na kuli ziemskiej jest ważnym czynnikiem przy ustalaniu klimatu oraz jego zmienności (Haigh, 2011).

Jednym ze wskaźników aktywności Słońca jest ilość tak zwanych plam słonecznych. Jest to zjawisko obserwowane od starożytności, ale dopiero w XVII wieku, po wynalezieniu teleskopu zostało jednoznacznie zidentyfikowane. Są to ciemne, czerwone plamy na powierzchni Słońca, które pokrywają się na zdjęciach satelitarnych z miejscami wysokiej aktywności słonecznej. Na bazie obserwacji prowadzonych od 1600 roku i bardzo dokładnych badań trwających od 1960 roku można stwierdzić, że ilość plam na Słońcu wykazuje cykliczne wahania. Rośnie ona, a następnie maleje w cyklu 9-13 lat (Ryc. 4). Cykl ten nazywany jest 11-letnim cyklem lub cyklem słonecznym. Mimo, że jest to powtarzalne zjawisko, amplitudy cyklu są zróżnicowane. Na początku obserwacji, w drugiej połowie XVII wieku i na początku XVIII wieku liczba plam słonecznych była minimalna. W literaturze przedmiotu określa się to jako „Maunder Minimum”. Kolejne minimum plam słonecznych – „Dalton Minimum” pojawiło się na początku XIX wieku. Jednakże od paru dekad obserwowany jest wzrost liczby plam słonecznych w cyklu, nawet do 250, jak to miało miejsce w roku 1960 (Haigh, 2011) (Ryc. 4).

W roku 1978 zaczęto wykonywać bezpośrednie pomiary całkowitego natężenia promieniowania słonecznego (TSI – Total Solar Irradiance) z satelitów znajdujących się poza atmosferą ziemską. Pomiary z różnych urządzeń satelitarnych wykazały spójne zmiany TSI o około 0,08% (~1,1 W/m²) w cyklu 11-letnim (Haigh, 2011). Ze względu na kalibrację urządzeń i ich degradację w czasie, ustalono że wystąpił problem z określeniem

bezwzględnej wartości TSI. Jednakże pomiary wykonane w roku 1986 oraz 1996, gdy wystąpiły minima w 11-letnim cyklu, pozwoliły wywnioskować, że doszło do wzrostu energii netto docierającej do górnych warstw atmosfery o około $0,1 \text{ W/m}^2$ na dekadę. Była to około jedna trzecia tego, co wynika ze

wzrostu stężenia gazów cieplarnianych (tendencja dekadowa uśredniona w ciągu ostatnich 50 lat). Natomiast porównując minima słoneczne dla 1996 i 2009 roku nastąpił spadek TSI, co wskazuje na brak jednoznacznej tendencji wzrostowej TSI (Haigh, 2011).



Ryc.4. Liczba plam słonecznych w latach 1950-2010 (Haigh, 2011)

Szacowane wartości wskaźnika TSI podczas „Maunder Minimum” pod koniec XVII wieku oscylowały od $1362,8$ do $1364,7 \text{ W/m}^2$. Natomiast obecna wartość tego wskaźnika wynosi $1366,0 \text{ W/m}^2$. O ile przed rokiem 1960 ilość promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni Ziemi mogła powodować globalne ocieplenie (pomijając 11-letnią modulację cyklu) o około $0,07^\circ\text{C}$ (Haigh, 2011), o tyle później miała niewielki wpływ na zmiany temperatury. W całym okresie temperatura wzrosła o około 1°C [3]. Oczywistym jest zatem, że w ostatnich stuleciach wpływ promieniowania słonecznego na wzrost temperatury na Ziemi jest

znacznie mniejszy w porównaniu z wpływem wywołanym wzrostem emisji gazów cieplarnianych związanym z działalnością człowieka.

Przykładowe zmiany na skalę lokalną spowodowane promieniowaniem słonecznym obrazuje XVII-wieczne ochłodzenie, obserwowane na półkuli północnej. Wielkość promieniowania słonecznego mogła mieć wymierny wpływ na klimat północnej Europy. Potwierdziła to analiza 350-letniego zapisu temperatur w centrum Anglii, wskazująca na mroźne zimy na skutek niskiej aktywności słonecznej. Istnieje wiele poszlak, że zmiany

aktywności słonecznej w dłuższej perspektywie czasu wpływają na klimat w skali regionalnej na całym świecie. Obrazują to doniesienia z paleozapisów, takie jak silniejsze monsuny azjatyckie, większe opady w Omanie, susza we wschodniej Afryce równikowej i zachodnich Stanach Zjednoczonych (Haigh, 2011). Lokalnie wpływy zmian aktywności Słońca mogą być zatem znacznie większe, niż można by przypuszczać po niewielkiej zmianie średniej temperatury globu.

Wyniki analiz temperatur na świecie są zgodne z wynikami modeli klimatycznych, które wskazują, że wzrost aktywności słonecznej prawdopodobnie przyczynił się do 7-30% globalnego ocieplenia widocznego w ciągu stulecia poprzedzającego lata sześćdziesiąte XX wieku (1850-1950) (Haigh, 2011). Natomiast ocieplenie w drugiej połowie XX wieku jest prawie w całości spowodowane rosnącym stężeniem gazów cieplarnianych powstałych w wyniku działalności człowieka. Niestety regionalne skutki zmienności aktywności słonecznej są trudniejsze do ustalenia. Jednym z rezultatów wyższego poziomu aktywności Słońca mogą być zmiany we wzorcach cyrkulacji tropikalnej i przesunięcia we wzorcach cyklonów w średnich szerokościach geograficznych. Obecnie jednak, najlepiej rozwinięta jest teoria ogrzewania stratosfery przez promieniowanie ultrafioletowe, która polega na przenoszeniu ciepła przez cyrkulację powietrza ze stratosfery do powierzchni Ziemi. (Haigh, 2011).

Feulner i Rahmstrof w 2010 roku przedstawili, wykorzystując sprzężony model klimatu o średniej złożoności CLIMBER-3a, prognozę przyszłych 11-letnich cykli i ogólnej aktywności słonecznej. Aby zbadać wpływ nowego wielkiego minimum aktywności słonecznej w XXI wieku na przyszły klimat potrzebne były scenariusze ewolucji różnych wymuszeń klimatycznych do 2100 roku. Zostały ustalone w następujący sposób: wymuszanie antropogeniczne podąża ścieżkami

emisji odpowiadającymi scenariuszom A1B i A2 z IPCCSRES (model Bern-CC, dane wyjściowe z Załącznika II Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu, 2001), a wymuszanie wulkaniczne XXI wieku jest prognozowane bazując na aktywności wulkanicznej XX wieku. Modele wskazują, że przy ciągłym 11-letnim cyklu aktywności słonecznej podobnym do ostatniego cyklu i erupcjach wulkanów, podobnych do tych mających miejsce w XX wieku, globalne temperatury do roku 2100 wzrosną o 3,7°C (scenariusz A1B) i o 4,5°C (scenariusz A2) powyżej średniego poziomu z lat 1961-1990 (Feulner i Rahmstrof, 2010). Średni wzrost temperatury w przedziale czasowym 2000-2030 oszacowano na $0,23 \pm 0,03^{\circ}\text{C}$ i $0,20 \pm 0,03^{\circ}\text{C}$ na dekadę odpowiednio dla scenariuszy A1B i A2. Analiza średnich rocznych różnic temperatur między nowym wielkim minimum a ciągłym 11-letnim cyklem aktywności słonecznej wskazała, iż ochłodzenie byłoby najsilniejsze w regionach polarnych i kontynentalnych, a także na Płaskowyżu Tybetańskim. Porównanie średnich rocznych temperatur między nowym wielkim minimum w scenariuszu A1B i MM (Maunder Minimum) ujawniało wyjątkowo silne ocieplenie w regionach polarnych, wskazując na znaczenie albedo lodu. Rzeczywiście, w porównaniu z latami 1971-2000 średnia roczna pokrywa lodowa na Oceanie Światowym zmniejszyła się o około 10%. Dodatkowo przewidywania modelu według wszystkich scenariuszy wykazują, że pod koniec stulecia (2071-2100) pokrywa lodowa w porównaniu do roku 1971 zmniejszy się o około 40% (Feulner i Rahmstrof, 2010).

Podsumowując, średnie globalne temperatury w roku 2100 najprawdopodobniej spadłyby o około 0,1°C (max 0,3°C) (Feulner i Rahmstrof, 2010). Porównując to ze wzrostem temperatury o 3,7°C i 4,5°C w stosunku do lat 1961-1990 do końca wieku, zgodnie ze scenariuszami emisji odpowiednio A1B i A2, nowe minimum aktywności sło-

necznej typu Maundera nie mogłoby zrównoważyć globalnego ocieplenia spowodowanego antropogeniczną emisją gazów cieplarnianych. Co więcej, jakkolwiek kompensacja globalnego ocieplenia spowodowana wielkim minimum aktywności słonecznej byłaby jedynie efektem tymczasowym, ponieważ wyraźne minima słoneczne w ciągu ostatniego tysiąclecia trwały zwykle tylko przez kilka dekad lub co najwyżej sto lat (Feulner i Rahmstorf, 2010).

Erupcje wulkaniczne

Wulkany łączą wewnątrz Ziemi z jej atmosferą. Podczas wybuchu z wulkanu wydostaje się magma w postaci lawy, materiał piroklastyczny oraz pyły wulkaniczne. Trzeba jednak pamiętać o wszystkich pierwiastkach i związkach chemicznych, które emitowane są przy tym do troposfery, a nawet do wyższych warstw atmosfery. Najbardziej mierzalnym rodzajem gazu wulkanicznego jest SO_2 . Podczas odgazowywania wulkanów w latach 2005-2015 aż 125 wulkanów zakwalifikowano jako silne emitory (czyli takie o emisji $>0.014\text{Tg SO}_2/\text{rok}$), gdyż wyemitowały one łącznie $24,9\text{ Tg SO}_2/\text{rok}$. Najwięcej SO_2 wyemitowały w tym okresie: Bagana (1.4 Tg/y), Aoba (1 Tg/y), Anatahan (0.5 Tg/rok) i Manam (0.5 Tg/y) (Fischer i in., 2019).

W tym samym okresie (2005-2017) oszacowano, że 123 wulkany zakwalifikowane jako silne emitory podczas odgazowywania emitowały średnio $36\text{ Tg CO}_2/\text{rok}$. Natomiast z 775 słabych emitatorów (wielkość emisji $<0.014\text{Tg SO}_2/\text{rok}$) w skali roku jest odgazowywane średnio rocznie $15,3\text{ Tg CO}_2$. Łącznie z pasywnego odgazowywania z lawy po erupcji daje to rocznie emisję równą $51,3\text{ Tg CO}_2$. Podczas erupcji wulkanicznych (aktywne odgazowywanie) w skali roku emitowane było $1,8\text{ Tg CO}_2$. Łącznie średnio rocznie w latach 2005-2017 wulkany emitowały $53,1\text{ Tg CO}_2$ (Fischer i in., 2019). W porówna-

niu do tych wartości, tylko w 2022 roku w wyniku czynników antropogenicznych do atmosfery zostało wyemitowane $36\ 800\text{ Tg CO}_2$ [4].

Po eksplozji wulkanu SO_2 reaguje w atmosferze z kroplami chmur tworząc kwaśny opad. Gaz ten może także ulegać konwersji w aerozole kwasu siarkowego, które mają zdolność do odbijania i rozpraszania promieniowania słonecznego obniżając temperaturę [5]. Obserwacje i obliczenia modelowe wskazują, że obecność aerozoli atmosferycznych (nie wliczając tych zawierających czarny węgiel) opóźnia globalne ocieplenie klimatu związane ze zwiększeniem stężenia gazów cieplarnianych (IPCC, 2018).

Przy eksplozji wulkanicznej wydostaje się również popiół wulkaniczny, który w wyniku grawitacji opada na powierzchnie wodne i lądowe Ziemi. Gdy trafi do środowiska wodnego znacząco wpływa na jego skład chemiczny przez dostarczenie kolejnych pierwiastków oraz związków chemicznych, tym samym oddziałując na ilość mikro- i makroelementów. Postawiono hipotezę, że pył wulkaniczny w wodzie powoduje wzrost biomasy fitoplanktonu. Poprzez większą ilość fitoplanktonu oceany mogłyby wchłaniać jeszcze więcej CO_2 (Mather, 2015).

Jedną z bardzo silnych erupcji był wybuch wulkanu Pinatubo w 1991r. Zjawisko to obrazuje ochładzający wpływ SO_2 na atmosferę. Przy wybuchu Pinatubo zostało wyemitowane 20 milionów ton SO_2 do stratosfery. Chmura gazów wulkanicznych i innych cząsteczek skierowała się na zachód i w ciągu 3 tygodni okrążyła całą ziemię. Po zatrzymaniu się na równiku była dużo większa po podróży niż zaraz po wybuchu. Klimatycznym skutkiem erupcji było ochłodzenie Ziemi o $0,3^\circ\text{C}$ przez dwa lata. Spadek temperatury był silnie zauważalny na północnej półkuli, gdzie spadła ona o 3°C w lecie 1992 roku. Natomiast był to stan tymczasowy i 1998 był najcieplejszym rokiem w ostatnim tysiącleciu.

Ze względu na ogrzewanie niższej tropikalnej stratosfery przez aerozole wulkaniczne, zwiększony gradient temperatury spowodował zmianę wzorca cyrkulacji powietrza w troposferze, co miało duży wpływ na temperatury w okresie zimowym. Zimą 1991-1992 temperatura nad Ameryką Północną, Europą i Syberią była znacznie wyższa niż zwykle, natomiast nad Alaską, Grenlandią, Bliskim Wschodem i Chinami była niższa. Zima w tych rejonach była tak mroźna, że w Jerozolimie spadł śnieg, co zdarza się niezwykle rzadko (MacCracken i in., 2003).

Podsumowując, wulkany mają duży wpływ na atmosferę w wielu aspektach. Biorąc pod uwagę emisję CO_2 w trakcie erupcji oraz w wyniku odgazowywania magmy mają one jednak zdecydowanie mniejsze znaczenie dla ocieplania się naszego klimatu, szczególnie w porównaniu do emisji CO_2 pochodzącej z działalności człowieka. Z kolei emitowane przez wulkany związki siarki pozostają w atmosferze przez kilka lat i tworząc aerozole odbijają część promieniowania słonecznego, co prowadzi raczej do ochłodzenia, niż ocieplenia klimatu. Można by zatem stwierdzić, że wulkany mają pozytywny wpływ na zmianę klimatu. Jednakże inne skutki emisji zanieczyszczeń wulkanicznych do atmosfery w odczuwalny sposób mogą negatywnie oddziaływać zwłaszcza na organizmy żywe, w tym na ludzi. Gazy wulkaniczne powodują bowiem niszczenie ozonu w wyższych temperaturach niż polarne chmury stratosferyczne i są odpowiedzialne za jedną trzecią ubytku ozonu na wysokościach około 17 kilometrów [6].

Antropogeniczne przyczyny zmian klimatu

Efekt cieplarniany to zjawisko podwyższenia temperatury planety przez obecne w jej atmosferze gazy cieplarniane, które w znacznym stopniu pochłaniają promieniowanie wyemitowane przez Ziemię. Tylko jedna

czwarta energii dochodzącej do górnej warstwy atmosfery (1370 W/m^2) bierze udział w bilansie energetycznym systemu ziemia-atmosfera (343 W/m^2). Do atmosfery dochodzi promieniowanie słoneczne obejmujące pasmo widzialne oraz część pasma bliskiego ultrafioletu (UV) i bliskiej podczerwieni, a opuszcza ją promieniowanie długofalowe. Promieniowanie krótkofalowe Słońca częściowo zostaje pochłonięte przez chmury (ok. 79 W/m^2), częściowo zostaje odbite przez różne cząstki w atmosferze (ok. 100 W/m^2), a około 185 W/m^2 dociera do powierzchni Ziemi, z czego ok. 24 W/m^2 zostaje od niej odbite (IPCC raport, Climate Change 2013). Ziemia i atmosfera, pochłaniając promieniowanie krótkofalowe Słońca, zamieniają je na ciepło i same stają się źródłem promieniowania. Promieniowanie to nazywane jest długofalowym. Część promieniowania długofalowego wypromieniowanego z powierzchni Ziemi przedostaje się w przestrzeń kosmiczną dzięki tzw. oknom atmosferycznym (długości fal promieniowania ziemskiego, które nie są pochłaniane przez gazy cieplarniane). Jednakże, zdecydowana jego większość zostaje pochłonięta poprzez gazy cieplarniane. Prowadzi to do ocieplenia troposfery i powierzchni Ziemi.

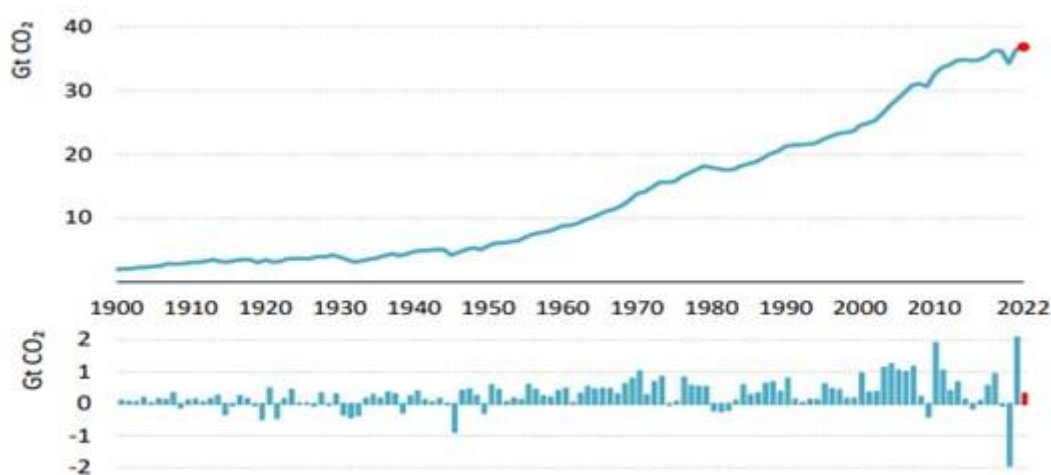
Występują dwa rodzaje efektu cieplarnianego: naturalny i antropogeniczny. Pierwszy z nich istnieje odkąd utworzyła się atmosfera ziemna. Warstwy atmosfery najpierw przepuszczają dużą część promieniowania słonecznego, a następnie zatrzymują znaczną część promieniowania Ziemi, w efekcie temperatura na naszej planecie jest znacznie wyższa niż byłaby bez nich, co umożliwia istnienie życia na Ziemi. Natomiast antropogeniczny efekt cieplarniany powstał w wyniku wzrastającej koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze, zatrzymywania większej ilości promieniowania podczerwonego i w efekcie podwyższenia temperatury atmosfery. Do gazów tych zalicza się: dwutlenek węgla, metan, parę wodną, ozon,

tlenki azotu (NOx) oraz syntetyczne gazy cieplarniane [7].

Dwutlenek węgla (CO₂) stanowi 79,4% emisji gazów cieplarnianych [8]. Gaz ten pochodzi z naturalnych źródeł, np. erupcji wulkanicznych, ale jego stężenie w atmosferze wzrasta przede wszystkim w wyniku różnorodnej działalności człowieka. Główne antropogeniczne czynniki regulujące ilość dwutlenku węgla w atmosferze ziemskiej to spalanie paliw kopalnych i wycinka lasów. Wykorzystujemy węgiel kamienny i brunatny, ropę naftową oraz gaz ziemny jako źródła energii. Poprzez wzrost spalania tych surowców do produkcji energii ilość emitowanego CO₂ na świecie od 1900 roku wzrosła ponad siedmiokrotnie (International Energy Agency, raport 2022). Innym czynnikiem warunkującym stężenie CO₂ w atmosferze jest wycinka lasów. Spełniają one ważną rolę w regulacji klimatu przez proces fotosyntezy,

przy którym wykorzystują dwutlenek węgla i wytwarzają tlen. Zmniejszanie powierzchni zajmowanej przez lasy powoduje także zmianę albedo danego terenu. Zielone obszary pochłaniają więcej promieniowania słonecznego niż jasny piasek, natomiast mniej niż ciemny grunt.

Emisja CO₂ na skutek produkcji energii ma tendencję rosnącą od 1900 roku (Ryc. 5), kiedy wyniosła zaledwie około 2 Gt/rok. Natomiast gwałtowny wzrost emisji tego gazu zaczął się około 1950 roku, gdy szacowano go na około 5 Gt/rok. Przez 70 lat emisja dwutlenku węgla nieustannie wzrosła aż do 2019 roku (37 Gt CO₂). Tylko w 2020 roku, w wyniku obostrzeń związanych z epidemią COVID-19, emisja dwutlenku węgla obniżyła się do wartości poniżej 35 Gt. Jednak już w 2022 roku ponownie wzrosła powyżej 37 Gt/rok



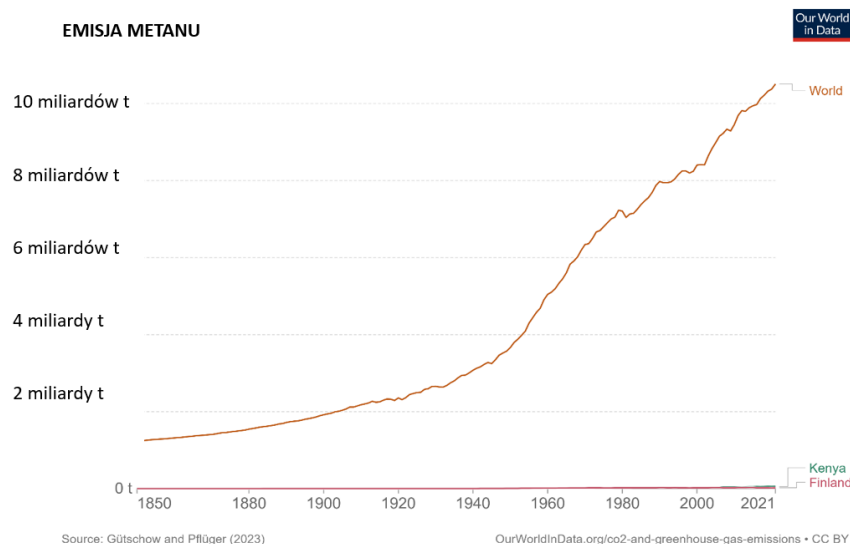
Ryc.5. Ilość wyemitowanego CO₂ przez spalanie dwutlenku węgla by pozyskać energię w Gt (1 Gt= 1×10⁹ t) od 1900 do 2022 roku (International Energy Agency, raport 2022)

Metan (CH₄) stanowi 11,5% emisji gazów cieplarnianych [8]. Molekuła metanu ma silniejszy wpływ cieplarniany niż molekuła dwutlenku węgla. Dodanie do atmosfery jednej tony metanu miałyby większy wpływ

ocieplający, niż dodanie jednej tony dwutlenku węgla. Jednak masa dwutlenku węgla obecnego w atmosferze jest blisko tysiąc razy większa niż masa metanu (3000 mld ton i 3,4 mld ton, odpowiednio). Dodatkowo, dwutlenek węgla zostaje w atmosferze do

kilkuset lat, podczas gdy po upływie kilkunastu lat większość obecnego w atmosferze metanu utlenia się. Dlatego w porównaniu z CO₂ wzrost ilości metanu w atmosferze nie jest tak znaczącym czynnikiem wpływającym

na globalne ocieplenie (IPCC, 2018). Należy jednak pamiętać, że na przestrzeni lat ilość emitowanego metanu nieustannie wzrasta (Ryc. 6).



Ryc.6. Ogólna emisja metanu na świecie na przestrzeni lat 1850-2021 [9]

Emisja metanu pochodząca tylko ze spalania energii w 2022 roku osiągnęła prawie 135 Mt CH₄ (1 Mt = 1·10⁶ T) (International Energy Agency raport, 2022). Największym naturalnym źródłem metanu są bagna. Głównym antropogenicznym źródłem CH₄ jest wykorzystywanie paliw kopalnych przy którym produkowane jest 96 mln ton CH₄ rocznie [10]. Metan emitowany w wyniku działalności człowieka pochodzi również z rolnictwa, a dokładniej z hodowli bydła i upraw ryżu. Hodowla zwierząt odpowiada za 35-40% całkowitej antropogenicznej emisji metanu [10]. Tylko jedna krowa mleczna rocznie emituje go od 120 do 150 kg. Wyliczono, że przeżuwacze, zarówno te domowe jak i dziko żyjące produkują ponad 89 mln ton metanu rocznie na świecie, co stanowi ok. 22% całej emisji tego gazu [11]. Uprawa ryżu natomiast odpowiada średnio za 10% światowej emisji metanu, a w Azji Południowo-Wschodniej nawet za 25-33%.

Oprócz metanu produktem ubocznym produkcji rolniczej jest podtlenek azotu (N₂O) [12]. Gaz ten utrzymuje się w atmosferze około 121 lat i ma niemal 300 razy większy potencjał cieplarniany od dwutlenku węgla [13]. W 2019 roku stanowił około 7% całkowitej antropogenicznej emisji gazów cieplarnianych [14]. Aż 40% globalnej emisji podtlenku azotu pochodzi z działalności człowieka, a aż jedna trzecia powstaje przy produkcji żywności [14]. Ilość podtlenku azotu zwiększa się również przez wzrost wykorzystania nawozów azotowych w rolnictwie, stosowanych aby zwiększyć plony i wydłużyć okres wegetacyjny roślin. Wraz ze wzrastającym zapotrzebowaniem na żywność zużywane jest więcej nawozów tego typu. Oprócz rolnictwa, innymi istotnymi źródłami emisji podtlenku azotu są przemysł, spalanie paliw kopalnych i odpadów stałych, a także oczyszczanie ścieków [14].

Emisje gazów syntetycznych, czyli wytworzonych sztucznie w wyniku działalności człowieka również przyczyniają się do efektu cieplarnianego. Do lat 80-90-tych XX wieku gazy były powszechnie stosowane jako substancje chłodzące w chłodniach, lodówkach i systemach klimatyzacyjnych, jako izolatory elektryczne oraz jako rozpuszczalniki, a także do produkcji materiałów piankowych. Szkodliwe dla atmosfery gazy syntetyczne obejmują wodorofluorowęglowodory

(HFC), perfluorowęglowodory (PFC), sześćciofluorek siarki (SF_6) i trójfluorek azotu (NF_3). Posiadają one bardzo wysoki potencjał ocieplenia globalnego (GWP), wyższy od kilku do kilkudziesięciu tysięcy razy niż potencjał CO_2 (Tab.1). Przy danej ilości masy pochłaniają znacznie więcej promieniowania podczerwonego niż CO_2 . Stanowią one nie więcej niż 3% emisji wszystkich gazów cieplarnianych, jakkolwiek od lat 90-tych XX wieku następuje wzrost emisji tych gazów do atmosfery [8].

Tabela 1. Charakterystyka i potencjał wybranych gazów cieplarnianych [13]

Gaz cieplarniany	Jak dostaje się do atmosfery?	Średni czas trwania w atmosferze	100-letni potencjał globalnego ocieplenia
Dwutlenek węgla	Emitowany głównie poprzez spalanie paliw kopalnych (ropa, gaz ziemny, węgiel), odpadów stałych oraz drzew i produktów drewnianych.	Patrz poniżej*	1
Metan	Emitowany podczas produkcji i transportu ropy oraz gazu ziemnego, jak również węgla. Emisje metanu związane są również z hodowlą, częścią praktyk rolniczych oraz beztlenowym rozkładem odpadów organicznych na wysypiskach śmieci.	12,4 lat **	28-36
Podtlenek azotu	Emitowany w rolnictwie i przemyśle, jak również przy spalaniu paliw kopalnych i odpadów stałych.	121 lat **	265-298
Gazy oparte na fluorze	Grupa gazów zawierających fluor, w tym fluorowęglowodory, perfluorowęglowodory, heksafluorek siarki oraz inne związki. Gazy te emitowane są podczas różnych procesów przemysłowych. Czasem są wykorzystywane w zastępstwie zamiast degradujących warstwę ozonową chlorofluorowęglodorów.	Między kilkoma tygodniami, a tysiącami lat	Różny (najwyższy dla heksafluorku siarki – 23 500)

*Czas życia dwutlenku węgla nie może być przedstawiony za pomocą jednej wartości, ponieważ gaz ten nie ulega zniszczeniu w czasie, lecz przemieszcza się pomiędzy różnymi częściami systemu ocean-atmosfera-ląd. Część nadmiaru dwutlenku węgla jest szybko pochłaniana (na przykład przez powierzchnię oceanu), ale część pozostanie w atmosferze przez tysiące lat, częściowo z powodu bardzo powolnego procesu, w którym węgiel jest przenoszony do osadów oceanicznych.

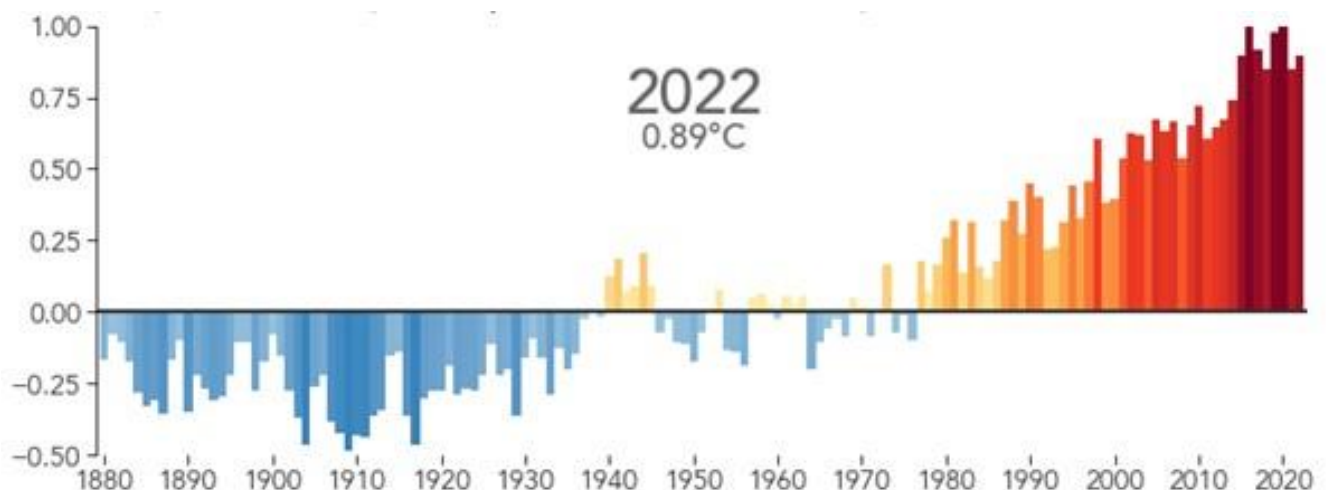
**Przedstawione czasy życia metanu i podtlenku azotu to czasy perturbacji, które zostały wykorzystane do obliczenia przedstawionych tu potencjałów globalnego ocieplenia. Źródło: EPA

Gazem cieplarnianym jest także para wodna. Jest ona jednak niezbędna, podobnie jak dwutlenek węgla pochodzenia naturalnego, do poprawnego funkcjonowania życia na Ziemi. Ciepłe powietrze zatrzymuje więcej wilgoci niż chłodniejsze powietrze. Dlatego wraz ze wzrostem stężenia gazów cieplarnianych i wzrostem globalnej temperatury wzrasta również całkowita ilość pary wodnej w atmosferze, dodatkowo wzmacniając efekt ocieplenia. Należy pamiętać, że gdyby w atmosferze nie występowałyby gazy cieplarniane, temperatura powierzchni Ziemi byłaby o około 33°C niższa. Równowaga

energetyczna utrzymywałaby przy powierzchni Ziemi temperaturę na poziomie około -18°C [15]

Skutki zmiany klimatu

Temperatura powietrza na naszej planecie wzrasta od czasów rewolucji przemysłowej. Od lat 80-tych XX wieku wzrasta w bardzo szybkim tempie anomalia średniej temperatury Ziemi. Około 2015r. osiągnęła ona 1°C w stosunku do okresu 1951-1980. Do takiego wzrostu ponownie doszło przed rokiem 2020. W roku 2022 wynosiła ona $0,89^{\circ}\text{C}$ (Ryc. 7.).



Ryc.7. Anomalie średniej temperatury na Ziemi od 1880 roku do 2022, w porównaniu do średniej temperatury z lat 1951-1980 [3]

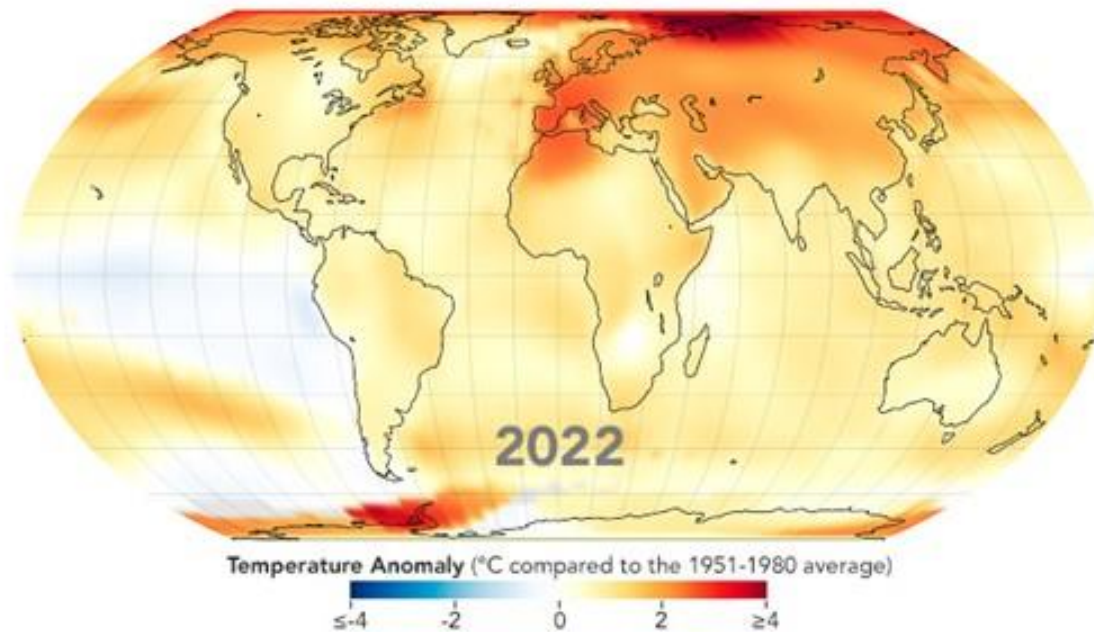
Globalne ocieplenie nie jest równoznaczne z podwyższeniem się temperatury średnio o 1°C na całym globie. W roku 2022 w okolicach podbiegunowych półkuli północnej temperatura powietrza była niemal 4°C wyższa niż średnia z lat 1951-1980, podczas gdy w okolicach równika, na Oceanie Spokojnym obserwowane były temperatury nieco niższe niż średnia z tego wielolecia (Ryc. 8). Wyjątkowo mroźne zimy w jednym regionie świata mogą być „równoważone”

przez wyjątkowo ciepłe zimy w innym. Ogólnie, ocieplenie jest większe nad lądami niż nad oceanami, ponieważ woda wolniej absorbuje i uwalnia ciepło ze względu na dużą pojemność cieplną [16].

Temperatury notowane lokalnie mogą znacznie się wahać ze względu na cykliczność procesów zachodzących na powierzchni ziemi (noc i dzień, lato i zima) oraz trudne do przewidzenia skutki oddziaływania czynników klimatotwórczych zachodzących

w skalach lokalnych, regionalnych i globalnych. Natomiast temperatura całej planety zależy od bilansu promieniowania długo- i krótkofalowego. Energia pochodząca ze Słońca zmienia się bardzo nieznacznie

w ciągu roku, podczas gdy ilość energii wypromieniowanej przez Ziemię jest ściśle związana ze składem chemicznym atmosfery [3].



Ryc.8. Rozkład anomalii średniej temperatury powietrza w stopniach Celsjusza w 2022 roku, w stosunku do średniej z lat 1951-1980 [3]

Dla ludzi wzrost temperatury, nawet o 4°C w pewnych rejonach Ziemi, nie musi być alarmujący. Jednak z roku na rok następuje wzrost maksymalnej temperatury, a to stanowi w dłuższej perspektywie czasu dla nich zagrożenie. Globalna zmiana o jeden stopień ma ogromne znaczenie. Potrzeba bardzo dużej ilości ciepła, aby ogrzać wszystkie oceany, atmosferę i masy lądowe aż o 1°C. Z drugiej strony, w przeszłości wystarczył spadek temperatury powietrza o 1-2°C, aby na Ziemi wystąpiła Mała Epoka Lodowcowa. Z kolei zmniejszenie temperatury o 5°C wystarczyło, by 20 tys. lat temu duża część Ameryki Północnej znalazła się pod ogromną masą lodu [3].

Konsekwencji globalnego ocieplenia i ogólnej zmiany klimatu Ziemi jest bardzo wiele. Aktualnie widoczne już jest wzrastające tempo topnienia lodowców. To prowadzi do szybszego podnoszenia się poziomu morza. Zwiększa się on również na skutek ogrzewania powierzchni mórz i oceanów i zwiększania ich objętości. Globalny średni poziom mórz od 1880 roku wzrósł o około 21–24 cm. Zmniejsza się natomiast zasolenie oraz pH Oceanu Światowego, co prowadzi do zakwaszenia wód [17]. Zmianie ulega również rozkład dynamiki prądów morskich, co widać na przykładzie Prądu Północnoatlantyckiego, który powoli się osłabia. Takie „roz-

regulowanie klimatu" wpływa na wzrost częstości zjawisk ekstremalnych na lądzie, takich jak powodzie czy pożary. Już występują także częstsze fale upałów oraz zaburzona jest cyrkulacja termohalinowa wody. Czynniki te oddziałują nie tylko na ludzi, ale również na faunę i florę. W konsekwencji może mieć to ogromne negatywne skutki dla rolnictwa i rybołówstwa. W wyniku zmiany klimatu mogą wystąpić zakłócenia siedlisk, takich jak rafy koralowe, którym nie sprzyjają wysokie temperatury i wzrost zakwaszenia wody. Może dojść do wyginięcia wielu gatunków roślin i zwierząt. Alergie, astma i epidemie chorób zakaźnych staną się bardziej powszechne z powodu wyższego poziomu zanieczyszczenia powietrza i wyższymi temperaturami sprzyjającym patogenom i insektom [18].

Podsumowując, sytuacja jest kryzysowa, temperatura globalna wzrosła już o 1°C. Ciągłe śledzenie zmian emisji gazów cieplarnianych oraz anomalii temperatury jest bardzo ważne. Należy kontrolować czy starania, które ludzkość podejmuje, aby ograniczyć emisję gazów cieplarnianych pomagają osiągnąć zamierzony cel. Tym celem jest zahamowanie globalnego ocieplenia i konsekwencji, które się z nim wiążą. Istotne jest, by ludzie na całej Ziemi znali przyczyny i skutki antropogenicznej zmiany klimatu i starali się im przeciwdziałać.

Literatura:

- Feluch W. 2011, *Cykliczne przyczyny zagrożeń gwałtownymi zmianami klimatu*
- Hrynowiecka A. 2016, Przyczyny i mechanizmy zmian klimatu w plejstocenie, *Przegląd Geologiczny*, vol. 64, nr 1
- Feulner G., Rahmstorf S. 2010, On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth, *Geophysical research letters*, vol. 37
- Haigh J. 2011, Solar influences on Climate, *Grantham Institute for Climate Change Briefing No 5*
- Fischer T., Arellano S., Carn S., Aiuppa A., Galle B., Allard P., Lopez T., Shinohara H., Kelly P., Werner C., Cardellini C., Chiodini G. 2019, *The emissions of CO₂ and other volatiles from the world's subaerial volcanoes*
- Mather T. 2015, *Volcanoes and the environment: Lessons for understanding Earth's past and future from studies of present-day volcanic emissions*
- MacCracken M., Perry J., Munn T. 2003, *Encyclopedia of Global Environmental Change, Volume 1, The Earth System: Physical and Chemical Dimensions of Global Environmental Change*
- Raport IPCC – „Climate Change”, 2013
- Raport IPCC – „Climate Change”, 2018
- Raport „CO₂ Emissions in 2022”, International Energy Agency (IEA)

Źródła internetowe:

- [1] <https://www.timeanddate.com/astro-nomy/perihelion-aphelion-solstice.html> [dostęp 06.06.2023r.]
- [2] www.wikipedia.pl [dostęp z 27.01.2023r.]
- [3] - <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures> [dostęp 06.06.2023r.]
- [4] <https://www.google.com/amp/s/www.voa-news.com/amp/carbon-dioxide-emissions-reached-a-record-high-in-2022/6986572.html> [dostęp 06.06.2023r.]
- [5] <https://volcano.oregonstate.edu/climate-cooling#:~:text=The%20SO2%20converts%20to%20sulfuric,radia-tion%20can%20cause%20global%20cooling> [dostęp z 20.09.2023r.]
- [6] <https://astronet.pl/loty-kosmiczne/n1690/> [dostęp z 20.09.2023r.]
- [7] <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Natural-vs-anthropogenic-climate-change> [dostęp z 20.09.2023r.]

- [8] <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> [dostęp 06.06.2023r.]
- [9] <https://ourworldindata.org> [dostęp 06.06.2023r.]
- [10] <https://naukaoklimacie.pl/fakty-i-mity/mit-krowy-emituja-wiecej-gazow-cieplarnianych-niz-transport-117/> [dostęp z 20.09.2023r.]
- [11] <https://www.wrp.pl/czy-proby-ograniczenia-emisji-metanu-przez-bydlo-sa-mozliwe/#:~:text=W%20zwaczu%20najwieszymi%20producentami%20metanu,gazu%20przez%20sektor%20hodowli%20bydla> [dostęp 06.06.2023r.]
- [12] <https://blogs.worldbank.org/eastasiapacific/greening-rice-we-eat#:~:text=Rice%20is%20responsible%20for%2010,of%20the%20region%27s%20methan%20%20emissions> [dostęp 06.06.2023r.]
- [13] <https://esero.kopernik.org.pl> [dostęp 06.06.2023r.]
- [14] - <https://swiatoze.pl> [dostęp 06.06.2023r.]
- [15] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Earth_Temperature_without_GHGs#:~:text=Without%20the%20influence%20of%20the,know%20it%20would%20not%20exist [dostęp z 20.09.2023r.]
- [16] <https://www.ces.fau.edu/nasa/module-3/why-does-temperature-vary/land-and-water.php#:~:text=Oceans%20have%20a%20greater%20heat,water%20being%20heated%20than%20land> [dostęp z 20.09.2023r.]
- [17] <https://www.noaa.gov> [dostęp 06.06.2023r.]
- [18] <https://www.nrdc.org/stories/global-warming-101#contribute> [dostęp 06.06.2023r.]

Notka o autorce: *Studentka I roku Oceanografii I stopnia na Uniwersytecie Gdańskim. Fascynują ją procesy zachodzące w wodzie oraz zależności między środowiskiem a organizmami. Interesuje ją również zmiana klimatu, jej przyczyny oraz skutki, a także metody zapobiegania globalnemu ociepleniu.*