



Stanowisko Komitetu Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk w debacie klimatycznej

Dziesięć lat temu Komitet Nauk Geologicznych PAN (KNG PAN) przedstawił swoje stanowisko w kwestii ocieplenia klimatu wskazując, że zmiany klimatu w geologicznej skali czasu są zjawiskiem naturalnym, a ocieplenie obserwowane współcześnie należy powściągliwie interpretować jako (wyłączny bądź dominujący) skutek działalności człowieka. Wobec rosnącej intensywności aktualnej debaty klimatycznej, czujemy się w obowiązku ponownie zająć stanowisko w tej sprawie.

Ocieplenie klimatu w skali globalnej, od około 150 lat dokumentowane jest przez naukę bezpośrednimi pomiarami temperatury oraz obserwacjami tak spektakularnych procesów jak zmniejszanie zasięgu lodu morskiego czy recesje lodowców górskich i polarnych. Jest ono skorelowane z zapoczątkowanym około 150 lat temu szybkim rozwojem przemysłu epoki industrialnej, który opiera się na paliwach kopalnych: węgla, ropy, gazie ziemnym. Ich spalanie powoduje emisję do atmosfery CO₂, który jest jednym z tzw. gazów cieplarnianych. Wzrost zawartości CO₂ w atmosferze, monitorowany bezpośrednimi pomiarami od 1955 roku (krzywa Keelinga), zdecydowana większość badaczy uważa za przyczynę ocieplenia klimatu. Ten pogląd, upowszechniany przez media, wywołuje głębokie zaniepokojenie opinii publicznej, co skłania rządy wielu krajów do podejmowania gwałtownych i kosztownych działań dla zahamowania i zaprzestania emisji CO₂ do atmosfery. W niniejszym opracowaniu proponujemy spojrzenie na relacje CO₂-temperatura w geologicznej skali czasu dla lepszego zrozumienia ich wzajemnego związku przyczynowo-skutkowego.

Argumenty z dziedziny geologii w debacie klimatycznej to informacje o stanie powierzchni Ziemi w przeszłości przedindustrialnej, gdy decydowały o tym stanie na pewno czynniki naturalne. Geologia dostarcza przede wszystkim pewnej wiedzy, że naczelną cechą klimatu Ziemi w całej jej historii jest zmienność. Zmiany zachodzą w nakładających się cyklach o różnej długości trwania – od kilkunastu lat do dziesiątków milionów lat – rządzonych splotem wielu czynników pozaziemskich i ziemskich. Zmiany klimatu są wymuszane także przez procesy aperiodyczne, wynikające z ewolucji Słońca, zmienności koncentracji gazów szklarniowych w atmosferze, kumulacji działalności wulkanicznej czy impaktów asteroidów. Klimatotwórcze współzależności między nimi nie zostały jeszcze w pełni rozpoznane.

Zmienność temperatur w skali setek milionów lat (fanerozoik)

W interesującej nas kwestii związku koncentracji CO₂ w atmosferze z temperaturą na powierzchni Ziemi trzeba stwierdzić, że zapis geologiczny nie wskazuje na istnienie prostej zależności korelacyjnej między tymi dwiema zmiennymi.

Dostępne informacje o cyklach najdłuższych – w skali epok geologicznych - wskazują, że najwyższe średnie temperatury (do 14°C wyższe od współczesnych) panowały na Ziemi ok. 480 mln lat temu: na granicy kambru i ordowiku, przed 270 mln lat – w permie oraz ok. 80 mln lat temu: w późnej kredzie, najniższe zaś (parę stopni niższe od współczesnych) ok. 450 mln lat temu: w ordowiku i przed ok. 25 000 lat (**Fig. 1,2**). Poziom CO₂ spadł z kilku tysięcy ppm w kambrze (ok. 520 mln lat) do kilkuset ppm w karbonie (ok. 300 mln lat), następnie wzrósł do ponad 2000 ppm w mezozoiku i spadł ponownie do kilkuset ppm w neogenie (ostatnie 20 mln lat). W takiej skali widać korelację długotrwałych (dziesiątki mln lat) minimów temperaturowych z minimami poziomu CO₂ (karbon i neogen), ale już na przełomie jury i kredy temperatura spadła do poziomu dzisiejszego, podczas gdy poziom CO₂ był sześciokrotnie wyższy niż dziś. Taka sytuacja jest sprzeczna z paradygmatem efektu cieplarnianego. Podobny paradoks dotyczy zlodowacenia ordowickiego (**Fig. 1**) czy okresu holocenijskiego (**Fig. 5 poniżej**), kiedy poziom koncentracji CO₂ i metanu wzrasta, a temperatura spada, począwszy od ok. 7000 lat temu. Należy więc dopuścić hipotezę o istnieniu innych czynników warunkujących klimat, które potrafiły stłumić efekt szklarniowy.

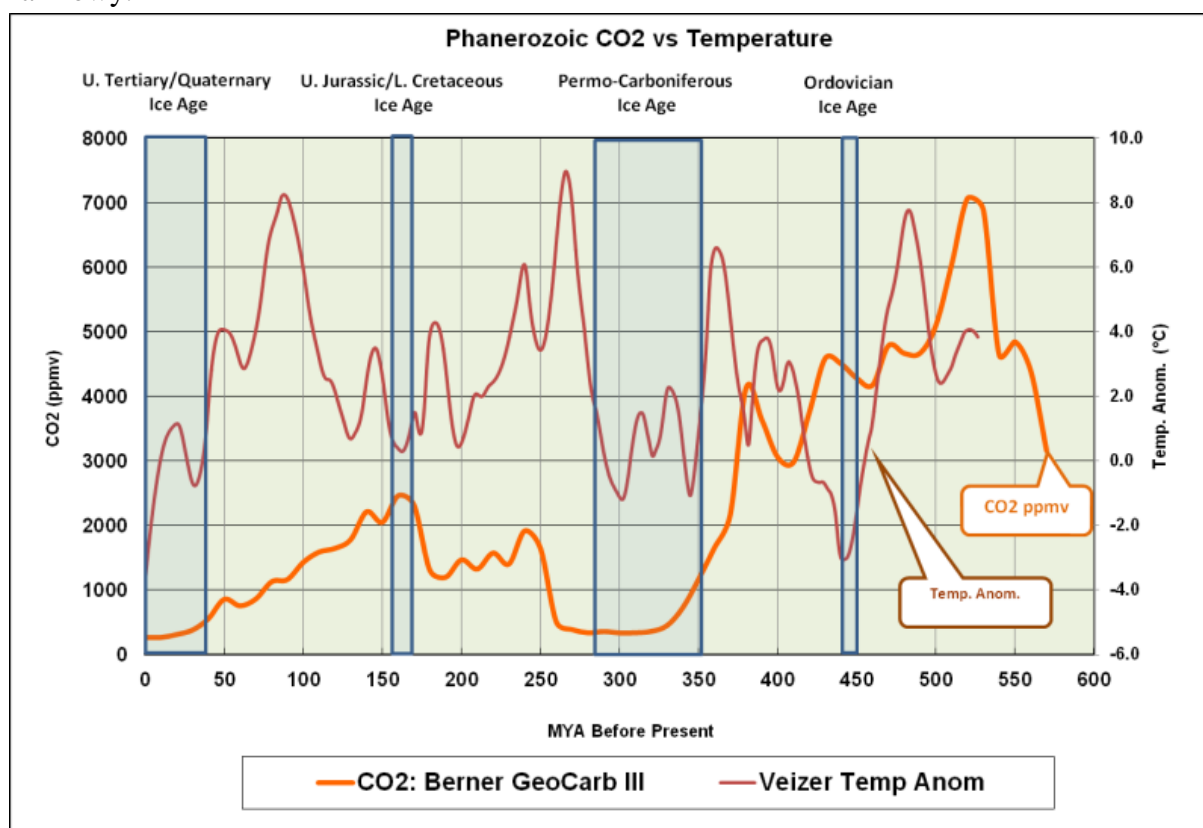


Fig. 1. Historia zmian temperatury globalnej (linia brązowa) i koncentracji CO₂ (linia pomarańczowa) w okresie od 600 mln lat do dziś. Źródło: <https://wattsupwiththat.com/2012/12/07/a-brief-history-of-atmospheric-carbon-dioxide-record-breaking/>, (cf. Berner & Kothavala, 2001).

Najciekawsze - jako analog dla współczesności - ocieplenie po okresie lodowcowym na początku permu przyszło wcześniej niż wyraźny wzrost CO₂ z końcem permu. Te obserwacje sugerują, że w cyklach najdłuższych nie ma prostej zależności przyczynowo-skutkowej między poziomem CO₂ w atmosferze a temperaturą na powierzchni Ziemi.

Zmienność temperatur w skali setek tysięcy lat (plejstocen)

Dla ostatnich 800 tys. lat są dostępne informacje o poziomie CO₂ i temperaturze oparte o analizę powietrza uwięzionego w lodzie Antarktydy (projekty EPICA i Vostok). Wartość paleotemperatur określono metodą stosunków izotopów tlenu ¹⁶O/¹⁸O. Obie wartości (CO₂ oraz T°C) są silnie skorelowane, ale wzrost temperatury z reguły nieznacznie wyprzedza wzrost poziomu CO₂ (Fig. 2). Od ok. 450 tys. lat miały miejsce cztery pełne cykle ocieplenia klimatu do podobnego (a nawet wyższego) poziomu temperatury, jaki jest obserwowany obecnie, i wzrostu stężenia CO₂ do wartości ok. 300 ppm. Piąta analogiczna faza zaczęła się ok. 12 tys. lat temu i znajduje się na etapie maksimum temperaturowego. Amplituda zmian temperatury w plejstocenie sięgała 10°C i z pewnością nie była spowodowana działalnością człowieka. Uważa się, że przyczyną były okresowe zmiany parametrów orbitalnych Ziemi w jej obiegu wokół Słońca (tzw. cykle Milankowicza). Te obserwacje zdają się wskazywać, że wzrost poziomu CO₂ w atmosferze do wartości ok. 300 ppm jest raczej skutkiem niż przyczyną wzrostu temperatury globu, co nie wyklucza sprzężenia zwrotnego: wzmocnienia trendu wzrostowego temperatury przez CO₂.

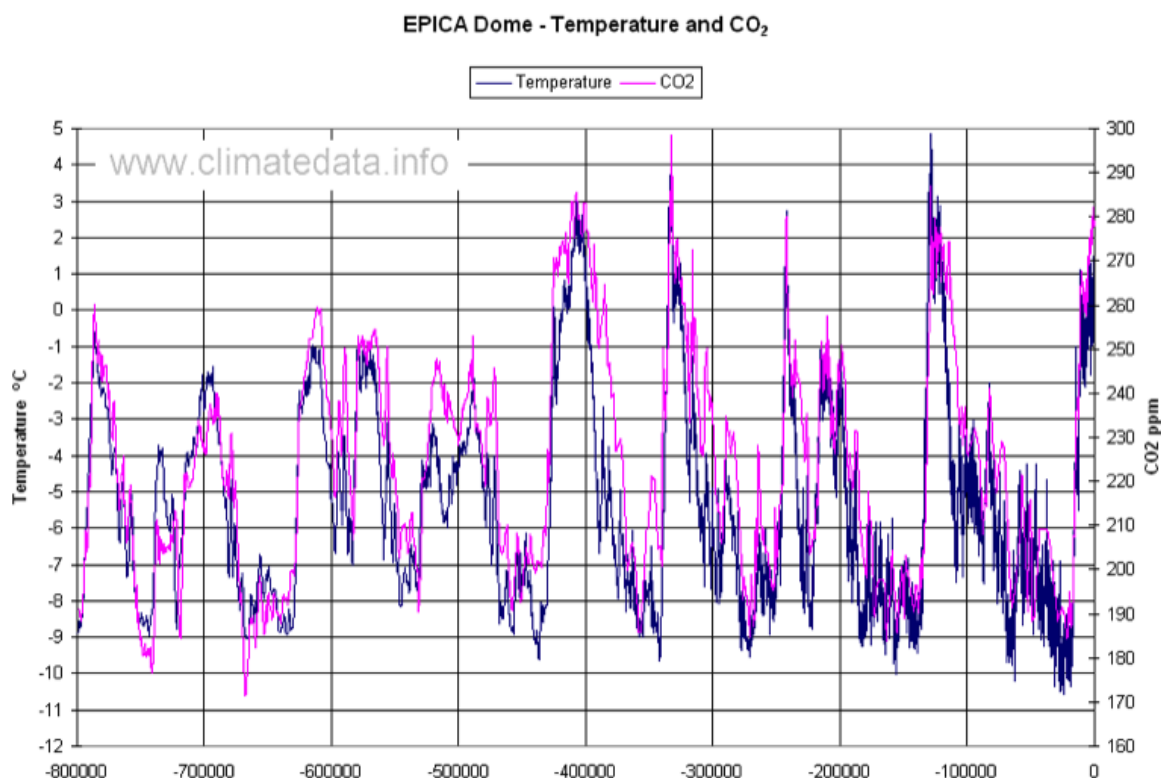


Fig. 2. Zmienność koncentracji CO₂ (linia fioletowa) i odchylenia temperatury (linia niebieska) od poziomu współczesnego (linia 0) na podstawie badań rdzeni lodowych Antarktydy (project EPICA). Źródło: <http://www.climatedata.info/proxies/ice-cores/>; (cf. Jouzel et al. 2007; Lüthi et al. 2008).

Zmienność temperatur w skali setek lat (okres historyczny)

W ramach piątego maksimum klimatycznego, w którym się znajdujemy, temperatura na Ziemi rośnie od min. 300 lat (**Fig. 3**), począwszy od minimum klimatycznego tzw. Małej Epoki Lodowej (MEL, ang. LIA). W okresie MEL, ludzie przemieszczali się zimą saniami poprzez całkowicie zamrożony Bałtyk. Z kolei przed MEL, ok. 850 lat temu, ludzkość doświadczała uroku Średniowiecznego Optimum Klimatycznego, kiedy temperatura na Ziemi była wyższa niż obecnie.

Zasadniczą różnicą między okresowymi wzrostami temperatury globalnej w ciągu ostatniego miliona lat a czasami współczesnymi wydaje się być tempo tych zmian. Uważa się, że dziś jest ono znacząco wyższe niż dawniej. Niepewność polega na tym, że nie potrafimy porównać dawnej dynamiki wzrostu temperatury i koncentracji CO₂ z dynamiką dzisiejszą. Współcześnie mamy do dyspozycji długie i ciągłe serie czasowe pomiarów temperatury, które wykonujemy termometrami naziemnymi lub przyrządami umieszczanymi na satelitach bądź w balonach o zasięgu stratosferycznym. Informacje o temperaturze na dawnej Ziemi pozyskujemy metodami pośrednimi, których wyniki są obarczone niepewnością co do rzeczywistej wartości temperatury oraz czasu (wieku geologicznego). Jest zatem możliwe, że dawniej tempo zmian temperatury było podobne do dzisiejszego, ale niepełne ciągi danych, założenia metodyczne oraz uśrednienia i uogólnienia interpretacyjne nie pozwalają na pełną obserwację rzeczywistych przebiegów zmian temperatury i koncentracji CO₂. W konsekwencji, obserwowane współcześnie tempo wzrostu temperatury nie może być traktowane jako dowód na to, że naturalny proces wzrostu temperatury na Ziemi został w zauważalnym stopniu wzmocniony przez efekt cieplarniany, związany z antropogenicznym CO₂. Wskazuje na to również wyraźny epizod ocieplenia w latach trzydziestych dwudziestego wieku - na terytorium dzisiejszej Polski zanotowano wówczas najwyższe temperatury, odnotowane ponownie dopiero w 2019 roku.

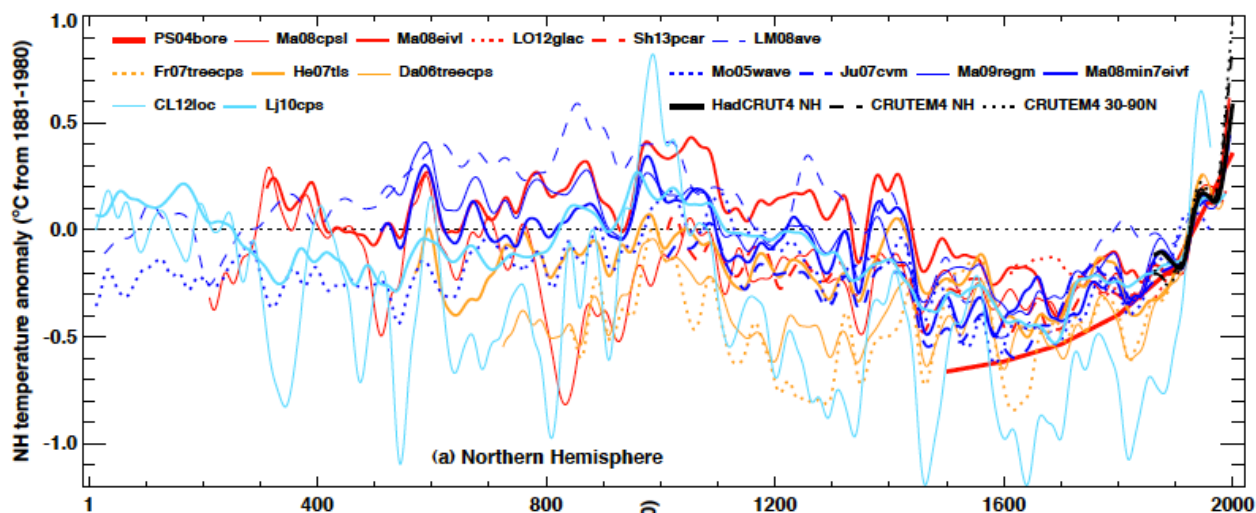


Fig. 3. Fluktuacje temperatury globalnej przedstawione jako anomalie względem średniej za ostatnie 2000 lat (na podstawie IPCC Annual Report, 2013). Począwszy od 1881 roku oparte na danych pomiarowych, dane wcześniejsze oparte o interpretacje geochemiczne (kolorowe linie przedstawiają różne opracowania, opisane na górze wykresu).

Od ok. 1958 roku poziom CO₂ w atmosferze (316 ppm, punkt początkowy tzw. krzywej Keelinga, bliski średniej z poprzednich okresów maksymalnego ocieplenia: **Fig. 2**) zaczął rosnąć i w roku

2018 osiągnął poziom 413 ppm. Wzrost ten jest silnie skorelowany z antropogeniczną emisją CO₂ oraz ze wzrostem temperatury. Wzrost temperatury zaczął się jednak ok. 1920, czyli 30 lat wcześniej, a jego poziom, póki co, nie odbiega znacząco od poziomów znanych z poprzednich cykli ocieplenia. Średnia temperatura mierzona w dolnych warstwach atmosfery oscyluje w ciągu ostatnich 40 lat wokół średniej wieloletniej (**Fig. 4**), choć z drugiej strony, ostatnie dwie dekady były cieplejsze niż wyliczona średnia wieloletnia. Naszym zdaniem dane te przekonywująco dowodzą, że wzrost poziomu CO₂ w atmosferze wiąże się z działalnością człowieka, natomiast nie stanowią twardego dowodu, że wzrost temperatury jest jedynie wynikiem wzrostu poziomu CO₂. IPCC (cyt. za Annual Report 5) wyciągnął z tych danych odmienny wniosek: *“The best estimate of the human induced contribution is similar to the observed warming over this period”*. Według IPCC można zatem wykazać, że ten wzrost jest spowodowany działalnością człowieka, aczkolwiek sami autorzy Raportu stwierdzają, że związek pomiędzy działalnością człowieka a wzrostem temperatury jest tylko „prawdopodobny” (*Anthropogenic forcings have likely made a substantial contribution to surface temperature increases since the mid-20th century over every continental region except Antarctica*).

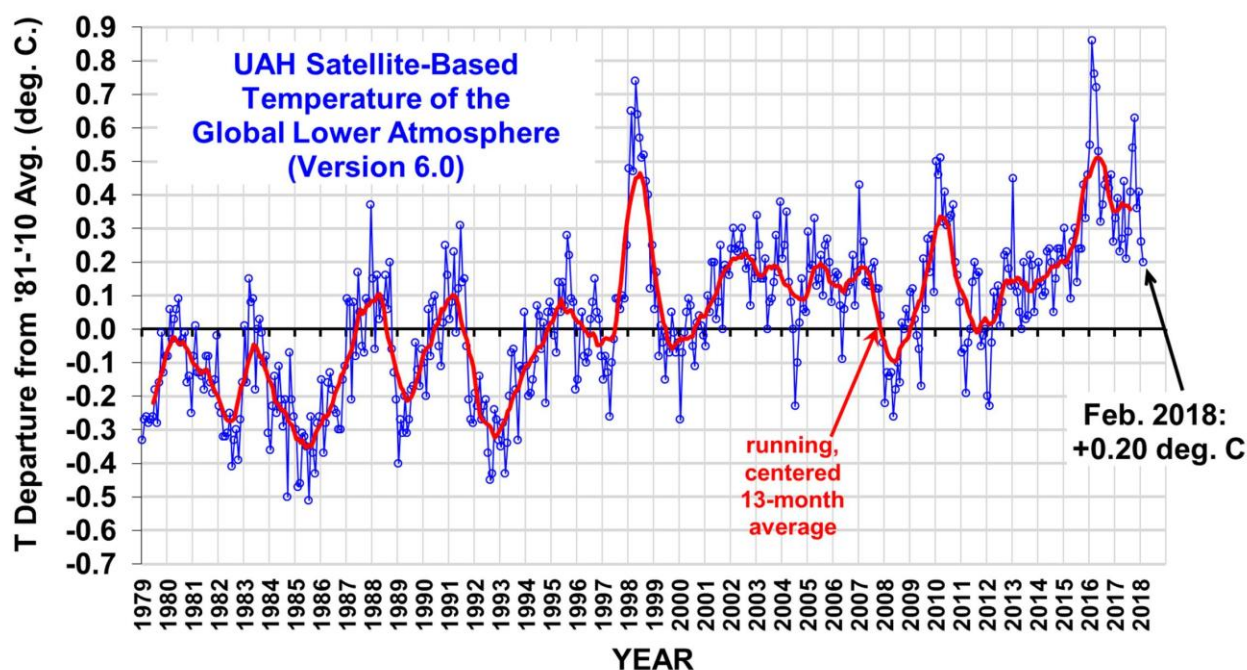


Fig. 4. Pomierzone temperatury dolnej atmosfery w ciągu ostatnich 40 lat. Piki wzrostowe temperatury przypisywane są zjawisku El Nino. Źródło: University of Alabama – Huntsville (UAH) – Dr. Roy Spencer: <https://wattsupwiththat.com/global-temperature/>.

Temperaturą na powierzchni Ziemi rządzi Słońce. Nasłonecznienie (insolacja) jest zależne od aktywności naszej gwiazdy. Im większa aktywność, tym więcej emitowanej energii i tym wyższa temperatura na Ziemi. Aktywność Słońca maleje od kilku (jedenastoletnich) cykli słonecznych, jednak mimo to temperatura na Ziemi nie spada. To zjawisko może niepokoić. Zgodnie bowiem z trendem aktualnego cyklu Milankowicza, wzmocnionego malejącą insolacją, temperatura na Ziemi powinna spadać i powinniśmy zmierzać w kierunku kolejnego glacjału (**Fig. 5**, linia fioletowa). Jest jednak odwrotnie, czego dowodzą dane obserwacyjne ostatnich dekad, nie tylko fizyczne, ale i

przyrodnicze. Takie przyrodnicze przesłanki pozwalają sformułować hipotezę, że wzrost temperatury w ciągu ostatnich dekad jest powiązany przyczynowo z działalnością człowieka. Mimo to, trwa jednak naukowa dyskusja, w jakim stopniu CO₂ jest odpowiedzialny za wzrost temperatury (Curry & Webster, 2011). Na przykład, Monnin et al. (2004) wskazują na stopniowy spadek temperatury na Ziemi od ok. 5000 lat, przy jednoczesnym wzroście koncentracji CO₂ i CH₄ (Fig. 5). Z kolei współczesny wzrost temperatury i gazów cieplarnianych bardzo przypomina sytuację z okresu preborealnego, kiedy pomiędzy 11 500 a 11 000 lat poziom koncentracji CO₂ oraz temperatura dynamicznie rosły, aczkolwiek bez ingerencji człowieka (Fig. 5).

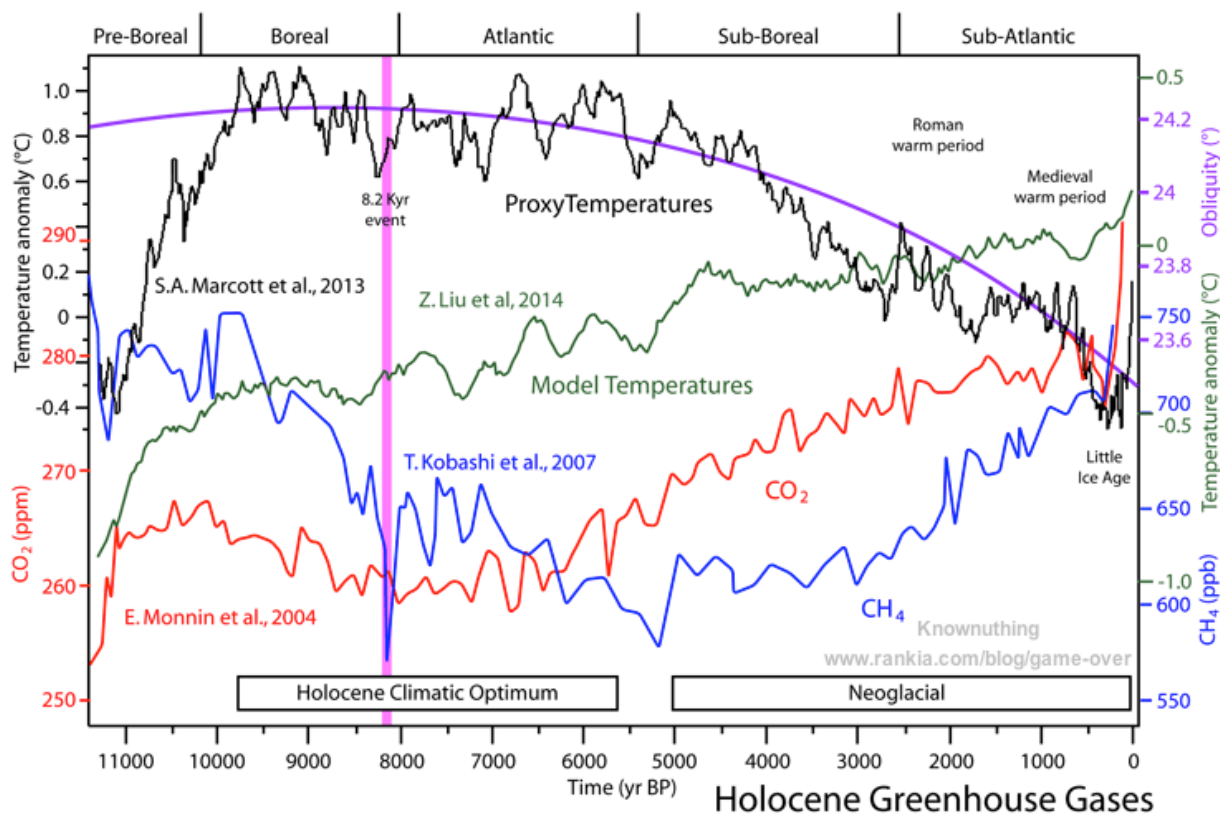


Fig. 5. Zmiany koncentracji CO₂ (czerwona linia) i CH₄ (niebieska linia) porównane ze zmianami temperatury globalnej (linia czarna). Linia zielona – zmiany temperatury wg modeli paleoklimatycznych. Fioletowa linia krzywa – zmiana skośności osi obrotu Ziemi, korelująca pozytywnie ze zmianą temperatury interpretowaną na podstawie przesłanek pośrednich; czerwona linia pionowa wskazuje na paradoksalną koincydencję minimum koncentracji metanu z ociepleniem klimatu (linia czarna) w okresie Holocenu Klimatycznego. Wykresy przedstawiają zmiany za ostatnie 11 tys. lat. Źródło: <https://judithcurry.com/2017/04/30/nature-unbound-iii-holocene-climate-variability-part-a/>.

Modele klimatyczne

Wzrost temperatury globalnej w ciągu ostatnich 300 lat (Fig. 3, Fig. 5) jest faktem, któremu zaprzeczyć nie można. Dyskusyjne jednak jest nie tylko tempo tego wzrostu w porównaniu do podobnych wzrostów znanych z poprzednich okresów historycznych (patrz rozdział poprzedni), lecz przede wszystkim prognozy na przyszłość, które tworzy się w oparciu o modele klimatyczne. W zasadzie wszystkie modele (przygotowane przez mocne zespoły badawcze i publikowane w najlepszych czasopismach naukowych), przewidywały wzrost temperatury na Ziemi w latach 1975-2025. Średnia wzrostu dla wszystkich modeli wyniosła ok. 1,2°C (Fig. 6), przy czym wyniki

znacząco różniły się między sobą. Co więcej, współczesne pomiary temperatury w środkowej troposferze dają wynik trzykrotnie niższy od wartości średniej, przewidywanej przez omawiane modele (Fig. 6). Podobnie, modelowanie klimatu w holocenie (ostatnie 11,2 tys. lat – por. Fig. 5, linia zielona) rozmija się z obserwacjami przyrodniczymi (Liu et al. 2014). Przyczyny takiego stanu rzeczy są przedmiotem dyskusji (przyjęte parametry wyjściowe dla modelowania, techniki pomiarowe, algorytmy programów obliczeniowych), wykraczającej poza zakres niniejszego opracowania.

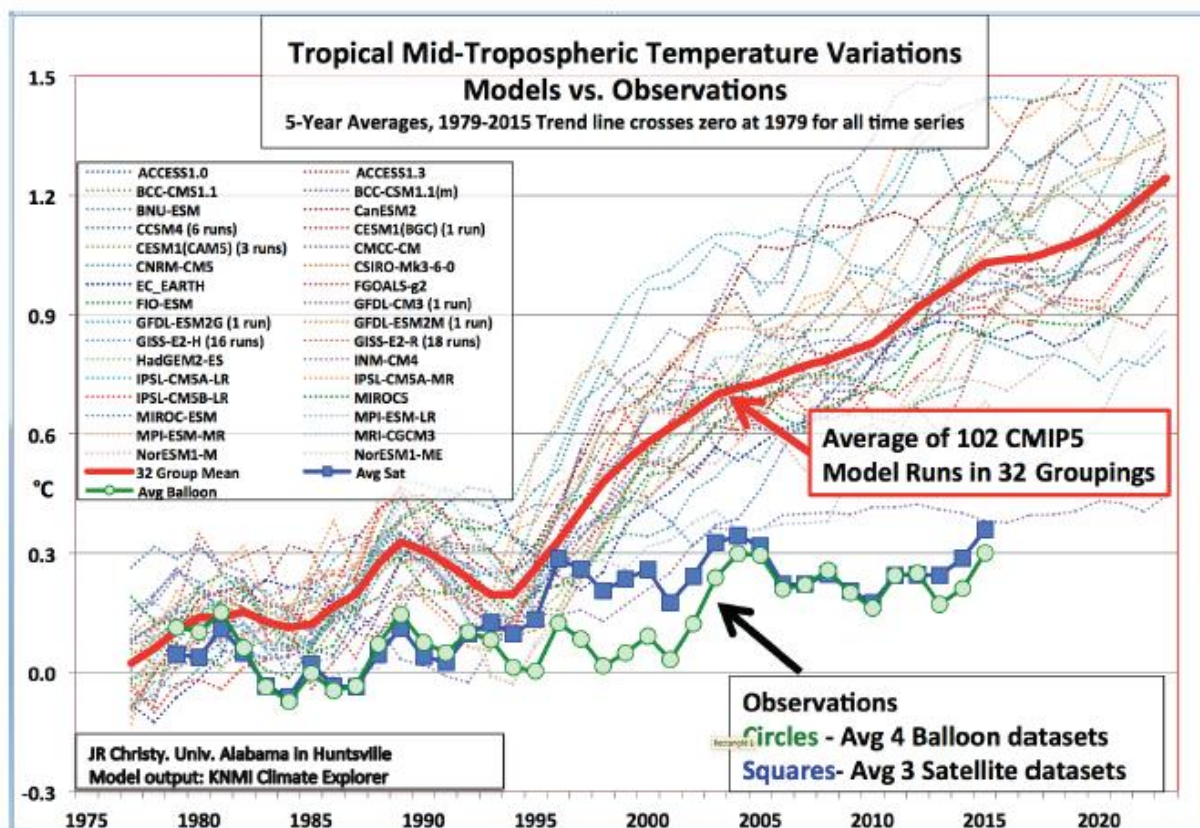


Fig. 6. Obserwowany zmiany temperatury na Ziemi (kółka i kwadraty) i wzrost temperatury przewidywany przez modele klimatyczne. Ciągła czerwona linia reprezentuje średnią wartość dla ponad stu modeli. Źródło: <https://judithcurry.com/2016/04/05/comparing-models-with-observations/>.

Podsumowanie i wnioski praktyczne

Dane geologiczne, analizowane w różnych skalach czasowych, nie potwierdzają prostej uniwersalnej zależności przyczynowo-skutkowej między wzrostem poziomu CO₂ w atmosferze a wzrostem temperatury, sugerując większą złożoność zjawiska zmienności temperatury naszej planety. Z drugiej strony nie wykluczają takiej zależności w konkretnych przypadkach, a w szczególności zjawiska sprzężenia zwrotnego, czyli wzmocnienia naturalnego trendu wzrostu temperatury przez wywołane tym wzrostem, ale także antropogeniczne, podnoszenie się poziomu CO₂ w atmosferze. Wynika stąd wniosek, że nawet jeśli obserwowany obecnie wzrost temperatury jest zjawiskiem naturalnym, to antropogeniczny CO₂ może ten trend wzmocnić. Jeśli zatem wzrost temperatury uznajemy za zjawisko niepożądane, to należy próbować go minimalizować. Głównym dostępnym ludzkości działaniem w tym kierunku jest ograniczenie spalania węgla i węglowodorów, gdyż emitujemy rocznie ok. $3,7 \cdot 10^{10}$ ton CO₂/rok (Le Quéré et al., 2018), tj. o dwa rzędy wielkości

więcej niż obecnie wszystkie wulkany na Ziemi razem wzięte ($2 \cdot 10^8$ ton rocznie, wg US Geological Survey).

Spalając węgiel i węglowodory kopalne odwracamy bieg naturalnych procesów geologicznych. Ostatnie dwa miliardy lat, a w szczególności ostatnie pół miliarda lat, to okres naturalnej sekwestracji dwutlenku węgla (fotosynteza) z atmosfery do skorupy ziemskiej poprzez grzebanie materii organicznej w osadach i jej przekształcanie w złoża węgla oraz węglowodorów stałych, płynnych i gazowych (metan). Równolegle CO_2 był sekwestrowany dzięki wietrzeniu chemicznemu w postaci skał węglanowych. Węgiel odkładał się w skorupie powoli i dość systematycznie, czego efektem był blisko dwudziestokrotny spadek koncentracji CO_2 w atmosferze - od ok. 7000 ppm (+40%) w kambrze (**Fig. 1**) do poziomu ok. 300 ppm w roku 1950. Z punktu widzenia ewolucji atmosfery ziemskiej dziś dwutlenku węgla prawie nie ma. Tak niski poziom koncentracji CO_2 w atmosferze mógł być – podobnie jak w karbonie (**Fig. 1**) – istotną przyczyną globalnego zlodowacenia, które zaczęło się ok. 33 mln lat temu powstawaniem pokryw lodowych na Antarktydzie i nasilało się aż do zamarznięcia Oceanu Arktycznego ok. 2 mln lat temu. Zgodnie z prawem Henry'ego, coraz zimniejszy ocean światowy pochłaniał coraz więcej CO_2 , napędzając schładzanie powierzchni Ziemi poprzez zmniejszanie efektu cieplarnianego (w myśl tego samego prawa, ogrzany ocean odda do atmosfery nadmiarowy CO_2). W efekcie, mamy dziś największe zlodowacenie globalne w ciągu ostatniego pół miliarda lat. Przyszliśmy na świat w tym wyjątkowym czasie i, chcemy czy nie, jesteśmy dziećmi globalnego chłodu. Istnieje ryzyko, że wraz z jego odejściem, odejdziemy i my. Wydaje się zatem roztropne podtrzymanie obecnego stanu geosystemu jak najdłużej będzie to możliwe.

Z pragmatycznego punktu widzenia, najbardziej skuteczne są/będą te działania, które wykorzystują procesy pochłaniania CO_2 i usuwania go z atmosfery w takiej ilości, w jakiej jest emitowany do atmosfery wskutek działalności człowieka. Z czystej przeczności, należy jednak rozważyć scenariusze najgorsze z możliwych i zacząć działania adaptacyjne, niezależnie od tego czy scenariusze te są, czy nie są prawdziwe. Spory naukowe dotyczące roli CO_2 w procesie zmian klimatu, często uwarunkowane konfliktami grupowymi lub personalnymi, powinny iść torem przyjętym w dyskursie naukowym, a nie odbywać się na forum publicznym, gdyż rozbieżne oceny powodują zamęt pojęciowy, chaos informacyjny, a nawet panikę, szczególnie wśród młodzieży.

Skomplikowane procesy, które rządzą klimatem, wymagają prowadzenia interdyscyplinarnych badań przez różne grupy o różnych specjalnościach, nie tylko w ramach IPCC, z pewnością także i w Polsce. Powinny to być badania cyklicznych fluktuacji klimatycznych w przeszłości Ziemi i ich uwarunkowań odczytywanych z zapisu kopalnego, monitorowanie poznanych dotąd czynników sprawczych, modelowanie ich udziału w przekształceniach klimatu i weryfikowanie sporządzanych modeli w odniesieniu do zdarzeń przeszłych dla oceny ich wiarygodności w prognozowaniu zdarzeń przyszłych.

Komitet Nauk Geologicznych PAN w składzie:

prof. dr hab. Jan Burchart, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk

dr hab. inż. Józef Chowaniec, prof. PIG-PIB

prof. dr hab. inż. Wojciech Ciężkowski

prof. dr hab. Marian Adam Gasiński

prof. dr hab. Jan Golonka
dr hab. Michał Gradziński, prof. UJ
prof. dr hab. Krzysztof Jaworowski
prof. dr hab. Andrzej Konon, sekretarz KNG PAN
dr hab. Piotr Krzywiec, prof. ING PAN
prof. dr hab. Marek Lewandowski
prof. dr hab. Stanisław Lorenc
prof. dr hab. Leszek Marks
prof. dr hab. Leszek Marynowski
prof. dr hab. inż. Jacek Matyszkiewicz, przewodniczący KNG PAN
prof. dr hab. inż. Jacek Motyka
prof. dr hab. Andrzej Muszyński
prof. dr hab. Tadeusz Peryt
prof. dr hab. Szczepan Porębski
prof. dr hab. Jan Przybyłek
prof. dr hab. Stanisław Skompski
prof. dr hab. Ewa Słaby
prof. dr hab. Krzysztof Szamałek
dr Ryszard Szczęsny
dr hab. Witold Szczuciński, prof. UAM
prof. dr hab. Michał Szulczewski, członek rzeczywisty Polskiej Akademii Nauk
prof. dr hab. Jan Środoń
prof. dr hab. Jerzy Trammer
prof. dr hab. Alfred Uchman, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk
prof. dr hab. Ireneusz Walaszczyk, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk
dr hab. Michał Zatoń, prof. UŚ
prof. dr hab. Jerzy Żaba, wice-przewodniczący KNG PAN
prof. dr hab. Andrzej Żelaźniewicz, członek rzeczywisty Polskiej Akademii Nauk

Bibliografia cytowana w tekście:

- Berner, R. A. & Kothavala, Z., 2001. GEOCARB III: a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 301: 182–204.
- Curry, J. A. & Webster, P. J., 2011. Climate science and the uncertainty monster. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 175 (12): 1667–1682. doi:10.1175/2011BAMS3139.1.
- Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J. M., Chappellaz, J., Fischer, H., Gallet, J. C., Johnsen, S., Leuenberger, M., Loulergue, L., Luethi, D., Oerter, H., Parrenin, F., Raisbeck, G., Raynaud, D., Schilt, A., Schwander, J., Selmo, E., Souchez R., Spahni, R., Stauffer, B., Steffensen, J. P., Stenni, B., Stocker, T. F., Tison, J. L., Werner, M. & Wolff, E. W., 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. *Science*, 317 (5839): 793–796. doi: 10.1126/science.1141038.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., Pickers, P. A., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Arneeth, A., Arora, V. K., Barbero, L., Bastos, A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Doney, S. C., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Harris, I., Haverd, V., Hoffman, F. M., Hoppema, M., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K.,

- Johannessen, T., Jones, C. D., Kato, E., Keeling, R. F., Goldewijk, K. K., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., Neill, C., Olsen, A., Ono, T., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Peylin, P., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rocher, M., Rödenbeck, C., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sutton, A., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., Wright, R., Zaehle, S. & Zheng, B., 2018. Global carbon budget. *Earth System Science Data*, 10: 2141–2194. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>.
- Liu Z., Zhu J., Rosenthal, Y., Zhang, X., Otto-Bliesner, B. L., Timmermann, A., Smith, R.S. Lohmann, G., Zheng, W. & Timm, O. E., 2014. The Holocene temperature conundrum. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (34): E3501–E3505. doi: 10.1073/pnas.1407229111.
- Lüthi, D., Floch, M., Le Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura K. & Stocker T. F., 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453 (7193): 379–382. doi: 10.1038/nature06949.
- Monnin, E. S., Siegenthaler, U., Kawamura, K., Schwander, J., Stauffer, B., Stocker, T. F., Morse, D. L., Barnola, J-M., Bellier, B., Raynaud, D. & Fischer, H., 2004. Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during the Holocene, through synchronization of CO₂ in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores. *Earth and Planetary Science Letters*, 224: 45–54.