

Stężenie CO₂ - jak zmieniało się na przestrzeni wieków?

W maju zeszłego roku mierzone w obserwatorium Mauna Loa na Hawajach stężenie CO₂ po raz pierwszy przekroczyło 400 cząsteczek na milion cząsteczek powietrza (ppm). W tym roku nastąpiło to już w marcu, średnia za kwiecień wyniosła 401,33 ppm, w maju będzie jeszcze większa, zanim w kolejnych miesiącach spadnie, gdy rozkwitająca na półkuli północnej roślinność zacznie asymilować dwutlenek węgla z atmosfery. Pnąc się w górę w 2015 roku średnioroczne stężenie CO₂ przekroczy próg 400 ppm. Czy są to normalne i naturalne fluktuacje? Jak obecne zmiany mają się do zmian w mniej lub bardziej odległej historii? Jakich zmian emisji i stężenia CO₂ możemy spodziewać się w przyszłości i jak wpłynie to na zmianę klimatu?

Pompując CO₂ do atmosfery

Dwutlenek węgla to silny gaz cieplarniany, a wzrost jego ilości w atmosferze prowadzi do zmiany klimatu Ziemi. Gdy spalamy węgiel, ropę i gaz, wprowadzamy do atmosfery coraz większe ilości dwutlenku węgla. Trwająca już od pokoleń emisja dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych rośnie wykładniczo (czyli o stały procent rocznie). Każdy doradca finansowy, oferujący polisę inwestycyjną, wytłumaczy, że oznacza to coraz szybszy wzrost koncentracji tego gazu! Na poniższym rysunku na historyczne emisje dwutlenku węgla nałożona została funkcja wykładnicza rosnąca o 2,8% rocznie.



Rysunek 1. Zmiany emisji dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych w okresie 1751-2012 (czarna linia), źródło: CDIAC (http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html). Jasnoszara linia przedstawia funkcję wykładniczą, rosnącą w tempie 2,8% rocznie (czyli podwajającą się w ciągu 25 lat)

Taki wzrost oznacza podwojenie emisji po 25 latach. Po 50 latach emisje są czterokrotnie większe niż na początku, po 75 latach 8-krotnie większe, a po 100 latach 16-krotnie większe. W ciągu ostatniego ćwierćwiecza wyemitowaliśmy tyle dwutlenku węgla, co od początku Rewolucji Przemysłowej do lat 80. A ściślej, w ciągu 27 lat, od 1986 do 2012 roku, wyemitowaliśmy więcej CO₂, niż od 1751 do 1985 roku (CDIAC).

Z drugiej strony podnoszą się głosy, że nasze emisje są małe w porównaniu z naturalnymi, że nasza skala emisji nawet nie może równać się z wybuchami wulkanów oraz że w przeszłości Ziemi w atmosferze bywało znacznie więcej dwutlenku węgla niż obecnie.



Rysunek 2. Zmiany stężenia dwutlenku węgla w atmosferze, mierzone na stacji Mauna Loa na Hawajach (esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/).

Czy wzrost stężenia dwutlenku węgla w atmosferze jest rzeczywiście tak znaczący, czy może to jednak coś zupełnie normalnego w historii Ziemi? Jak duże jest obserwowane tempo zmian w perspektywie historycznej? Czy może to być spowodowane działalnością ludzi? Jakie były zmiany

stężenia CO₂ w przeszłości? Kiedy ostatni raz ilość tego gazu w atmosferze była taka jak obecnie? To bardzo ciekawe pytania - a nauka zna na nie odpowiedź.

Pomiary bezpośrednie

Na początek przyjrzyjmy się pomiarom stężenia dwutlenku węgla w ostatnich kilkudziesięciu latach. Już po kilku latach od rozpoczęcia pomiarów naukowcy zauważyli, że dwutlenku węgla w atmosferze z roku na rok przybywa.

Kiedy w 1958 roku Charles D. Keeling rozpoczął regularne pomiary jego koncentracji w obserwatorium na górze Mauna Loa na Hawajach, koncentracja dwutlenku węgla wynosiła około **315 ppm**. W maju 2013 roku mierzona w obserwatorium Mauna Loa na Hawajach osiągnęła wartość **400 ppm**. Koncentracja dwutlenku węgla z roku na rok rośnie o około 2 cząsteczki na milion i proces ten przyspiesza.



Rysunek 3. Koncentracja dwutlenku węgla w cząsteczkach na milion dla ostatniego tysiąclecia, w pęcherzykach powietrza uwięzionego w rdzeniach lodowych (do roku 1977) i bezpośrednio w atmosferze (po roku 1958). Wygląda na to, że między rokiem 1800 a 2000 „coś” się zmieniło. Zaznaczony został rok 1769, w którym James Watt opatentował maszynę parową (pierwsza działająca maszyna parowa została wynaleziona 70 lat wcześniej, w roku 1698, jednak silnik Watta był znacznie wydajniejszy).

Źródła: Siple Station Ice Core, CDIAC

(cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/siple2.013); Law Dome, CDIAC

(cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.combined.dat); Mauna Loa, NOAA

Earth System Research Laboratory.

Na wykresie koncentracji CO₂ w atmosferze wyraźnie widać roczne oscylacje. Jest to związane z pochłanianiem CO₂ przez rośliny lądowe na wiosnę i w lecie (od maja do października), a następnie oddawaniem węgla do atmosfery, wraz ze spadkiem liści i śmiercią roślin jednorocznych jesienią i zimą. Na półkuli południowej cykl pór roku i wzrostu roślinności jest co prawda przesunięty o pół roku, ale powierzchnia lądów na półkuli północnej jest znacznie większa, więc ich wpływ dominuje. Plankton w oceanach wzrasta równomiernie przez cały rok, nie wpływając istotnie na sezonowe wahania zawartości CO₂ w atmosferze.

Pomijając te oscylacje i uśredniając zawartość CO₂ w atmosferze rok po roku widać, że jego stężenie w atmosferze bezustannie i coraz szybciej rośnie. Stopniowo takie pomiary składu atmosfery zaczęto prowadzić także w innych obserwatoriach, otrzymując spójny obraz sytuacji. Również nowe techniki satelitarne pozwoliły na śledzenie zmian koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze, a wszystkie te pomiary są ze sobą zgodne.

Dawno, dawno temu

Kiedy zaczął się wzrost zawartości CO₂ w powietrzu? Poniższy rysunek przedstawia pomiary stężenia dwutlenku węgla w powietrzu od roku 1000 (uzyskane dzięki wykorzystaniu bąbelków powietrza zamkniętych w lodowcach) do chwili obecnej. Aż do roku 1800 koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze utrzymywała się na praktycznie niezmiennym poziomie 280 ppm. Pomiędzy rokiem 1800 a 2000 wydarzyło się coś, co nie było procesem naturalnym, warunkującym klimat

poprzedniego tysiąclecia. To coś nazywamy dzisiaj rewolucją przemysłową. Na wykresie jest zaznaczony rok 1769, w którym James Watt opatentował maszynę parową. Owszem, pierwszy działający silnik parowy został wynaleziony w 1698 roku, jednak to znacznie wydajniejszy silnik Watta na dobre rozpoczął rewolucję przemysłową.



Rysunek 4. Zmiany koncentracji CO₂ w ostatnich 425 tysiącach lat. „0” odpowiada 1950 n.e. (Hansen 2008, pubs.giss.nasa.gov/docs/2008/2008_Hansen_etal.pdf)

W ciągu setek tysięcy lat cykli epok lodowcowych koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze oscylowała w zakresie 180–300 ppm (rys. 4).

Historię zmian stężenia CO₂ w atmosferze w ostatnich setkach tysięcy lat możemy obejrzeć na animacji przygotowanej przez NOAA¹. Animacja przedstawia zmiany koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze. Zaczyna się od wyników bezpośrednich pomiarów w latach 1979–2012: z lewej strony oglądamy zmieniające się koncentracje CO₂ w zależności od szerokości geograficznej, z prawej – wykres pomiarów na Mauna Loa (czerwona linia) i biegunie południowym (niebieska linia). Po dojściu do roku 2012 wykres po prawej jest przedłużany na podstawie obserwacji z Mauna Loa (najdłuższa seria pomiarowa, zielona linia). Następnie mamy możliwość obejrzenia danych o koncentracjach dwutlenku węgla uzyskanych na podstawie analizy rdzeni lodowych (punkty pomarańczowe, brązowe, jasnoniebieskie i granatowe). Z lewej strony zaznaczone są najmniejsze koncentracje dwutlenku węgla dla czasów sprzed rewolucji przemysłowej (ok. 278 ppm) i epok lodowcowych (ok. 185 ppm).

Dzięki analizom rdzeni lodowych i osadów w zbiornikach wodnych znamy też przybliżone poziomy dwutlenku węgla w odleglejszej historii. Badania pokazują, że koncentracje rzędu 400 ppm występowały ostatnio w pliocenie, czyli kilka milionów lat² temu, a może nawet aż kilkanaście milionów lat temu³. To, co dzieje się obecnie, to raczej nie przypadek.

Czy to aby na pewno działalność ludzkości?

Jak ten bezprecedensowy wzrost koncentracji CO₂ ma się do faktu, że nasze emisje to tylko około 5% naturalnych? Aby zrozumieć ten pozorny paradoks, przyjrzyjmy się cyklowi krążenia węgla w przyrodzie i zmianom, jakie do tego cyklu wprowadzamy.



Rysunek 5. Cykl węglowy. Zawartości węgla w poszczególnych „rezerwuarach” oraz roczne przepływy są podane w miliardach ton węgla (czyli w gigatonach GtC). Uwaga: wartości dotyczą węgla – aby przeliczyć je na ilości CO₂, należy je przemnożyć przez 3,66 (stosunek masy molowej CO₂ – 44g/mol i węgla – 12g/mol). Źródło: The Carbon Cycle, Earth Observatory, NASA, The Carbon Cycle, Earth Observatory, NASA 2011 (earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/carbon_cycle2001.pdf), Global Carbon Dioxide Emissions from Fossil-Fuel Combustion and Cement Manufacture, CDIAC (cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html). Na wykresie została zaktualizowana ilość naszych rocznych emisji, która od czasu wykonania analizy w latach 90. XX wieku wzrosła z 5,5 do 9 mld ton (a właściwie już do 10 mld ton).

Węgiel krąży między wielkimi zbiornikami: biosferą, glebą, skałami, wodami, atmosferą Ziemi i osadami (w tym paliwami kopalnymi). Sumaryczna ilość węgla krążącego w tym cyklu węglowym nie zmienia się w krótkich skalach czasowych. Źródła naturalne równoważą się, ale z paliwami kopalnymi jest inaczej. Wydobywając je spod ziemi i spalając, wpuszczamy błyskawicznie do cyklu węglowego zasoby węgla usuwane z niego przez naturę przez dziesiątki i setki milionów lat. Można to porównać do długotrwałego zbierania wody w sztucznym zbiorniku, którą potem gwałtownie wypuszczamy, wysadzając tamę w powietrze.

Zbiornik paliw kopalnych jest bardzo duży, sięga 4000 mld ton węgla (a może więcej), przekraczając łączną ilość węgla w atmosferze, glebach, roślinności i powierzchniowych warstwach oceanu. Jeśli spalimy całość paliw kopalnych, drastycznie zwiększymy ilość węgla krążącego w cyklu węglowym.

Ilość spalanych ropy, węgla i gazu (a więc i powstałych w ich ilości emisji CO₂) znamy dość dokładnie. Mierzmy też, jak wiele CO₂ przybywa z roku na rok w atmosferze. W oparciu o te informacje możemy stwierdzić, że pozostaje w niej około połowa naszych emisji, resztę zaś pochłaniają oceany (zakwaszając się) i lądy (wyższe stężenie CO₂ w atmosferze sprzyja wzrostowi roślinności, choć przy wyższym wzroście temperatury przewiduje się, że lądy staną się źródłem emisji netto⁴).

Spojrzenie w przyszłość

Kontynuacja dotychczasowego i trwającego już od pokoleń scenariusza wzrostu emisji o 2,8% rocznie przez kolejne pokolenie oznaczałaby, że od roku 2010 do 2050 emisje wzrosną trzykrotnie, do poziomu 100 mld ton CO₂ rocznie. Nie jest to wcale pewne – nawet nie tyle ze względu na dalekowszoczne działania odpowiedzialnych polityków, biznesu i społeczeństwa, co z bardziej prozaicznych powodów: nie da się w nieskończoność wykładniczo zwiększać wydobycia paliw kopalnych, a pozostałe złoża są coraz droższe i trudniejsze w eksploatacji.

Co się stanie, gdy będziemy kontynuować obecne trendy emisji tak długo, aż wydobydziemy i spalimy wszystkie paliwa kopalne? Wtedy do końca obecnego stulecia doprowadzimy do wzrostu stężenia CO₂ do ponad 1000 ppm. Będzie temu towarzyszyć wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi o ponad 4 °C do 2100 roku... i o 8 °C (owszem, nie wiemy na pewno, może to być „tylko 5 °C”, a może być też kilkanaście stopni) kolejne sto lat później.



Rysunek 6: Zmiany temperatury w ostatnich 22 000 lat. Źródła: Shakun

2012

211.144.68.84:9998/91keshi/Public/File/34/484-7392/pdf/nature10915.pdf

, Marcott 2013

content.csbs.utah.edu/~mli/Economics%207004/Marcott_Global%20Temperature%20Reconstructed.pdf (linia niebieska), HadCRUT4

(metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/), przedłużenie w przyszłość w oparciu o scenariusz RCP8.5 Meinshausen i in., 2011

(link.springer.com//10.10article07/s10584-011-0156-z)

Katapultujemy się ze stabilnego klimatu holocenu, po drodze miniemy maksymalne temperatury ciepłych okresów interglacjalnych z ostatniego miliona lat (+1,5 °C), klimat pliocenu z ostatnich kilku milionów lat (+3 °C), klimat z eocenu (+4°C) i nawet ten z ery dinozaurów (+5 °C).

Jeśli na poważnie myślimy o ograniczeniu wzrostu temperatury poniżej 2°C, co wymaga

wyhamowania wzrostu stężenia CO₂ do maksymalnie 450 ppm (z zalecanym docelowym zejściem do około 350 ppm⁵), to powinniśmy zrealizować scenariusz szybkiego ograniczenia emisji i przestać traktować atmosferę jak nieskończony zbiornik na odpady.

Marcin Popkiewicz

Marcin Popkiewicz, analityk megatrendów, przewodniczący polskiego oddziału Association for the Study of Peak Oil & Gas, redaktor naczelny poczytnych portali internetowych poświęconych gospodarce i klimatowi, autor bestsellera „Świat na Rozdrożu” i polskiej wersji „Zrównoważonej Energii”. Dziennikarz, autor i tłumacz artykułów oraz filmów dotyczących gospodarki, klimatu i szeroko rozumianej ekologii. Redaktor portali ZiemiaNaRozdrozu.pl i NaukaoKlimacie.pl. Laureat konkursów Dziennikarze dla klimatu 2013 oraz Nagroda Dobromira Roku 2013 Ekologicznego Kongresu Gospodarczego. Doświadczony trener mający na koncie kilkaset wykładów i warsztatów z tego zakresu.

Przypisy:

1. [youtube.com/watch?v=vA7tfz3k_9A](https://www.youtube.com/watch?v=vA7tfz3k_9A)
2. climatechange2013.org/report/full-report/
3. ecolo.org/documents/documents_in_english/Climate-Mioce-CO2-20Myrs.pdf
4. nldr.library.ucar.edu/repository/assets/osgc/OSGC-000-000-019-143.pdf
5. [plosone.org/article/fetchObject.action?uri=info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0081648&representation=PDF](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081648)



Niniejszy materiał został opublikowany dzięki dofinansowaniu ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Za jego treść odpowiada wyłącznie Stowarzyszenie Pracownia na rzecz Wszystkich Istot.