

Wzajemne oddziaływanie systemu ocean-atmosfera oraz biosfery w dziejach planety Ziemia

Jacek Piskożub – wykład habilitacyjny

IOPAN, Sopot, 29 września 2005

Czy Ziemia ma szczęście?

Cechy sprzyjające utrzymaniu biosfery:

- właściwa odległość od Słońca
- właściwa wielkość planety
- duży satelita (Księżyc)
- tektonika płyt
- ciekła woda (oceany)
- atmosfera (tlen, ozon)



Zmiana poglądów o historii Ziemi:

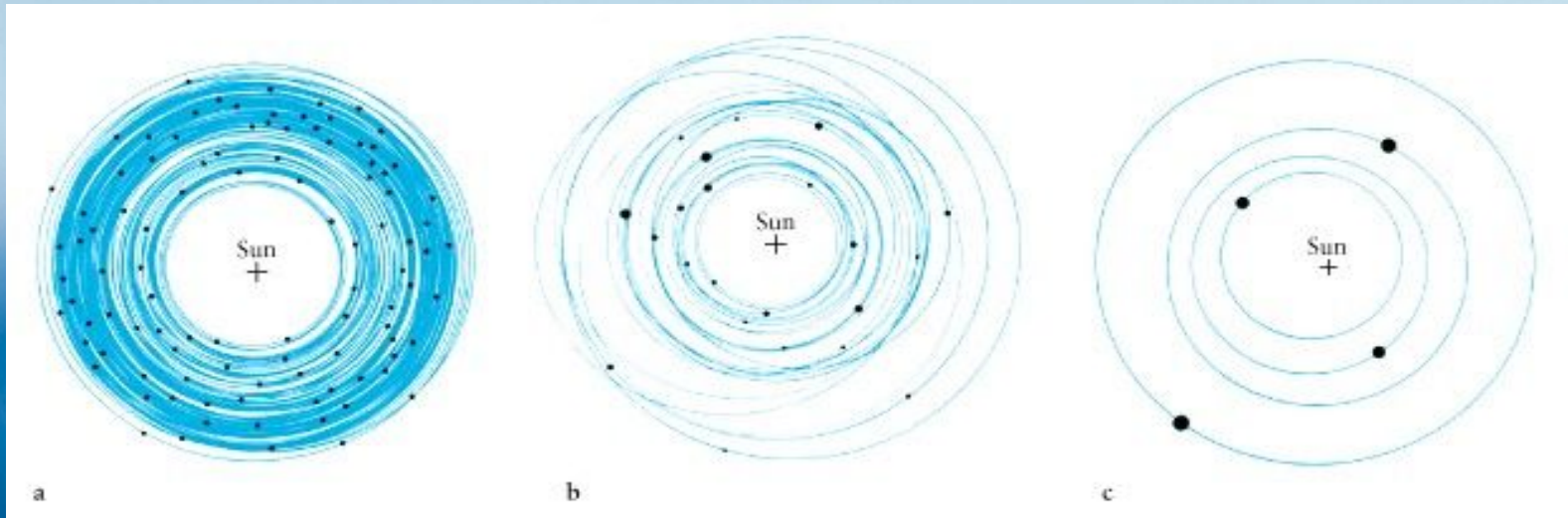
Tradycyjne poglądy:

- gradualizm (w opozycji do katastrofizmu),
- jedностonny kierunek przemian (teleologia),
- hipoteza Gaji (*Lovelock, 1979*)

Zmiany (ostatnie 20 lat):

- gradualizm i katastrofizm,
- przypadkowość,
- wzajemne oddziaływania (koewolucja).

Przed nastaniem życia



Artystyczna wizja powstania Układu Słonecznego

Najwcześniejszy okres istnienia Ziemi:

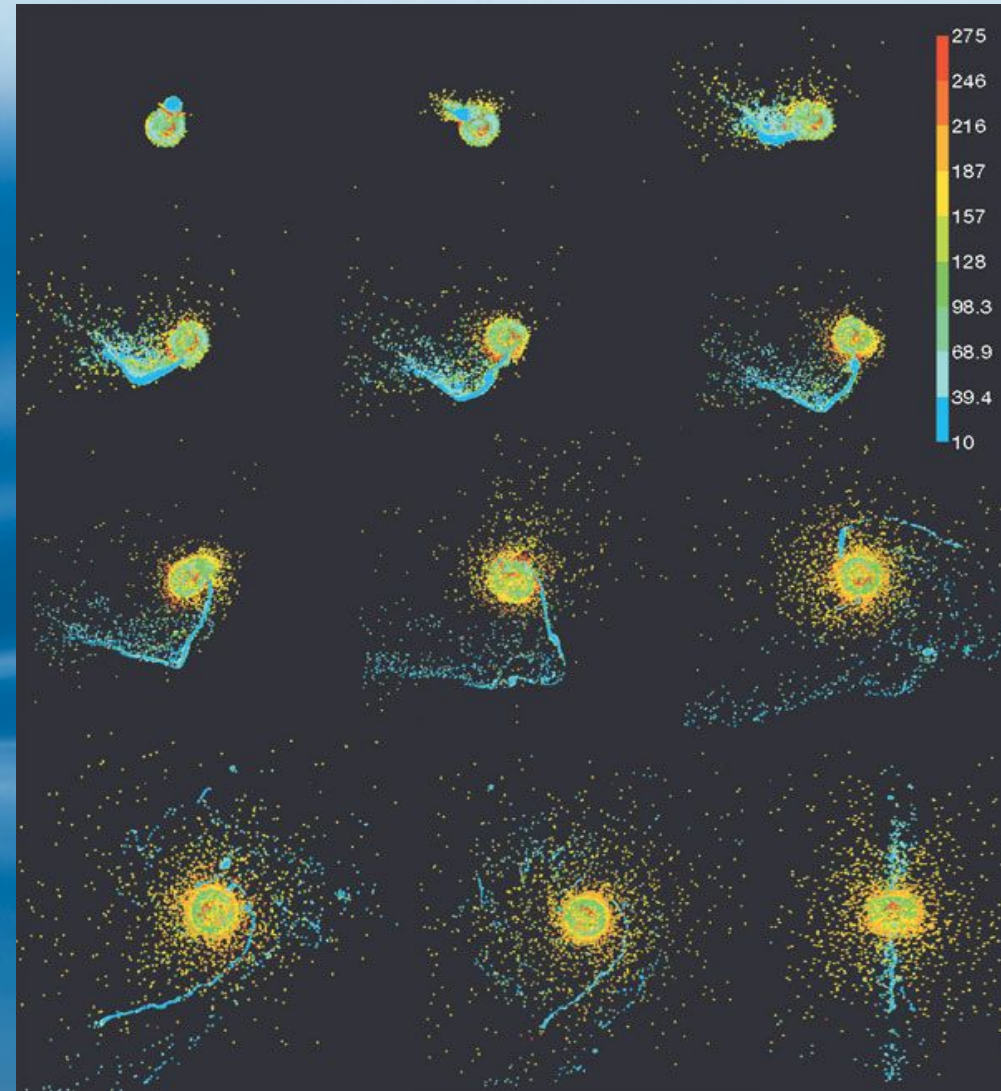
- Ziemia formuje się 4,57 mld lat temu
- Wielkie Bombardowanie i powstanie Księżyca
- Pierwotna atmosfera (H_2 , CH_4 , NH_3 czy N_2 i CO_2 ?)
- Jak szybko powstały oceany?

Powstanie Księżyca

Najbardziej prawdopodobna teoria: wielkie zderzenie Ziemi z protoplanetą wielkości Marsa 4,533 mld lat temu.

Skutki:

- Przetopienie Ziemi,
- Utrata części lekkiej skorupy,
- Utrata atmosfery,
- Długość doby,
- Wpływ pływów na powstanie życia?
(*Lathe 2004, Icarus 168 (1), 18-22*)



Powstanie oceanów

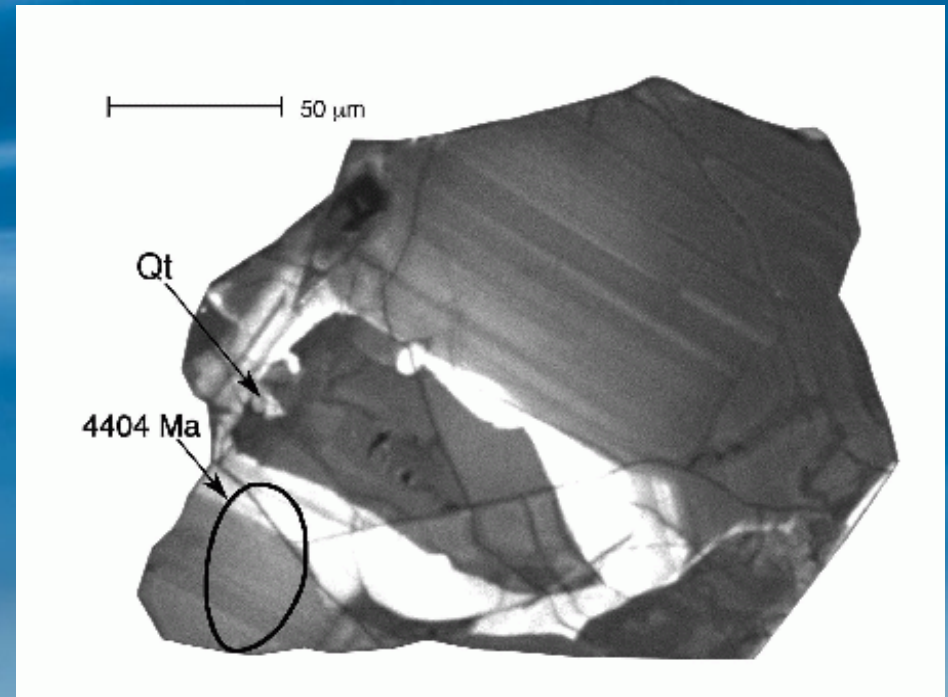
Ziarno cyrkonu znalezione w Zachodniej Australii posiada kryształ datowany na 4,4 mld lat (4404 ± 8 mln).

- Skład izotopowy ziaren implikuje krystalizację w temperaturach sugerujących istnienie ciekłej wody.
- Właściwości fizyko-chemiczne ziaren sugerują ich powstanie z granitu (skorupa kontynentalna).

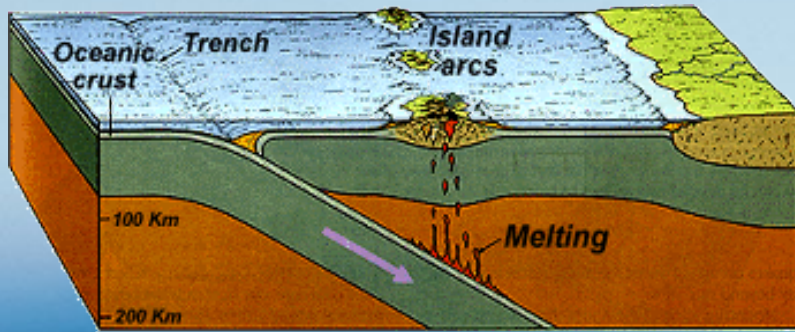
Wniosek:

- Oceany i kontynenty powstały zaledwie ok. 100-150 mln lat po powstaniu Ziemi i Księżyca,

Wilde et al, 2001, Nature 409 (6817), 175-178



Tektonika płyt wymaga wody



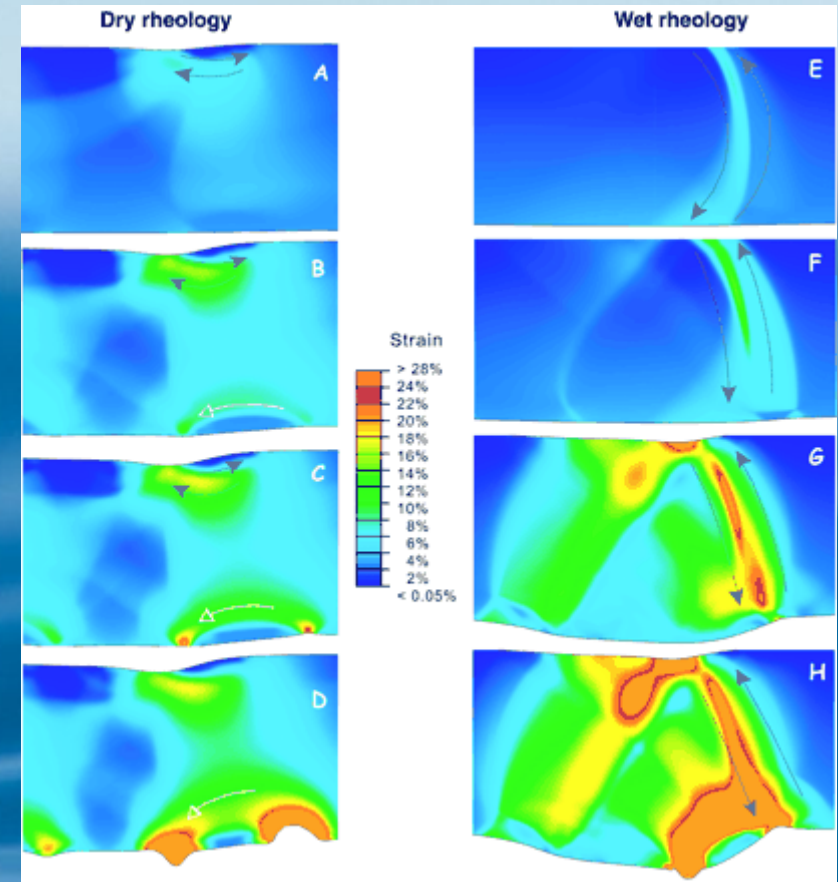
Źródło rysunku: www.moorlandschool.co.uk

Tektonika płyt zapewnia:

- istnienie kontynentów (erozja)
- odzyskanie osadów morskich
- stabilną atmosferę (kontrola CO₂)
- “bezpieczne” usuwanie ciepła

Źródło: *P. Ward & D. Brownlee*
"Rare Earth", Springer, 2000

“No water, no granites, no oceans, no continents”
(Campbell & Taylor 1983)

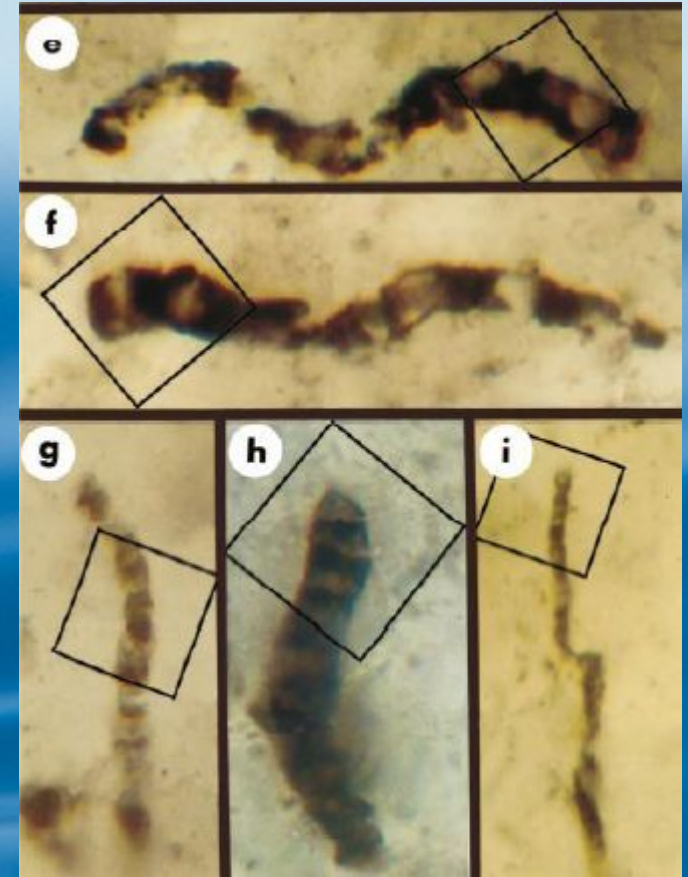


Wyniki modelowania początku subdukcji na pasywnym brzegu kontynentu dla suchej i mokrej litosfery oceanicznej

Źródło: *Ragenauer-Lieb, K., Yuen, D. and Branlund, J., 2001, Science, 294, 578-580*

Początki życia na Ziemi

- Najstarsze izotopowe ślady życia: Zachodnia Grenlandia, 3,8 mld lat (*Mojzsis et al., 1996*)
- Najstarsze skamieniałości (?): 3,5 mld lat, Zachodnia Australia (*Schopf et al., 2002*)
- Otwarty problem - gdzie powstało życie: sadzawki czy smokery? (*Nisbet & Sleep 2001*)



Najstarsze “podobne do sinic” skamieniałości z czertów Zachodniej Australii

Źródło: *Schopf JW et al., 2002, Nature, 416 (6876), 73-76*

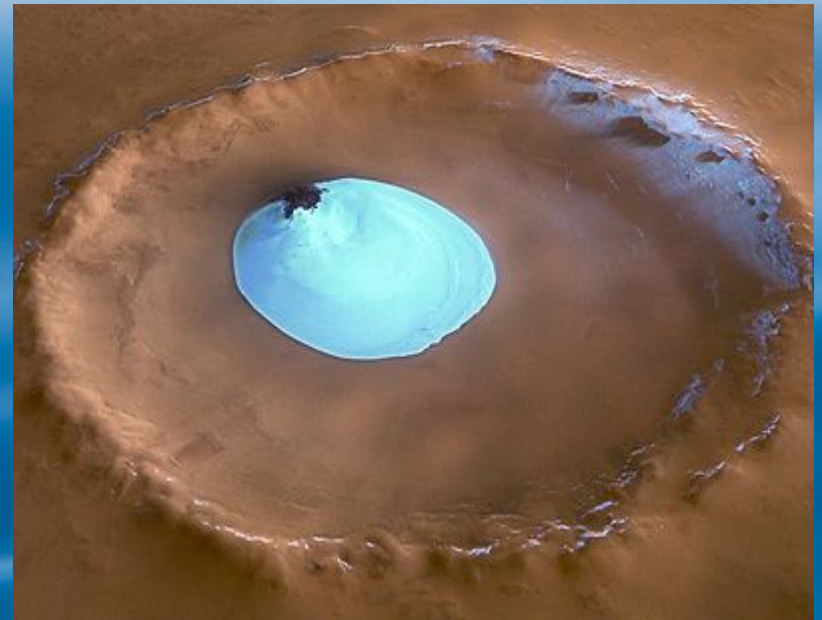
Oceany zawdzięczamy sinicom?

Bez wolnego tlenu w atmosferze Ziemia wyglądałaby dziś jak Mars?

Fotoliza H_2O w atmosferze pod wpływem ultrafioletu: ucieczka wodoru w przestrzeń kosmiczną; tlen łączy z minerałami.

W obecności dużej ilości wolnego tlenu wodór rekombinuje do H_2O .

Sinice produkują wolny tlen od co najmniej 3,5 mld lat. W tym czasie utraciliśmy zaledwie 1% wody z oceanów (przedtem 30% - Yung et al 1989).

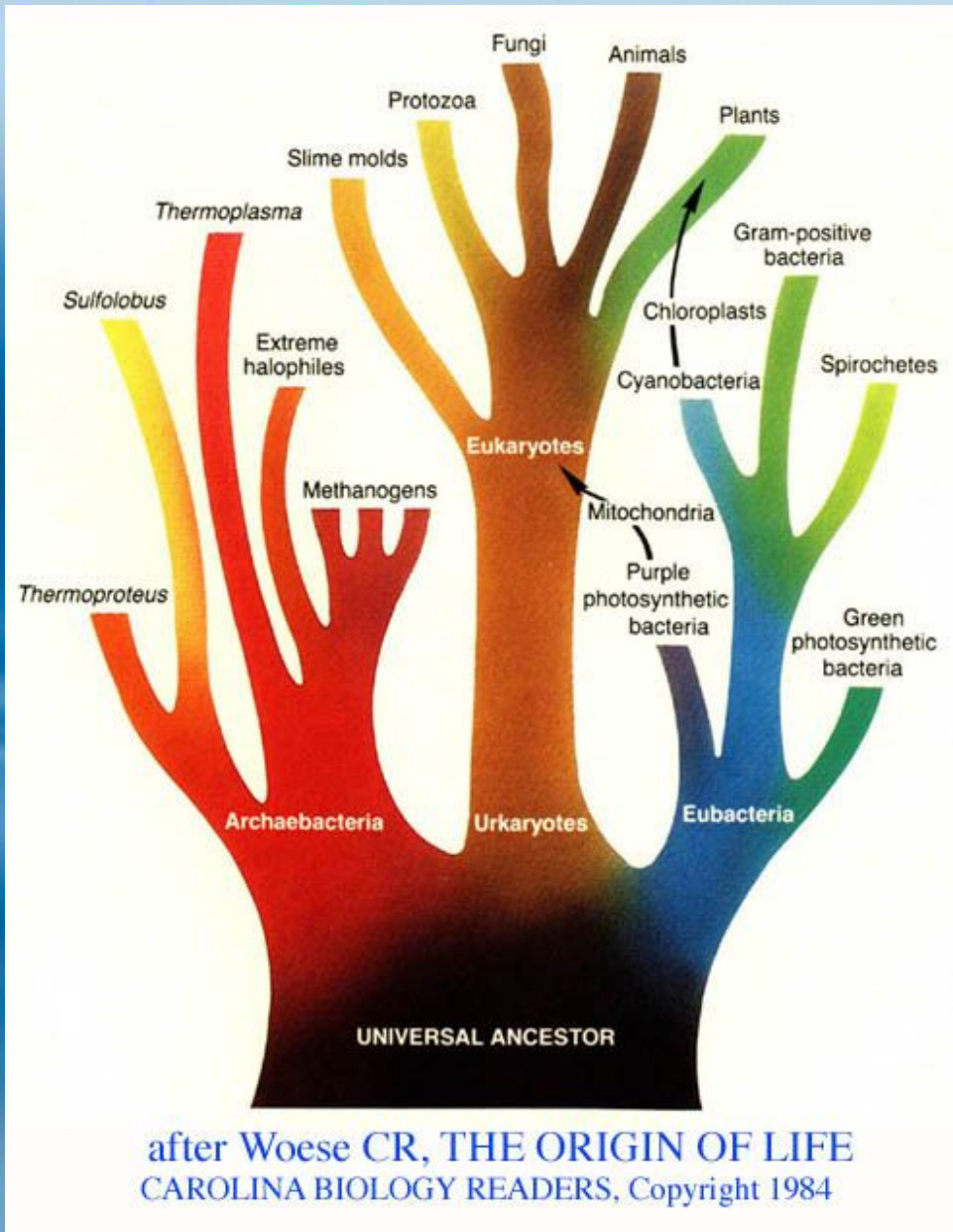


Jedyna woda na powierzchni Marsa: lód na dnie polarnego krateru (ESA, 28 lipca 2005 r).

James Lovelock, "Gaia: A New Look at Life on Earth", 1979

Co mówią geny?

LUCA (Last Universal Common Ancestor)



LUCA mógł żyć w chłodnych wodach powierzchniowych (*Galtier, Tourasse, Gouy 1999*)

LUCA mógł żyć na dnie oceanu przy kominach hydrotermalnych (*Di Giulio 2001*)

Analiza wspólnych genów pokazuje, że LUCA nie znał jeszcze fotosyntezy. Czerpał energię ze związków siarki, azotu i być może ... tlenu (*Castresana & Saraste 1995*).

Jajko czy kura

Co było najpierw: fotosynteza czy oddychanie tlenowe?

Tradycyjny pogląd: oddychanie tlenowe nie mogło powstać zanim fotosynteza wzbogaciła środowisko o wolny tlen.

Pojawienie się wolnego tlenu w wodzie morskiej miało zapoczątkować wielkie wymieranie (“kryzys tlenowy”).

Dowody genetyczne (oksydaza cytochromowa) wskazują, że LUCA potrafił bronić się przed tlenem a prawdopodobnie nawet wykorzystywać go jako źródło energii (*Castresana & Saraste 1995*).

Fotosynteza chlorofilowa powstała w ewolucji jedynie raz (sinice); używa kompleksu enzymatycznego (OEC) pochodzącego od katalazy (usuwanie H_2O_2) (*McKay, Harman 1991*)

Pozostaje pytanie o źródło tlenu (reakcje fotochemiczne?, kominy hydrotermalne?)

Tlen i węgiel organiczny

Skąd wziąć 20,85% atmosfery?



Jedyny skuteczny sposób na zwiększanie zawartości tlenu w atmosferze to zakopanie węgla organicznego.

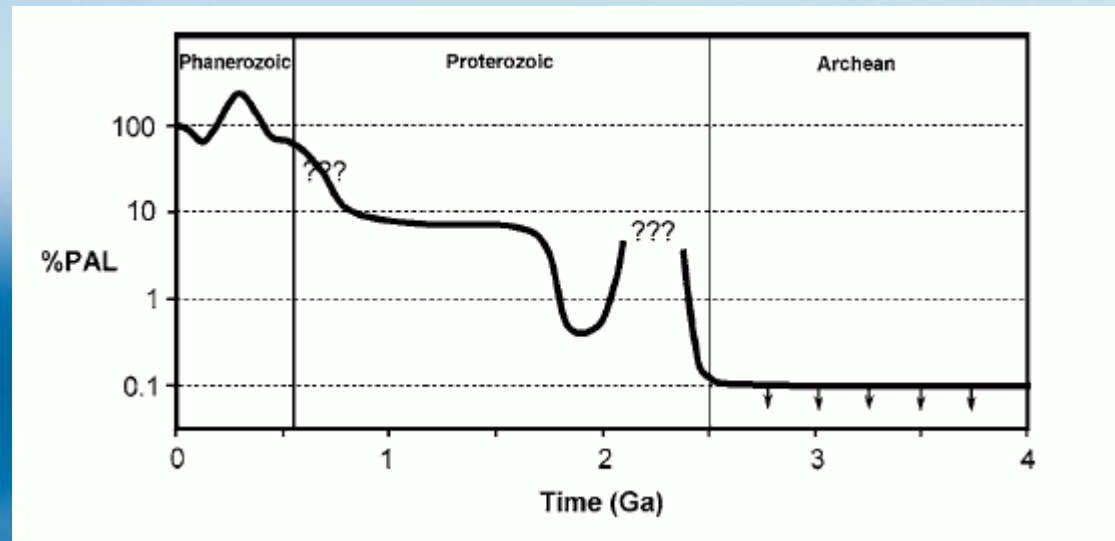
Ocenia się (*Berner 1988*), że biosfera zawiera 0,004% węgla organicznego zawartego łącznie w Ziemi i na Ziemi.

Paliwa kopalne to zaledwie mały procent całej ilości węgla organicznego w osadach.

Pierwsze 2 mld lat fotosyntezy

Co wiemy?

- żelaziste formacje wstęgowe (3,8–0,8 mld lat; optimum 2,6–1,8 mld lat); upwellingi (?)
- skład izotopowy gipsów: zmiany 2,7 i 2,2 mld lat temu (*Canfield 1998*)
- żelazo wyplukiwane do 2,2–2,0 mld lat temu (*Holland & Rye 1998*): **5-18%** dzisiejszego O₂
- reaktory uranowe w Oklo (Gabon): 2,0 mld lat temu



Zmiany koncentracji tlenu : *D.E. Canfield, 2005, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 33:1–36*

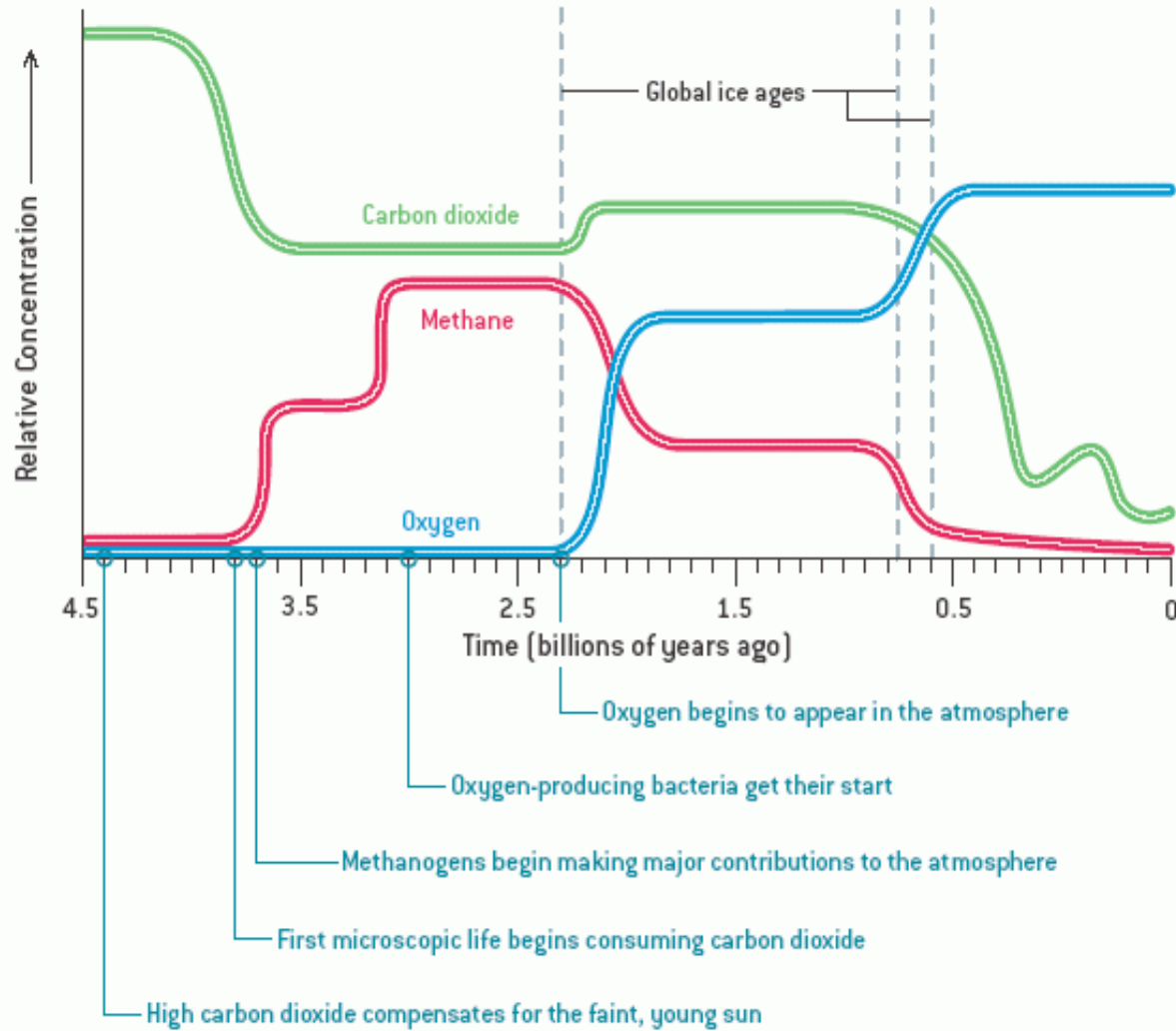
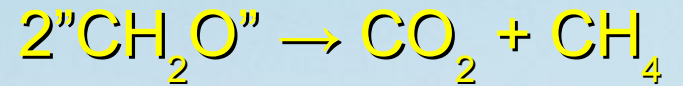
Przyczyny wzrostu:

Zwiększone odkładanie węgla po globalnych zlodowaceniach 2,2–2,0 mld lat temu

Skutki biologiczne:

Rozwój eukariontów (jądrowców) (*Knoll 1992*)

Odmienny pogląd: rola metanu



W czasach niskiego stężenia tlenu istotnym procesem mogło być oddychanie beztlenowe.

Produkowany w nim metan mógł pełnić rolę gazu cieplarnianego w czasie gdy Słońce dawało o 20% mniej energii niż współcześnie.

Względna koncentracja gazów atmosferycznych: (Kasting 2004)

D. C. Catling, K. J. Zahnle & C. P. McKay, 2001, Science, 293, 839-843

Kula Śnieżna Ziemia

Snowball Earth: Kryzys życia 800-600 mln lat temu



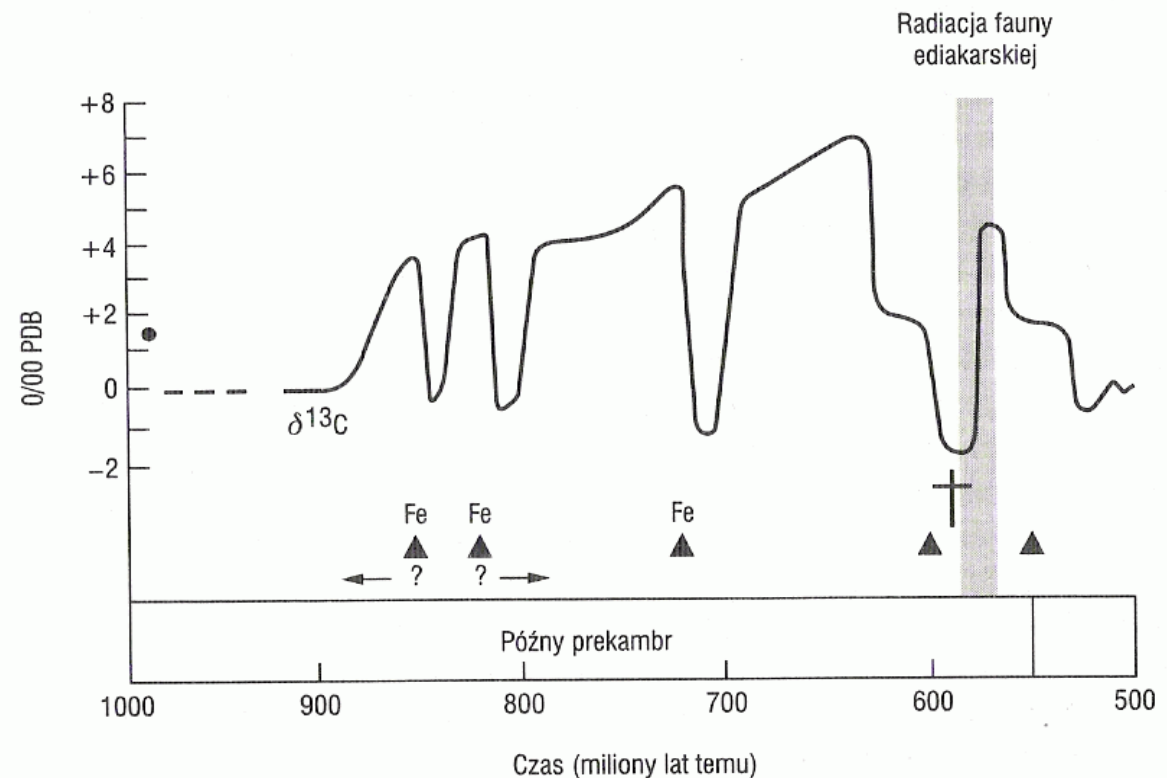
Początek: brak lądów polarnych (?)
(Hoffman et al. 1998)

Koniec: olbrzymi efekt cieplarniany

Rozkład kontynentów 600 mln lat temu
(Hoffman & Schrag 2000)

Fazy:

- zamrożone oceany
- kula śnieżna
- kwaśna zupa
- wzrost koncentracji tlenu atmosferycznego (Canfield 1996)
- radiacja fauny



Zmiany koncentracji C^{13} w skamieniałościach późnego prekambry (N. Lane "Tlen" 2005 za Knollem i Hollandem)

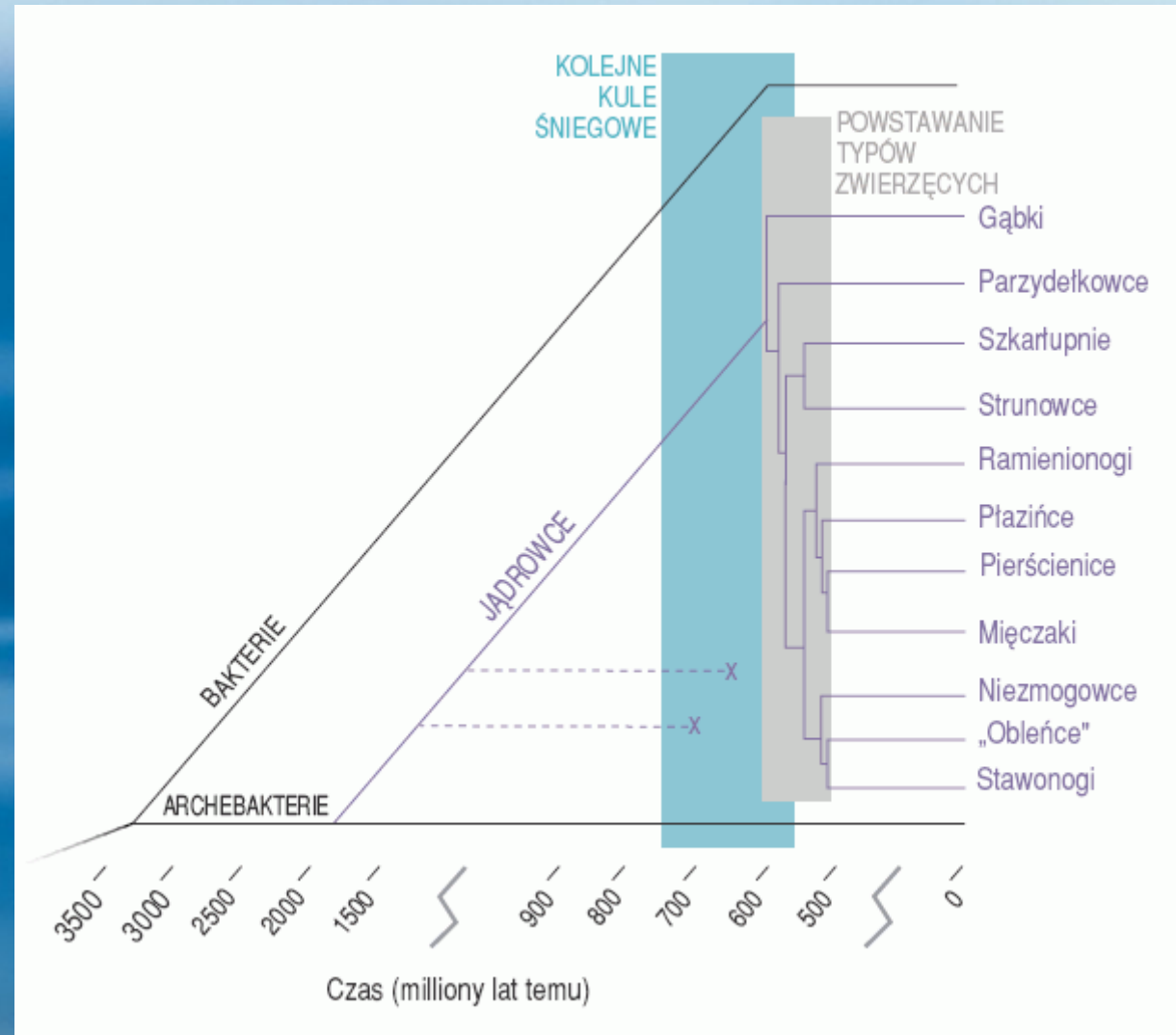
Kambr: wybuch życia

Na początku kambru koncentracja tlenu osiąga 100% wartości współczesnej



Obfitość tlenu pozwala na rozwój organizmów wielokomórkowych (Knoll 1996)

W kambrze powstaje wszystkie 11 znanych typów (*phyla*) budowy zwierząt



Kambryjska radiacja życia (*Hoffman & Schrag 2000*)

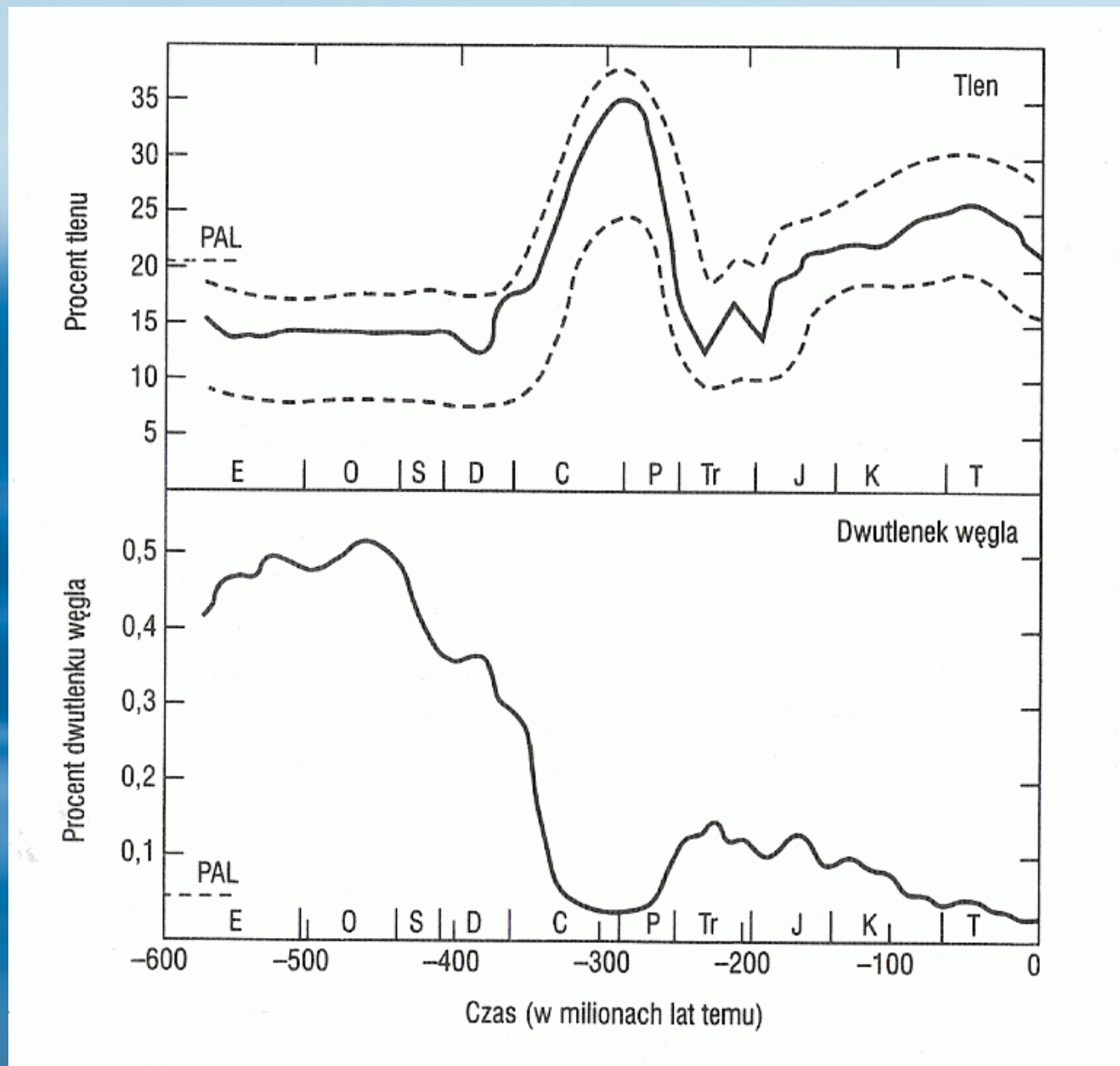
O₂ i CO₂ : kto zepsuł homeostat?

Metoda:

Model z zastosowaniem względnej koncentracji C¹³ w osadach, oraz danych o cyklu węgla (wulkanizm, subdukcja, metabolizm, klimat itd.)

Wnioski:

Warunki życia w fanerozoiku cechowały się dużą niestabilnością (w geologicznej skali czasu)



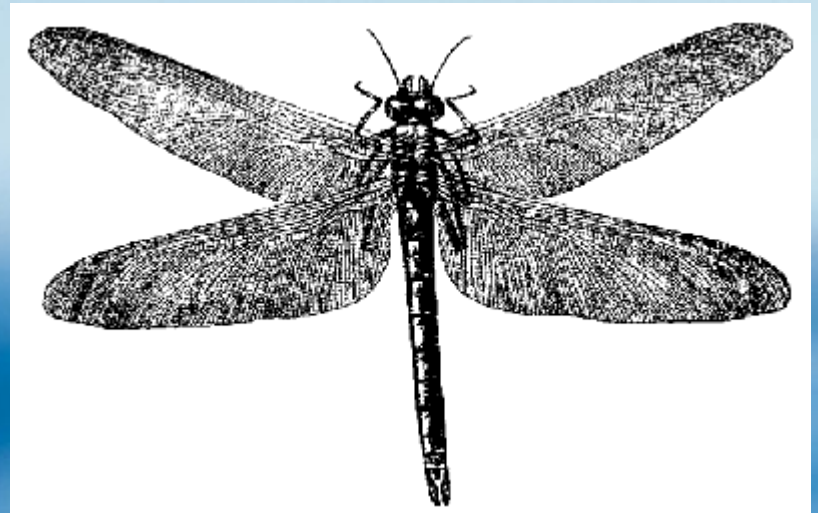
Zmiany koncentracji O₂ i CO₂ w fanerozoiku (N. Lane "Tlen" 2005 za Berner & Canfield 1989 oraz Berner 1994)

Karbon: optimum tlenowe

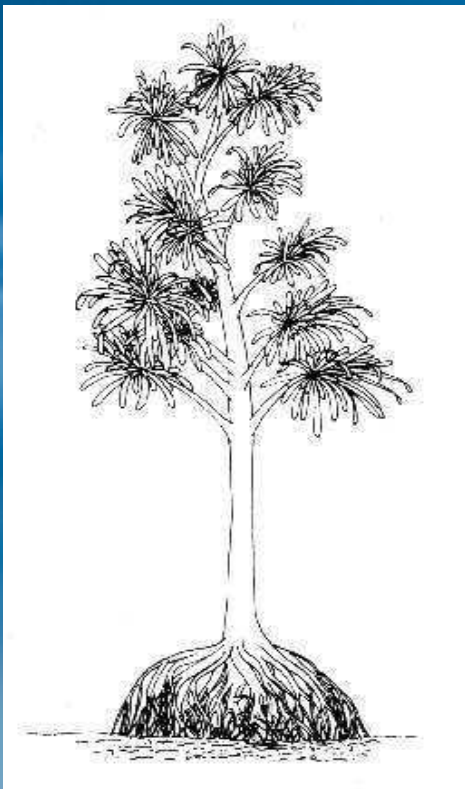
30-35% tlenu w atmosferze

Przyczyny:

- wielkie obszary bagienne
- drzewa i lignina
- odkładanie się węgla



Kambryjska ważka *Meganeura Monyi* o rozpiętości skrzydeł 75 cm.
(*Karl Von Zittel, Text-Book of Paleontology, London 1937*)



Kredowe drzewo
kordaitowe

Skutki:

- odporność roślinności na pożary lasów oraz bagien (!) (*Scott & Jones 1994*)
- gigantyzm lądowych bezkręgowców i płazów (*Dudley 1998, Spicer & Gaston 1999*)

Tlen a rozmiary

Dowód oceanograficzny



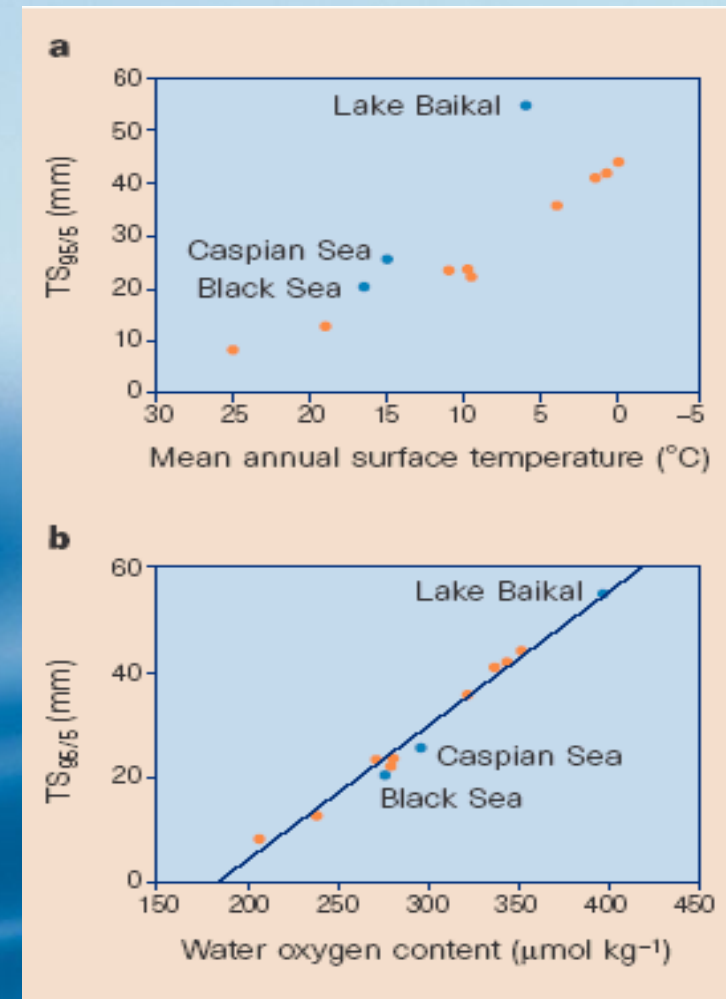
Obunóg (*Paracalliope fluviatilis*)

Problem:

Maksymalna wielkość osiągnięta przez obunogi dla większości akwenów skorelowana jest z temperaturą. Czemu nie dla wszystkich?

Rozwiązanie:

Maksymalna wielkość obunoga zależy od dostępnej mu ilości tlenu ($r^2=0.98$)



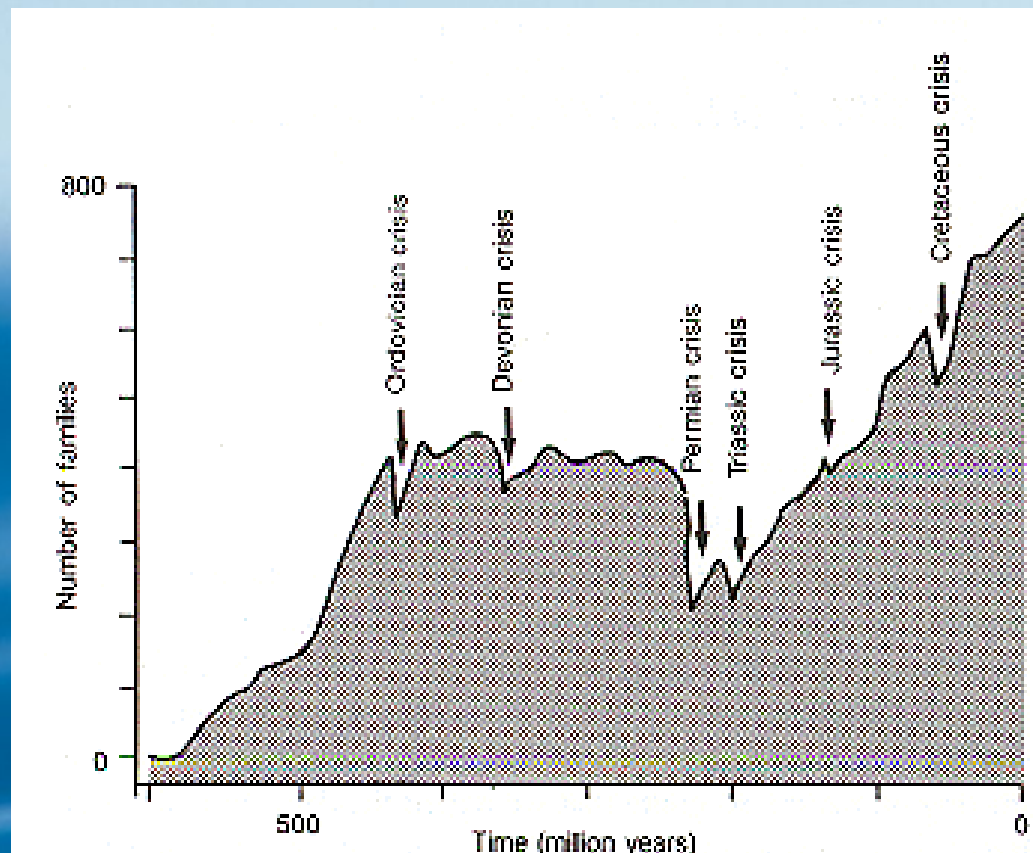
Wielkość osiągnięta przez obunogi w funkcji średniej temperatury i koncentracji tlenu (*Chapelle & Peck 1999*)

Wielkie wymierania

Znamy 6 wielkich wymierań

Przyczyny większości (w tym największego permskiego) nie są jeszcze znane.

Możliwe przyczyny: asteroidy, wulkanizm, zlodowacenia, supernowe itp. itd.

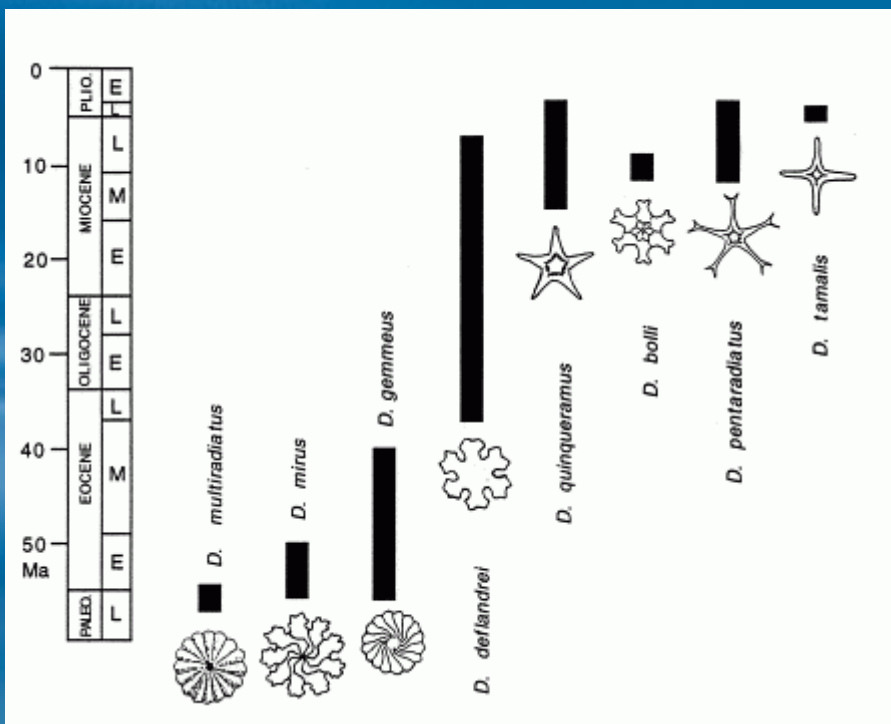


Liczba rodzin fauny morskiej (za *Sepkoski 1984*)

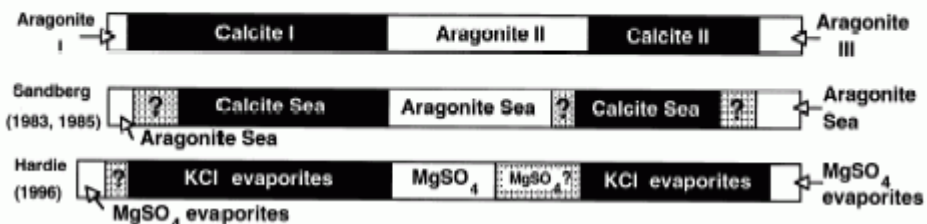
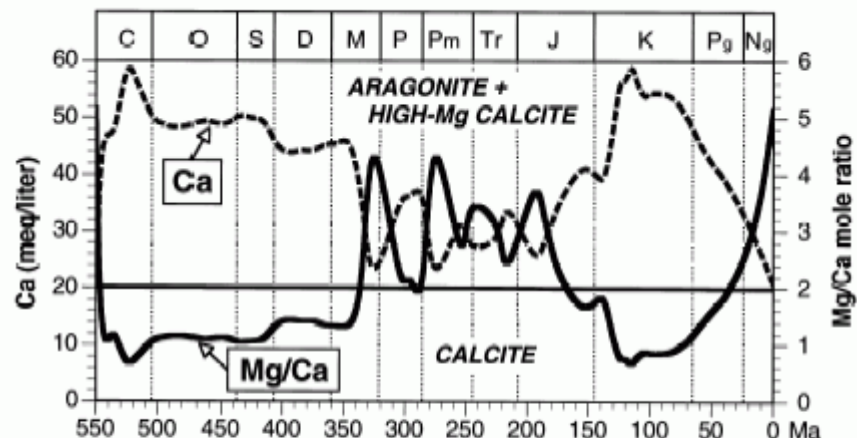
Najnowsze (kreda/trzeciorzęd)
65 mln lat temu: uderzenie
asteroidy (*Alvarez et al. 1980*).

Kreda: skąd tyle kredy?

Chemia wody morskiej (morze “kalcytowe” lub “aragonitowe”) wpływa na budowę dominujących organizmów.



S.M. Stanley, L.A. Hardie / *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 144 (1998) 3–19



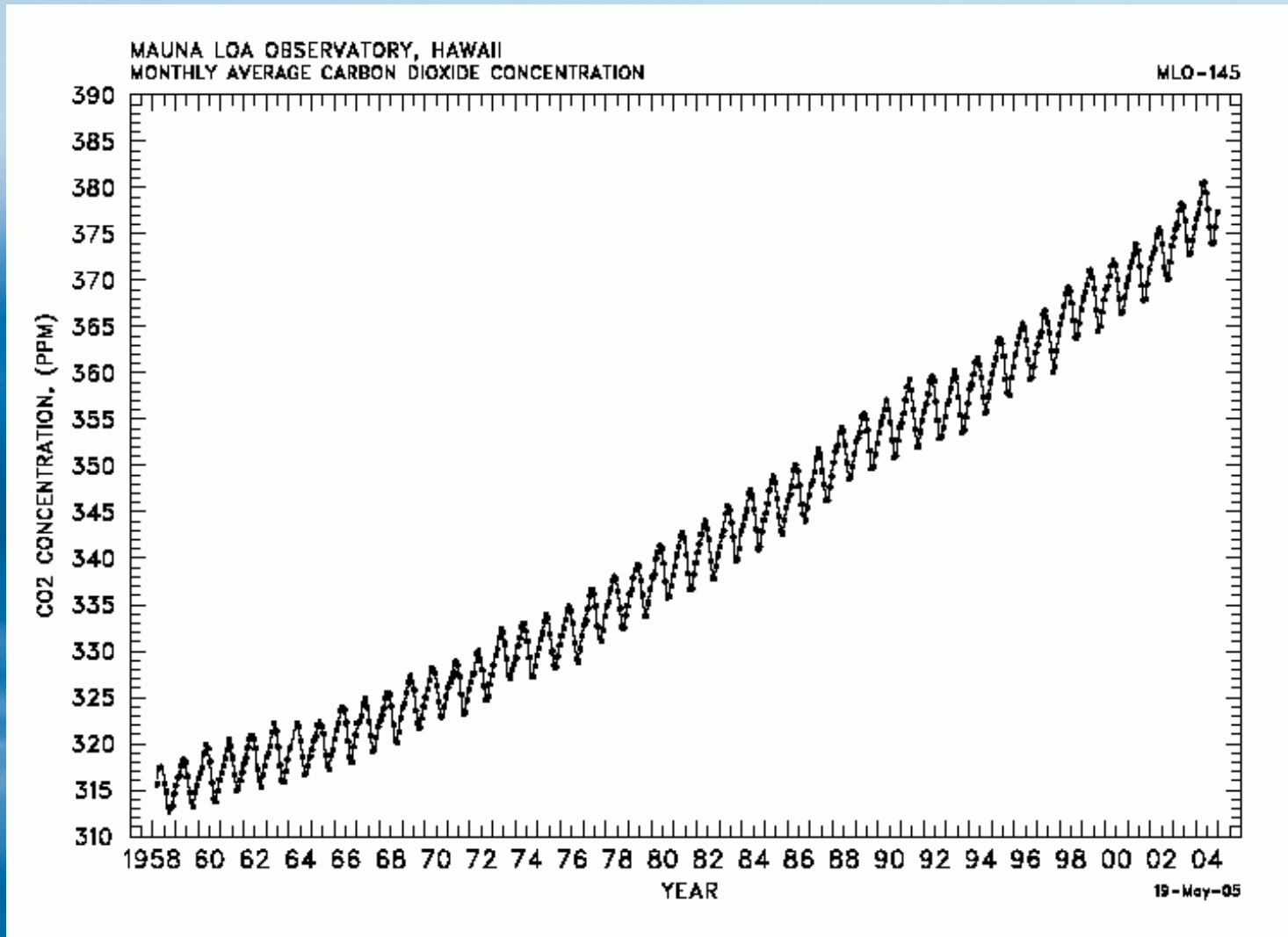
Koncentracja Ca w wodzie morskiej i stosunek Ca/Mg w fanerozoiku (*Stanley, Hardie, 1998*)

Przyczyna:

Stosunek Ca/Mg silnie koreluje z tempem produkcji dna morskiego (Gaffin 1987)

Płytki szkieletowe (kokkolity) rodzaju *Discoaster* w różnych okresach kenozoiku (*Stanley, Hardie, 1998*)

CO₂: co potrafi człowiek

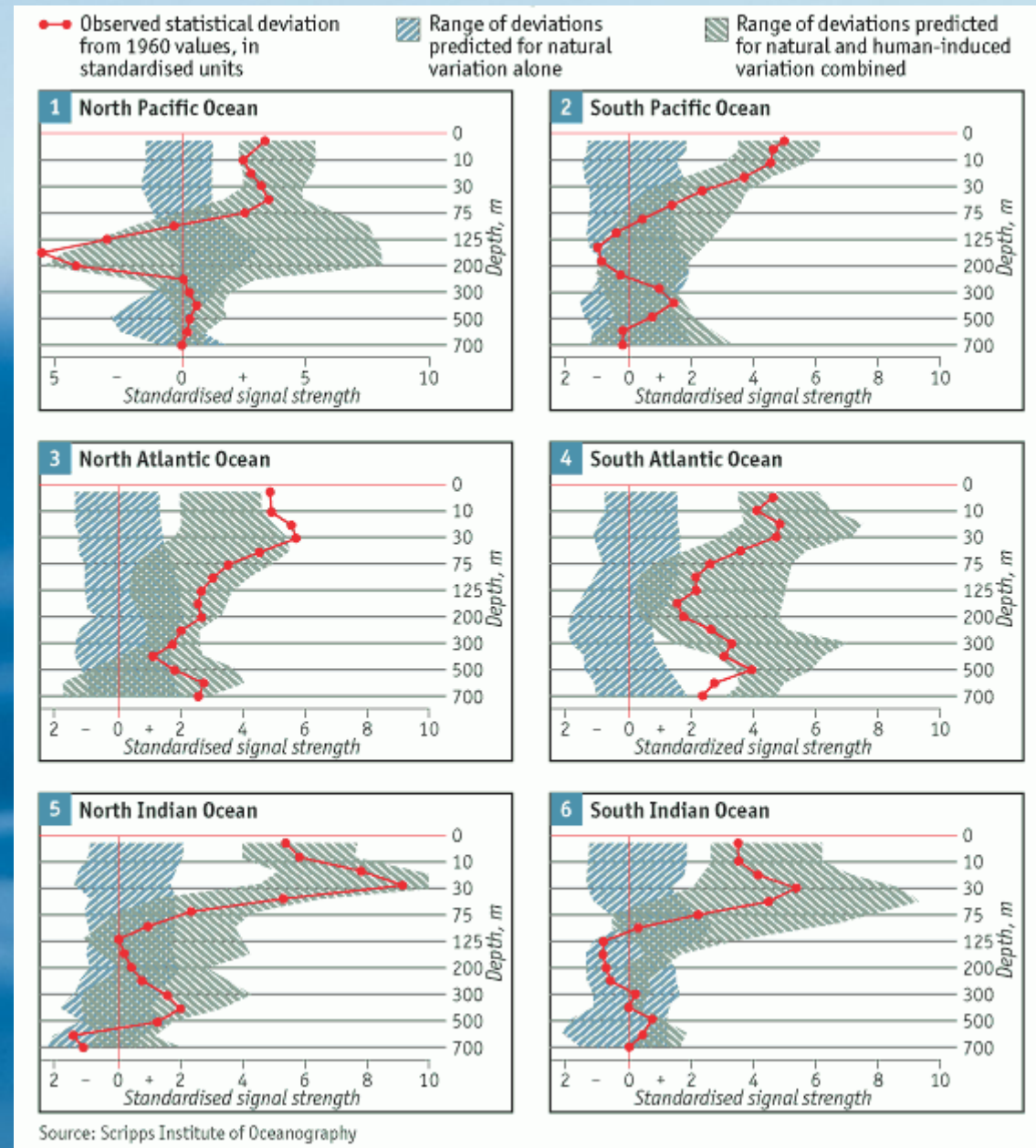


Koncentracja CO₂ mierzona na Mauna Loa (Hawaje) 1958-2005
(Keeling & Whorf, <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.htm>)

Charles D. Keeling 1928-2005

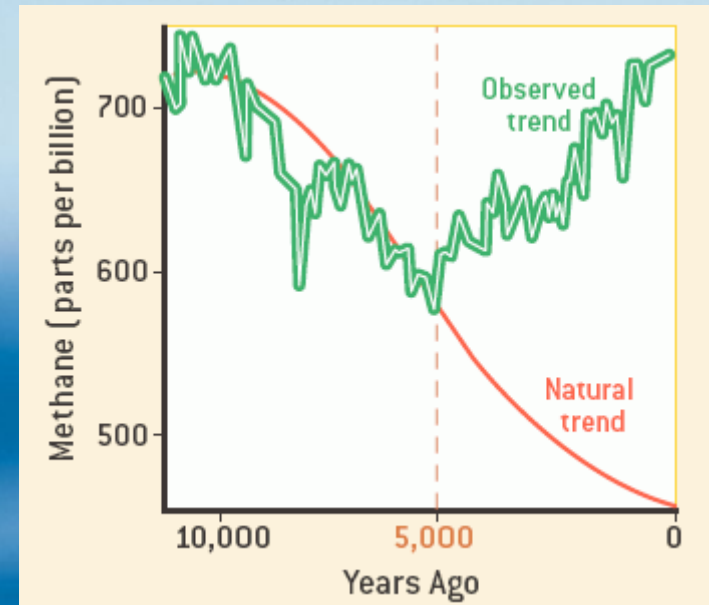
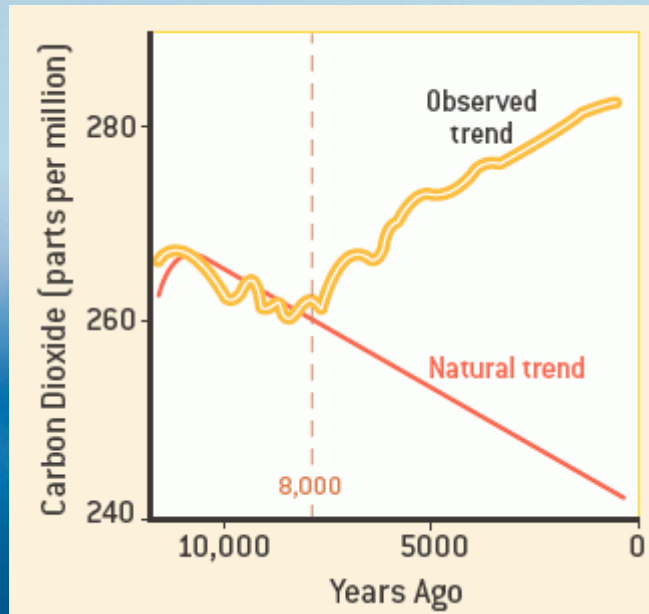
CO₂ : czy na pewno grzejemy Ziemię?

Porównanie zmierzonych i modelowanych 30-letnich zmian temperatury w różnych rejonach Oceanu Światowego wskazują, że naturalne zmiany klimatyczne (w tym stała słoneczna i wulkanizm) nie są w stanie wytłumaczyć obserwowanej zmienności. Natomiast gazy cieplarniane wyjaśniają ją z dokładnością do błędu użytych modeli.



Profile zmian temperatury dla sześciu akwenów (rysunek: *The Economist*, za T. P. Barnett et al., 2005, *Science*, 309, 5732, 284-287)

CO₂ : od kiedy ogrzewamy Ziemię?



Koncentracja CO₂ oraz metanu z rdzeni lodowych ze stacji Wostok na Antarkydzie (ostatnie 12 tysięcy lat)

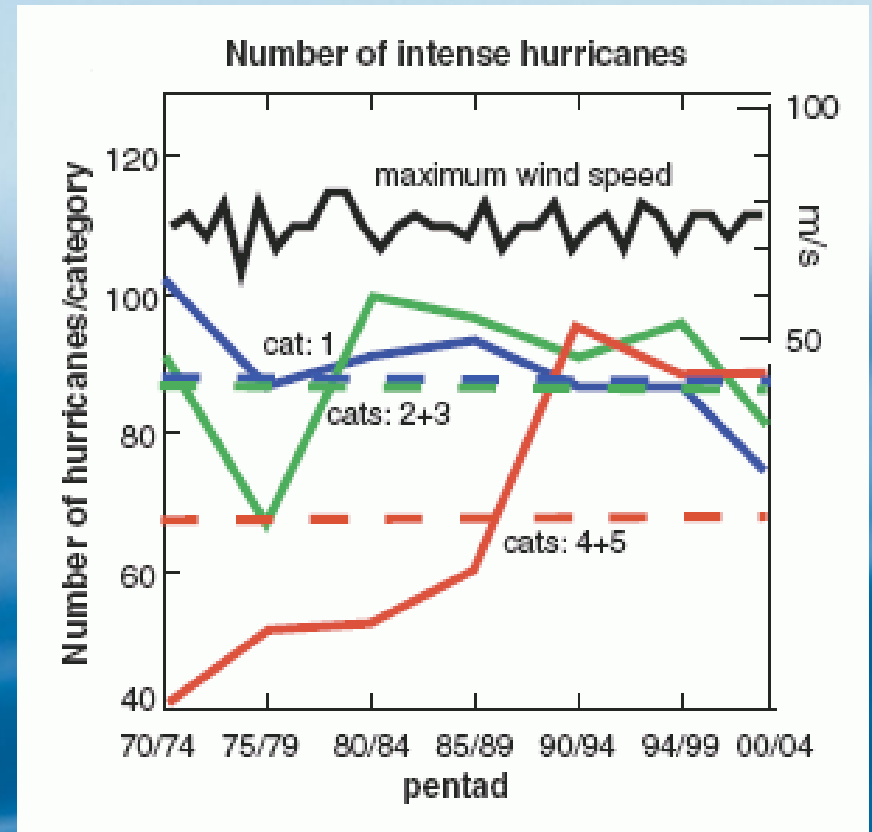
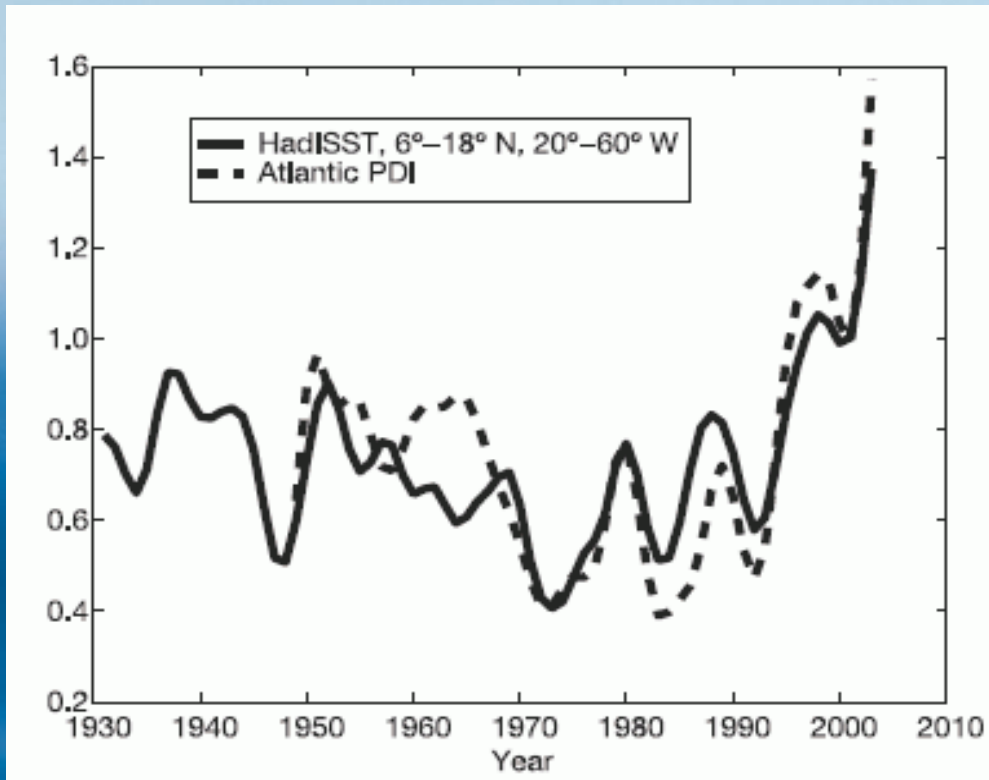
Dwutlenek węgla i metan przestały korelować z długofalowymi cyklami nasłonecznienia (Milankovitch, 1941) odpowiednio 8 i 5 tys. lat temu (początki rolnictwa odpowiednio w Europie i w Chinach).

Wniosek: Rozwój rolnictwa powstrzymał nadejście nowego zlodowacenia

Źródło: *Ruddiman, W. F. 2003, Clim. Change 61, 261–293*

Rysunki: *Ruddiman, W. F. 2005, Sci. Am., 2005*

CO₂ : skutki uboczne



Średnia temperatura wód Północnego Atlantyku we wrześniu oraz całkowita energia huraganów atlantyckich w latach 1930-2005 (*Webster et al. 2005*)

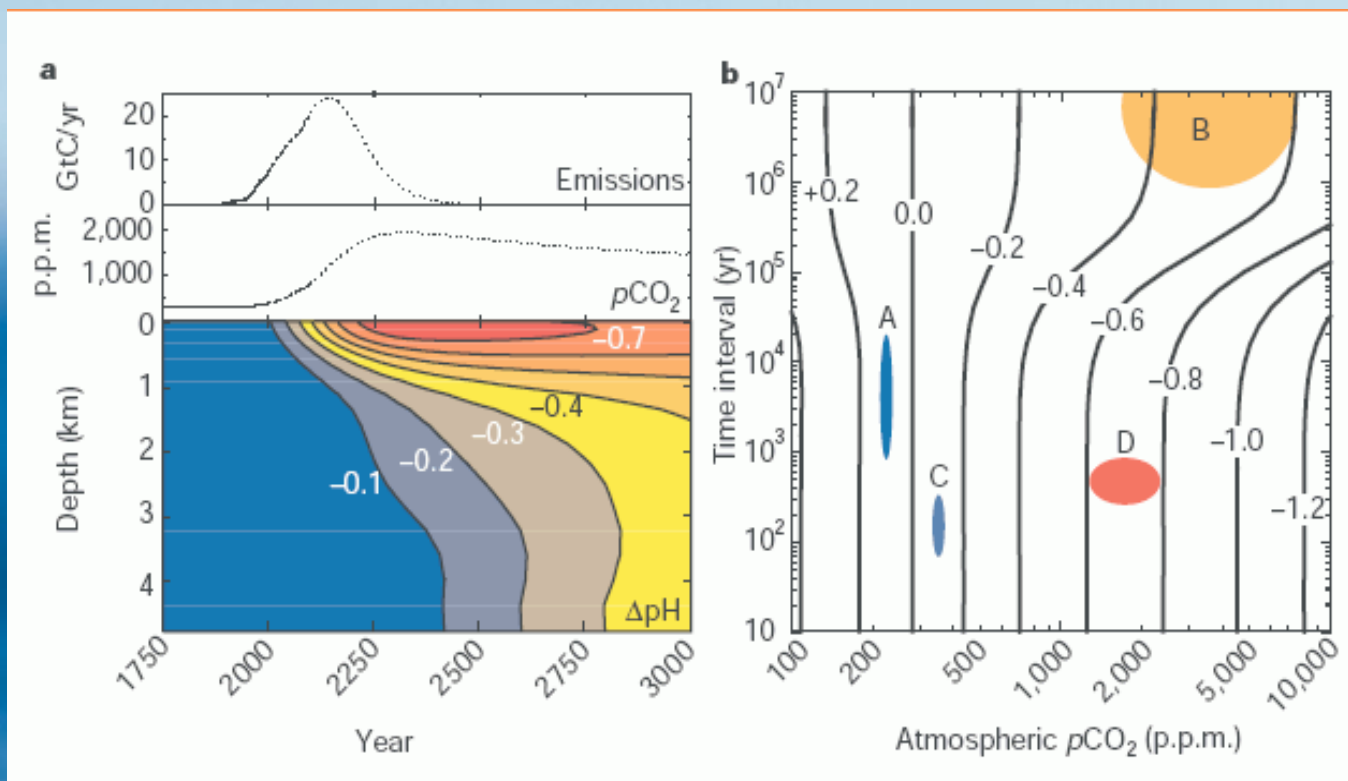
Procentowy udział huraganów różnej kategorii i maksymalna prędkość wiatru w funkcji czasu (*Emmanuel 2005*)

Ogrzewanie oceanów powoduje wzrost całkowitej energii huraganów, dodatkowo skoncentrowany w mniejszej liczbie najsilniejszych.

Źródła: *Emanuel K., 2005, Nature, 436. 686 – 688*

Webster P., Holland G., Curry J. & Chang H. R. et al., 2005, Science, 309. 1844 - 1846

CO₂ : zakwasimy ocean?



- Prognoza emisji i koncentracji CO₂ oraz zmian pH oceanu
- Porównanie skali zmian w okresie lodowcowym (A), przez ostatnie 300 mln lat (B), zmiany w czasach historycznych (C) oraz zmiany prognozowane na najbliższe stulecia (D).

Zródło: *K. Caldeira & M.E. Wickett, 2003, Nature 425, 325-325*

Podsumowanie

Gdyby życie nie pojawiło się wcześnie w historii naszej planety jej obecny wygląd byłby całkowicie odmienny (Wenus? Mars z atmosferą?).

Ziemia była i jest daleka od homeostazy; życie jest jednak w stanie znakomicie dostosować się do zmian w geologicznej skali czasu.

Gwałtowne i losowe zmiany systemu ocean-atmosfera jakie zdarzają się średnio co około 100 mln lat prowadzą do masowych wymierań.

Jesteśmy w trakcie jednej z takich zmian warunków życia – tym razem naszej własnej produkcji...

Dziękuję za uwagę