

Ocean a klimat:

wczoraj, dziś i jutro

Wykład 1:

Maszyna klimatyczna Ziemia (*zmienność w skali geologicznej*)

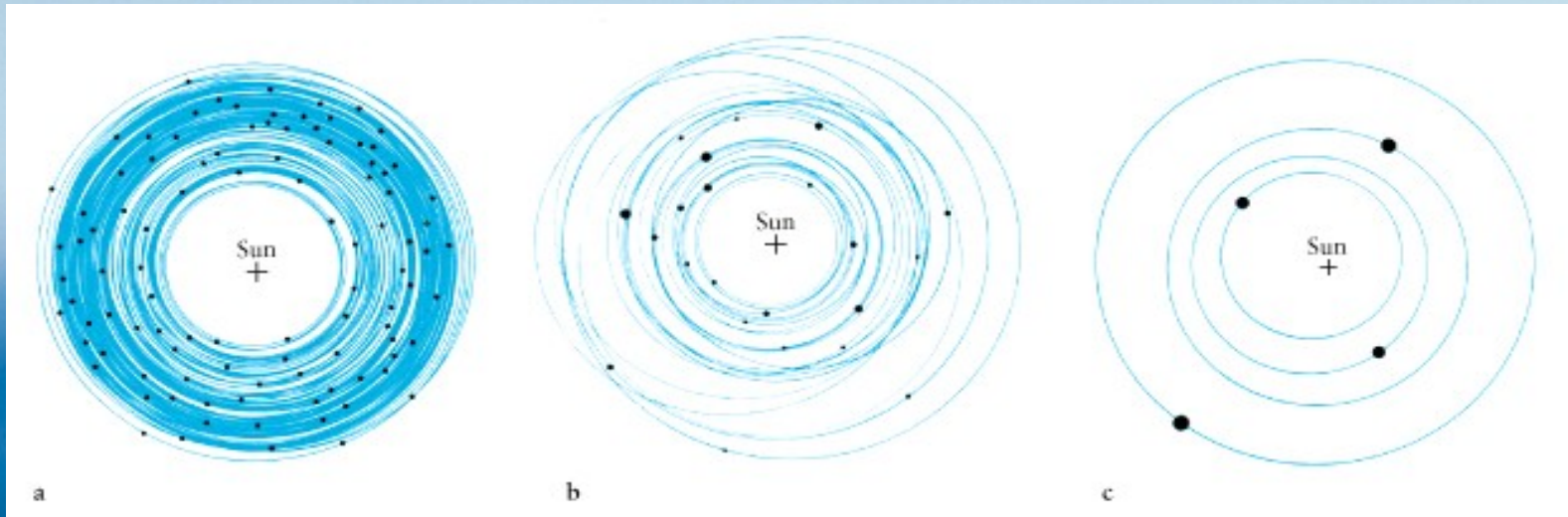
Jacek Piskozub

Studium Doktoranckie IOPAN, semestr zimowy 2016/17 r.

Jacek Piskozub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów 10.2016 - 01.2016

- ✓ **Maszyna klimatyczna Ziemia (zmienność w skali geologicznej)**
- ✓ Epoka lodowa w której żyjemy (zmienność w skali astronomicznej)
- ✓ Gwałtowne zmiany klimatu (deglacjacja, zmienność “suborbitalna”)
- ✓ Holocen: klimat, ocean a cywilizacja, (stała słoneczna i wulkanizm)
- ✓ Północny Atlantyk – kuźnia klimatu (cyrkulacja termohalinowa)
- ✓ Zmienność klimatu w skali dekadalnej (AMO, NAO, PDO)
- ✓ Tropiki a zmienność klimatu (ENSO, huragany, monsuny)
- ✓ Aerosol: wielka niewiadoma klimatyczna
- ✓ Gazy o znaczeniu klimatycznym (cykl węgla, CO₂, metan, DMS)
- ✓ Globalne ocieplenie a ocean (zmienność antropogeniczna)
- ✓ Zmiany klimatyczne w rejonach polarnych

Przed nastaniem życia



Artystyczna wizja powstania Układu Słonecznego

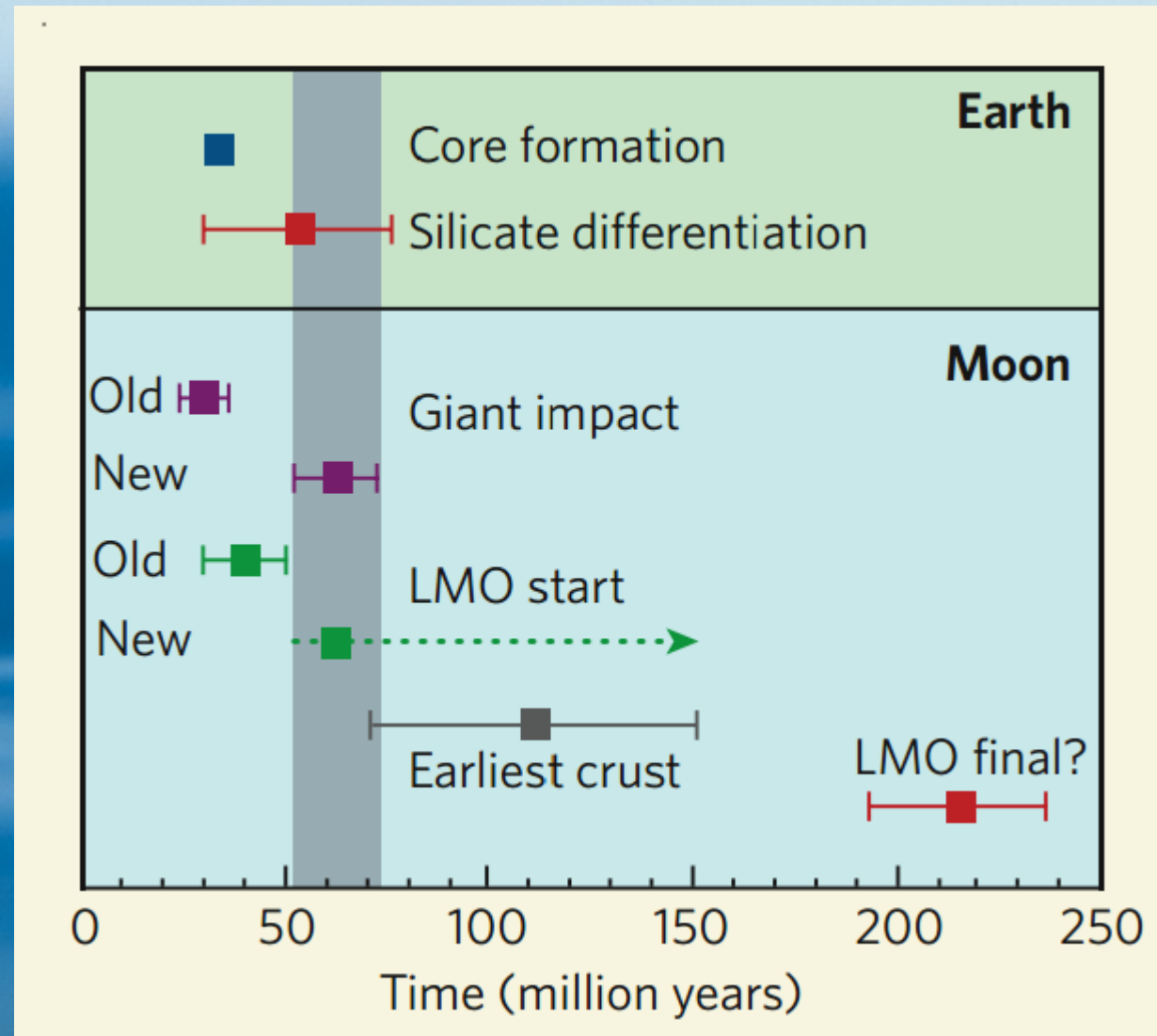
Najwcześniejszy okres istnienia Ziemi:

- Układ Słoneczny powstaje 4,568 mld lat temu (*Bouvier & Wadhwa 2010*)
- Wielkie Bombardowanie i powstanie Księżyca
- Pierwotna atmosfera (H_2 , CH_4 , NH_3 czy N_2 i CO_2 ?)
- Jak szybko powstały oceany?

Jak szybko powstała Ziemia i Księżyc?

Chronologia powstawania jadra i płaszcz Ziemi i Księżyca (oraz okresu Lunar Molten Ocean – oceanu lawy na księżycu) od powstania Układu Słonecznego czyli po 4568 mln lat temu.

Powstanie Księżyca w wyniku zderzenia planet to ok. 60 mln lat później, płaszcz Ziemi powstaje w ciągu 80 mln lat, a stała powierzchnia Księżyca być może aż 200 mln lat.



Powstanie oceanów

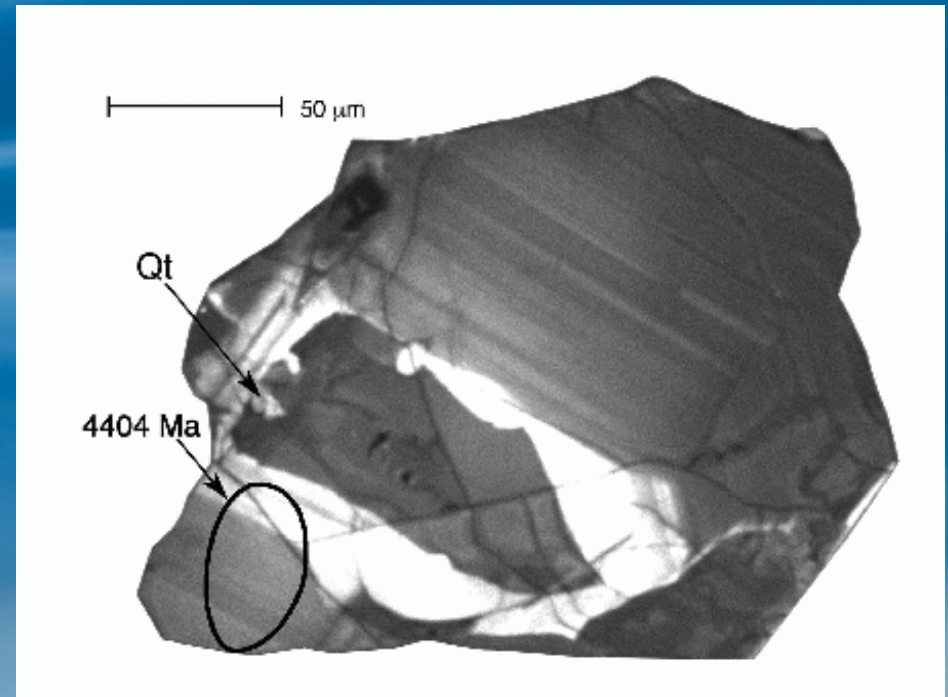
Ziarno cyrkonu znalezione w Zachodniej Australii posiada kryształ datowany na 4,4 mld lat (4404 ± 8 mln).

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

Wniosek:

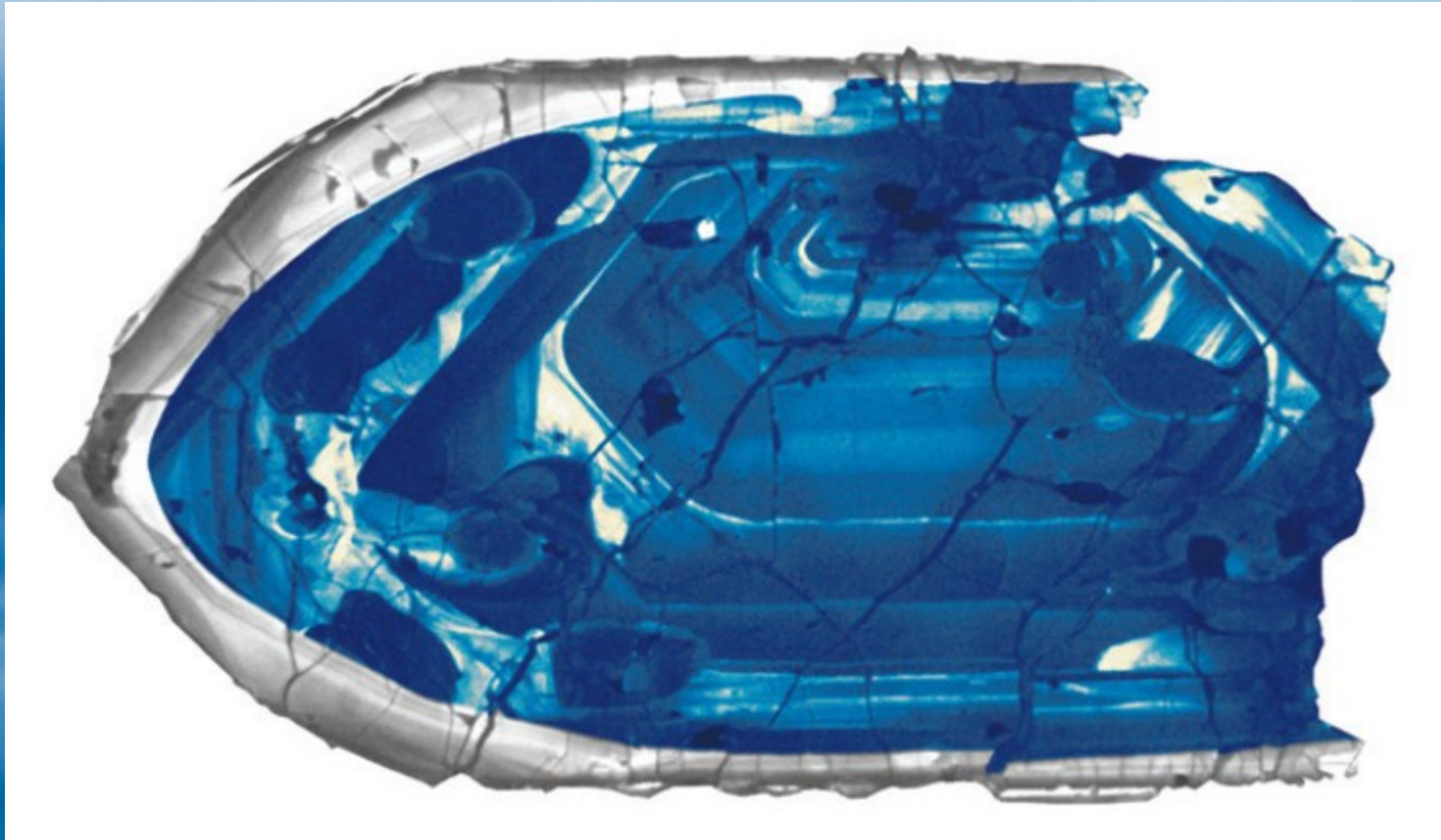
Oceany i kontynenty powstały zaledwie ok. 150 mln lat po powstaniu Układu Słonecznego, czyli mniej niż 100 mln lat po powstaniu Księżyca.

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



Uaktualnienie

Ziarno cyrkonu znalezione w Zachodniej Australii zostało ponownie wydatowane na 4374 ± 6 mln lat.

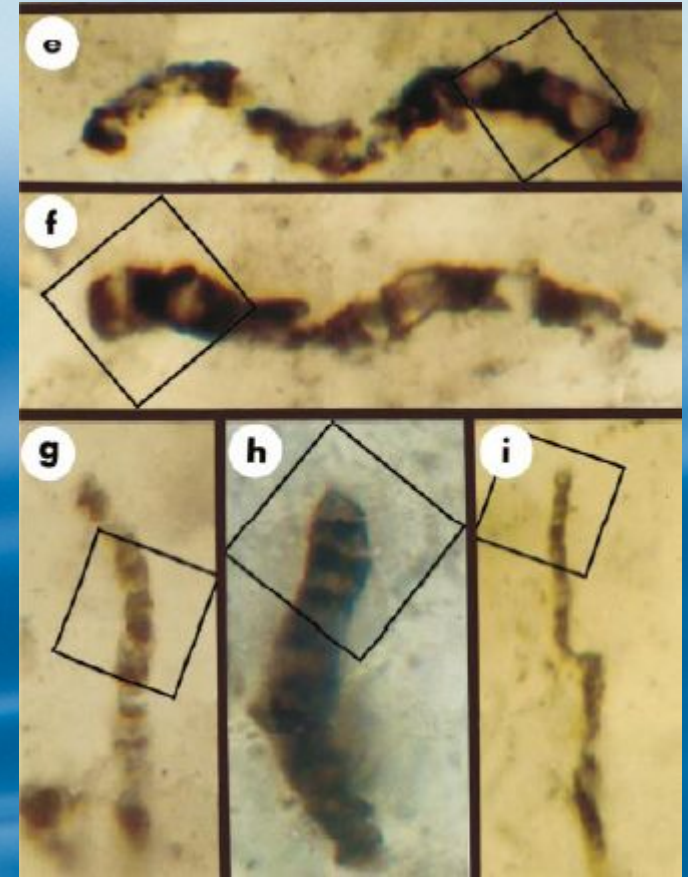


Zatem oceany powstały zaledwie ok. 200 mln lat po powstaniu Układu Słonecznego, czyli mniej niż 150 mln lat po powstaniu Księżyca.

Bowring 2014 (Nature Geoscience) i Valley et al 2014 (Nature Geoscience)

Początki życia na Ziemi

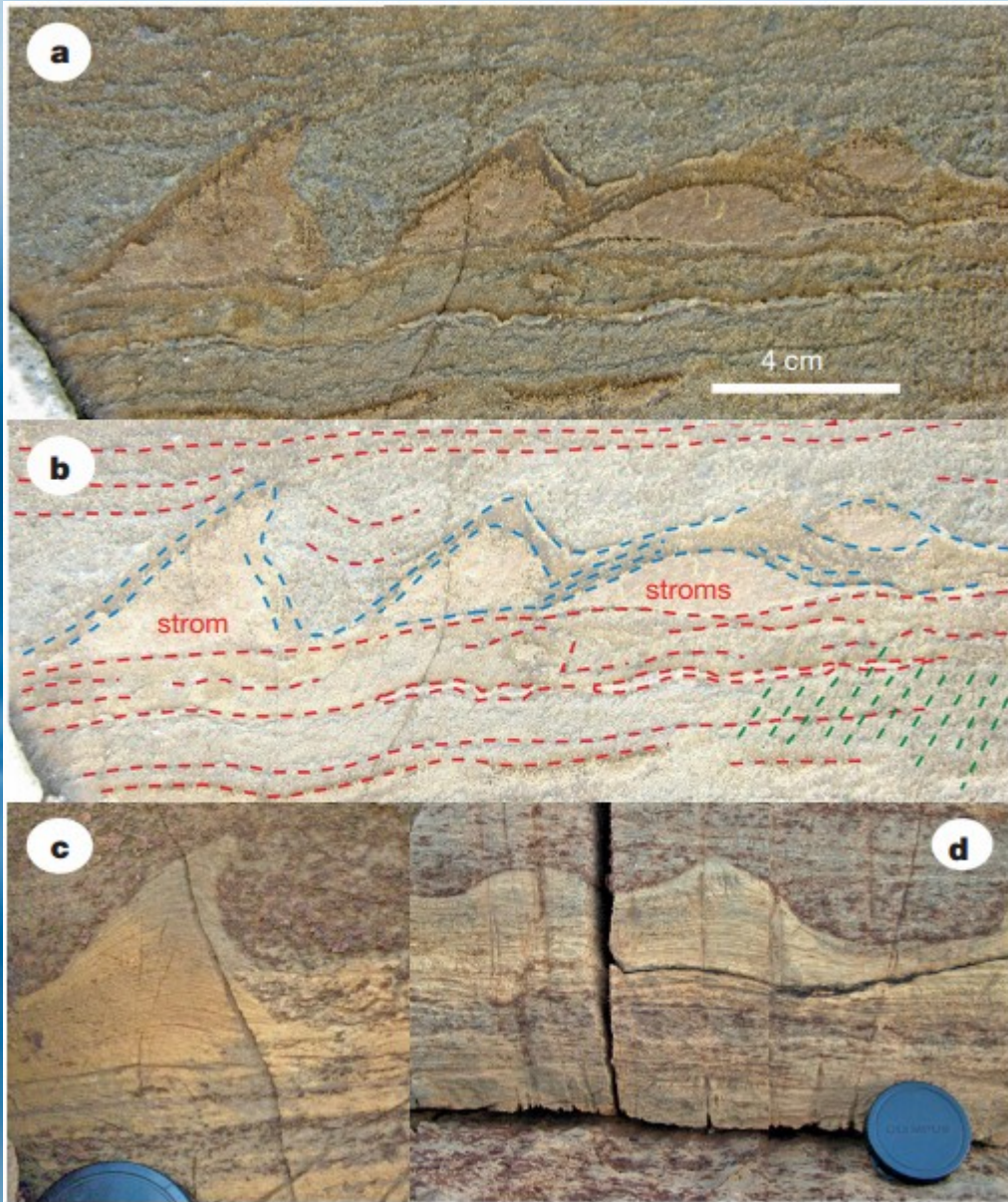
- Najstarsze izotopowe ślady życia: Zachodnia Grenlandia, 3,8 mld lat (*Mojzsis et al., 1996*)
- Najstarsze skamieniałości (?): 3,5 mld lat, Zachodnia Australia (*Schopf et al., 2002*)
- Otwarty problem - gdzie powstało życie: sadzawki czy smokery? (*Nisbet & Sleep 2001*)



Najstarsze “podobne do sinic” skamieniałości z czertów Zachodniej Australii

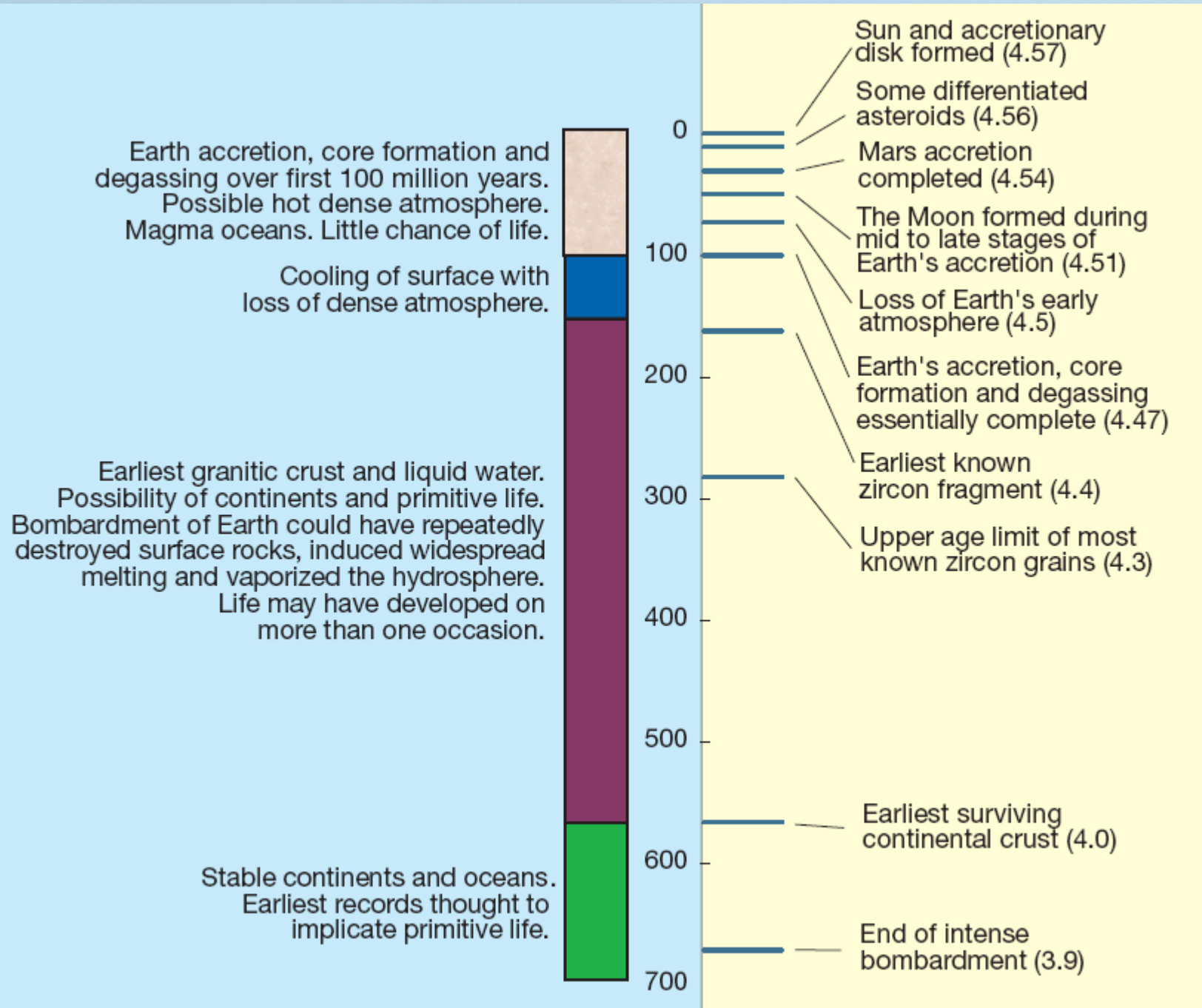
Źródło: *Schopf JW et al., 2002, Nature, 416 (6876), 73-76*

Stromatolity w najstarszych zachowanych skałach



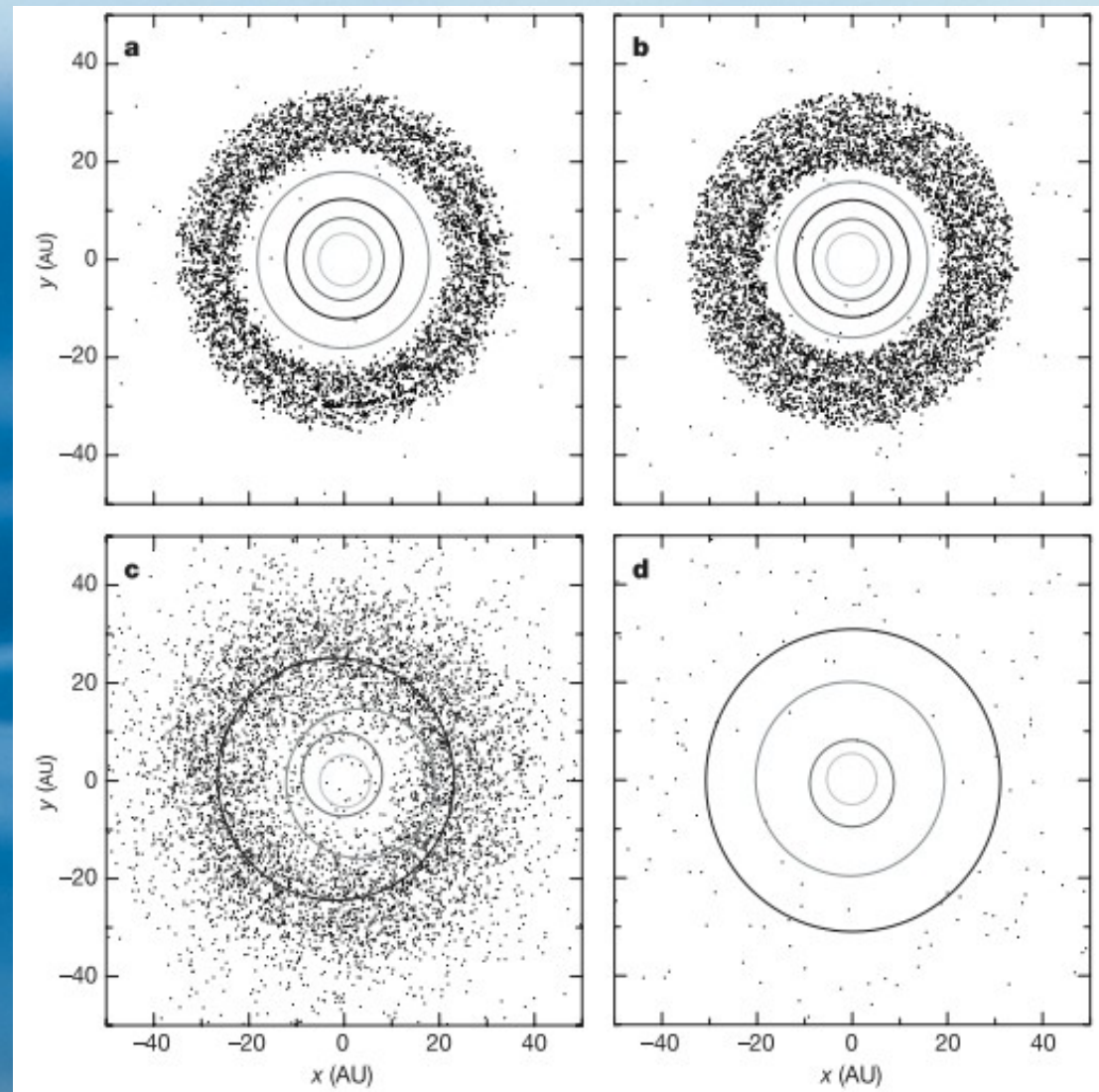
W najstarszych zachowanych skałach o małym stopniu metamorfizacji z pasu Isua w SW Grenlandii datowanych na 3,7 mld lat zachowały się stromatolity (a i b) podobne do form późniejszych. Świadczy to o tym, że organizmy autotroficzne istniały już wtedy.

Pierwsze 700 mln lat

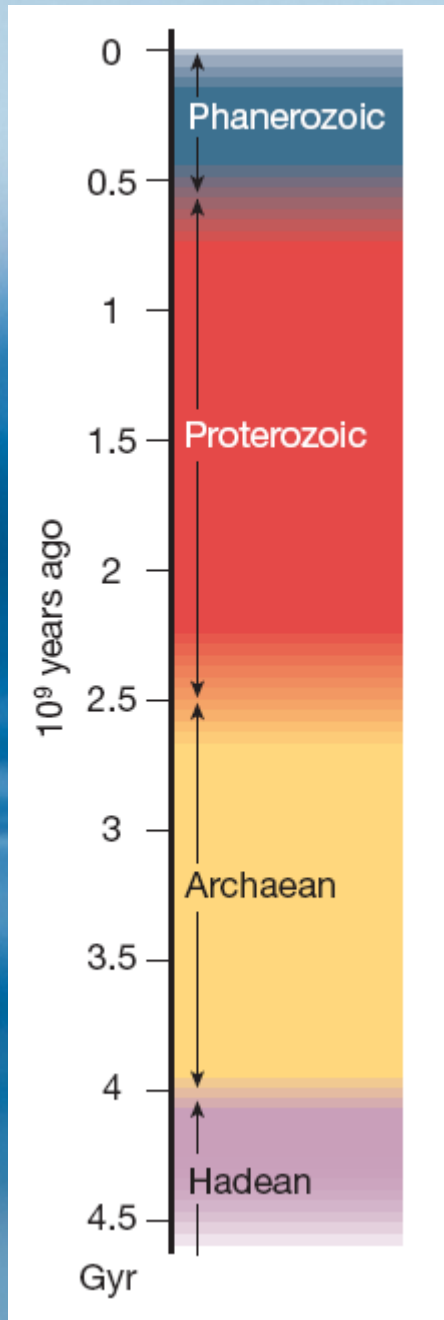


Wielkie Bombardowanie – dlaczego dopiero po kilkuset milionach lat?

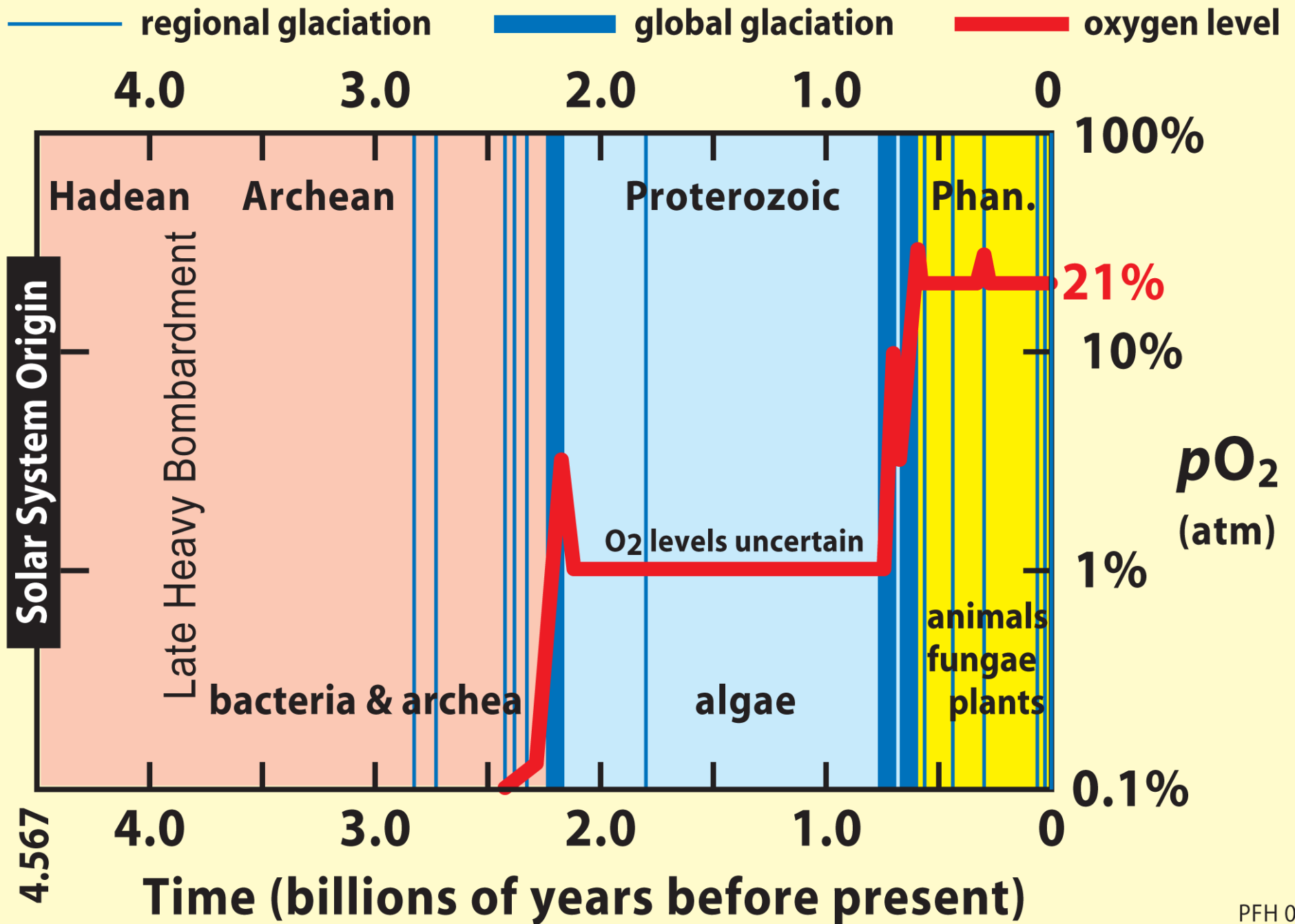
Według najnowszych modeli ewolucji Układu Słonecznego Wielkie Bombardowanie spowodowane zostało migracją Jowisza i Saturna pod wpływem oddziaływania z chmurą asteroid. Po osiągnięciu rezonansu okresów 1:2 Jowisza i Saturna migracja przyspiesza dezorganizując chmurę asteroid. Rysunek przedstawia orbity 4 planet gigantów i xxx na początku ewolucji, po ok. 800 mln lat od niej tuż przed Wielkim Bombardowaniem, oraz po kolejnych 5 i 200 mln lat.



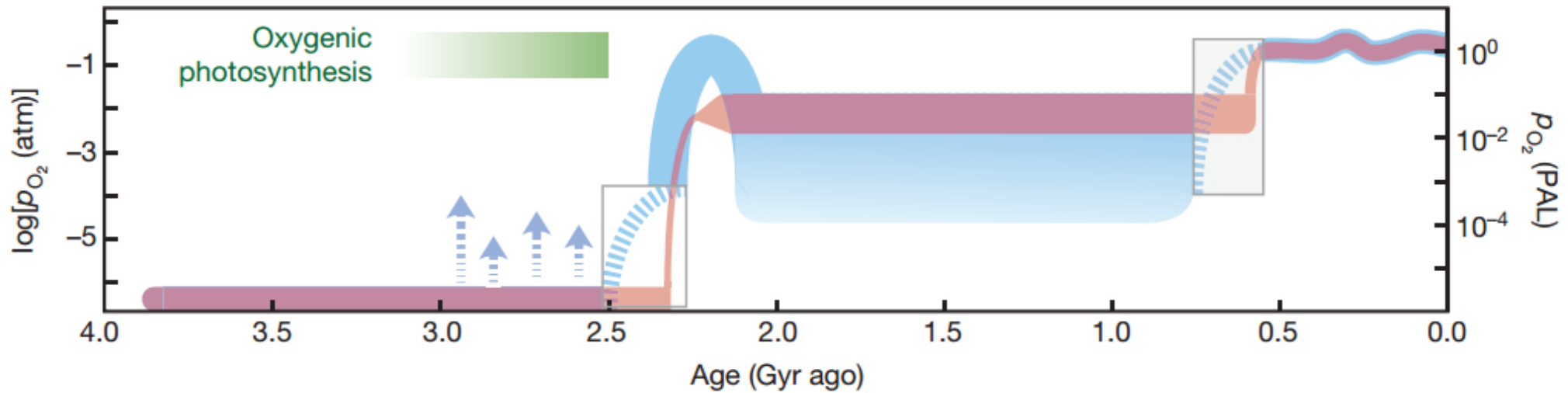
Dzieje Ziemi i życia (w największym skrócie)



- **Fanerozoik**: atmosfera bogata w tlen, życie wielokomórkowe.
- **Proteozoik**: cykl superkontynentów, tlen w oceanie (niekoniecznie w atmosferze), jądrowce (eukarionty)
- **Archaik**: wzmożony wulkanizm, początki kontynentów, początki życia (także fotosyntezy)
- **Hadeik**: Wielkie Bombardowanie, wielokrotna sterylizacja planety, brak warunków do życia (?)



Uaktualnienie



Ślady obecności tlenu w atmosferze odkryto niedawno w kopalnych glebach (paleozolach) z Zachodniej Australii sprzed ponad 2,5 mld lat. Był to okres pierwszych znanych zlodowaceń. Przypadek?

Gazy cieplarniane: CO₂ czy metan ?

Młoda ziemia grzana była przez metan i CO₂,
ale w jakich proporcjach?

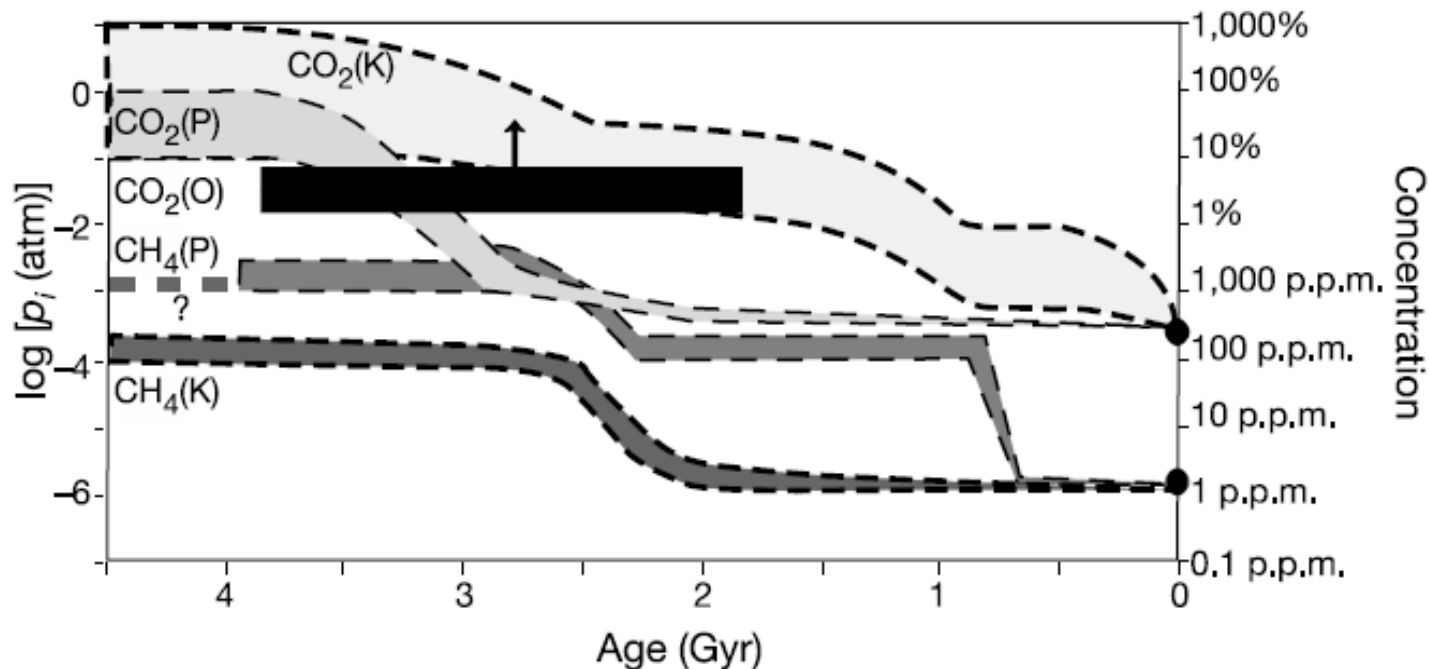
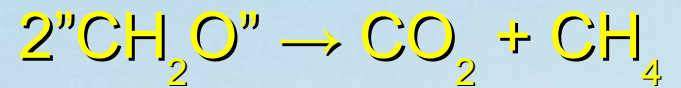


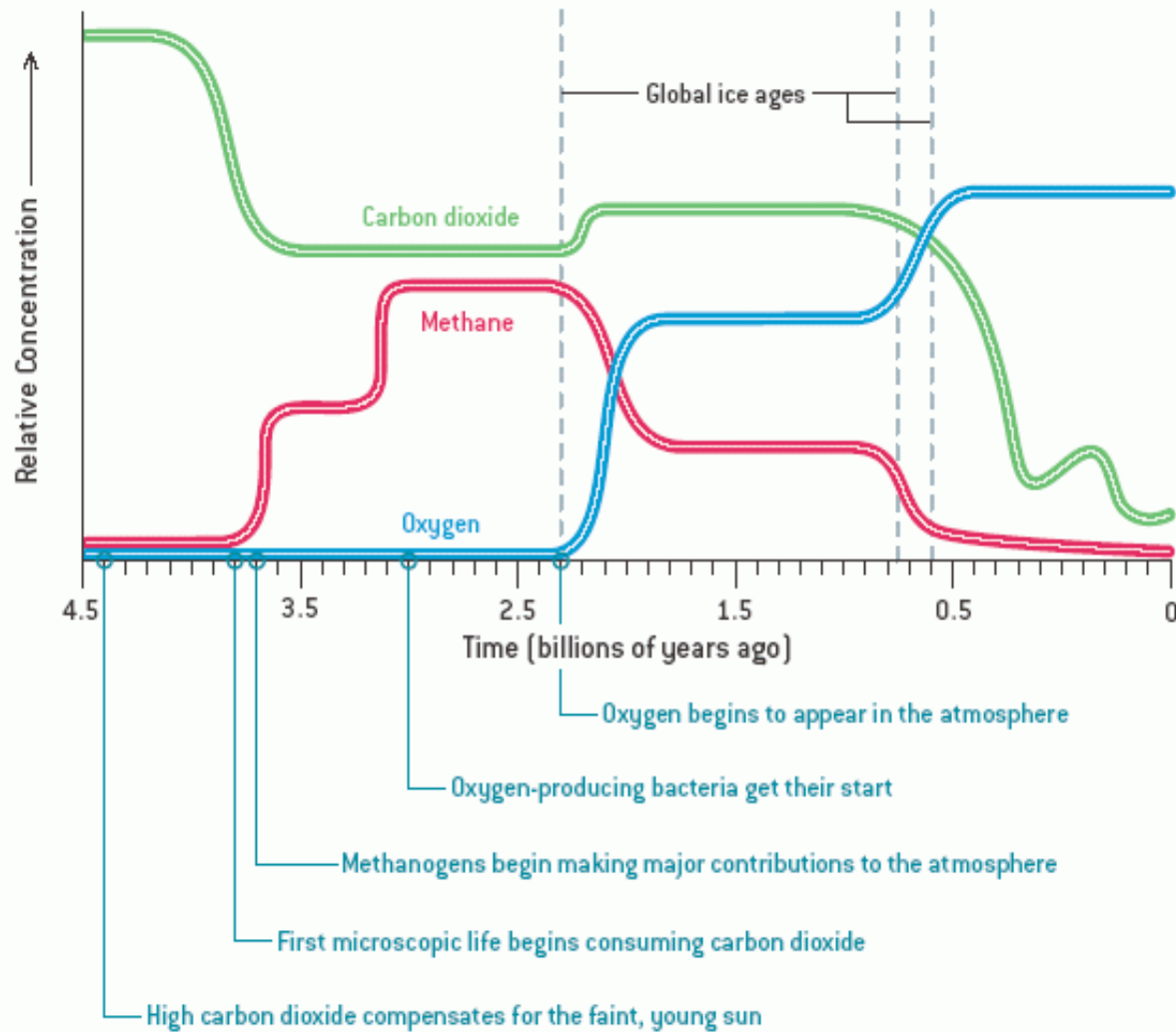
Figure 1 Proposed models for the evolution of atmospheric CO₂ and CH₄. Curve CO₂(K) is reproduced from Kasting⁶; curve CH₄(K) was constructed from descriptions in Kasting⁶; curves CO₂(P) and CH₄(P) were constructed from the values estimated by Pavlov *et al.*^{4,5,27} at 3.9 Gyr, 2.8 Gyr and 2.3–0.75 Gyr ago; and line CO₂(O) is from this study. p_i refers to the partial pressure of a gaseous species i .

Może jednak metan



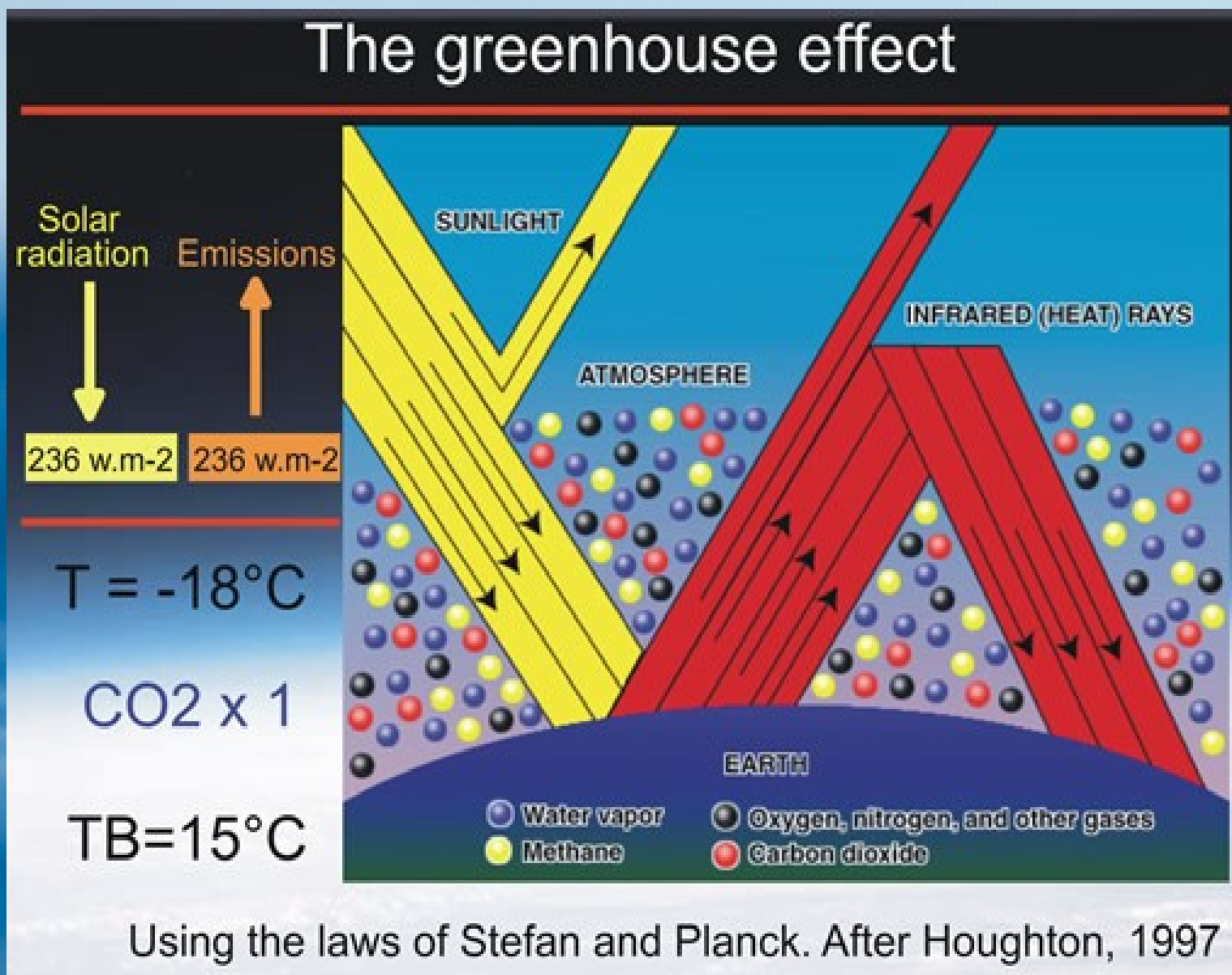
W czasach niskiego stężenia tlenu istotnym procesem mogło być oddychanie beztlenowe.

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



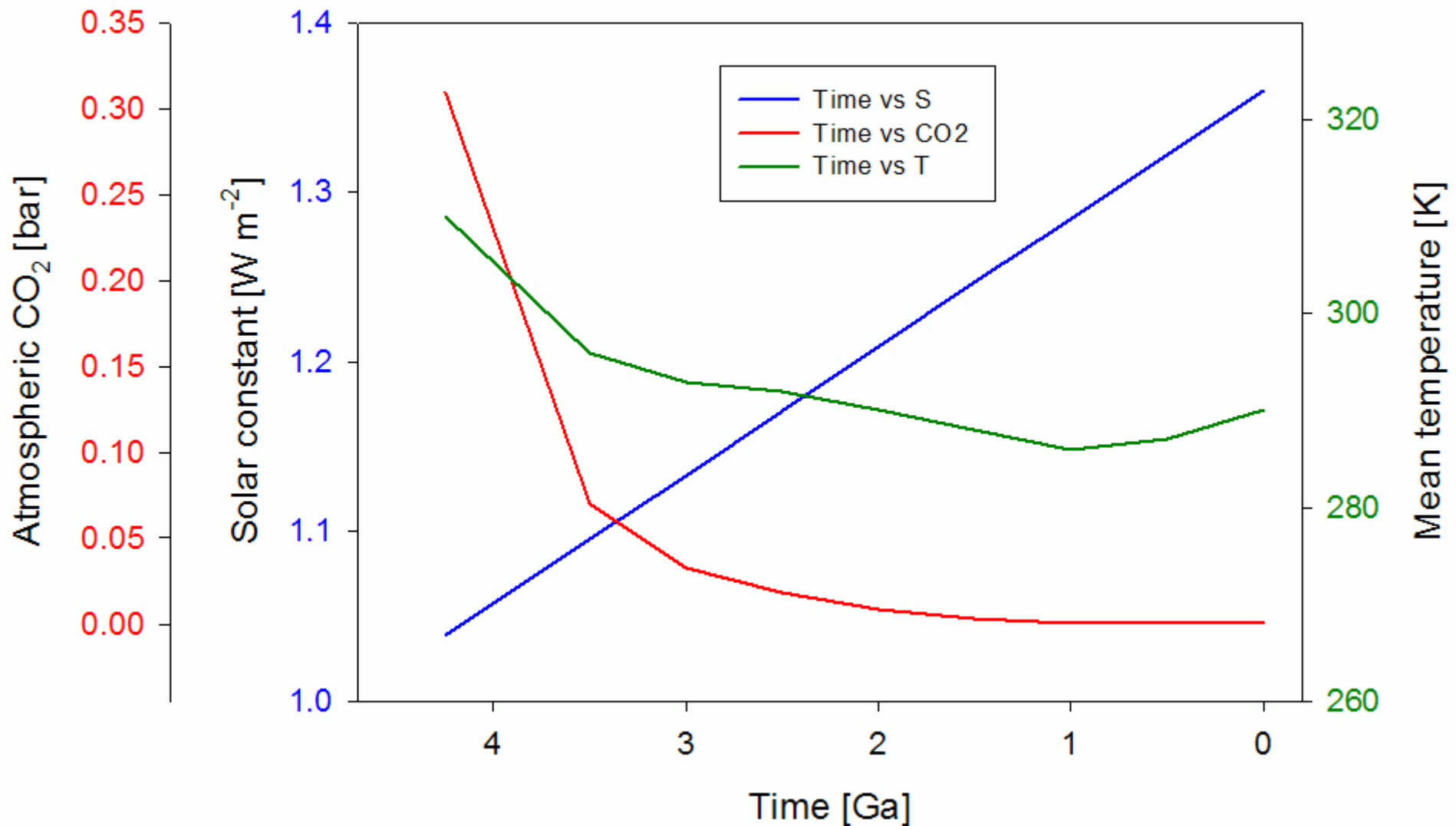
Względna koncentracja gazów atmosferycznych: (Kasting 2004)

Efekt cieplarniany



Proste użycie podstawowych praw fizyki i geometrii pozwala wyliczyć, że Ziemia byłaby o 33 stopnie zimniejsza gdyby nie „gazy cieplarniane” H_2O , CO_2 , CH_4 .

Skąd taka stabilność klimatu?



“Stała” słoneczna, CO_2 i temperatura w historii Ziemi

za Owen Cess Ramanathan 1979

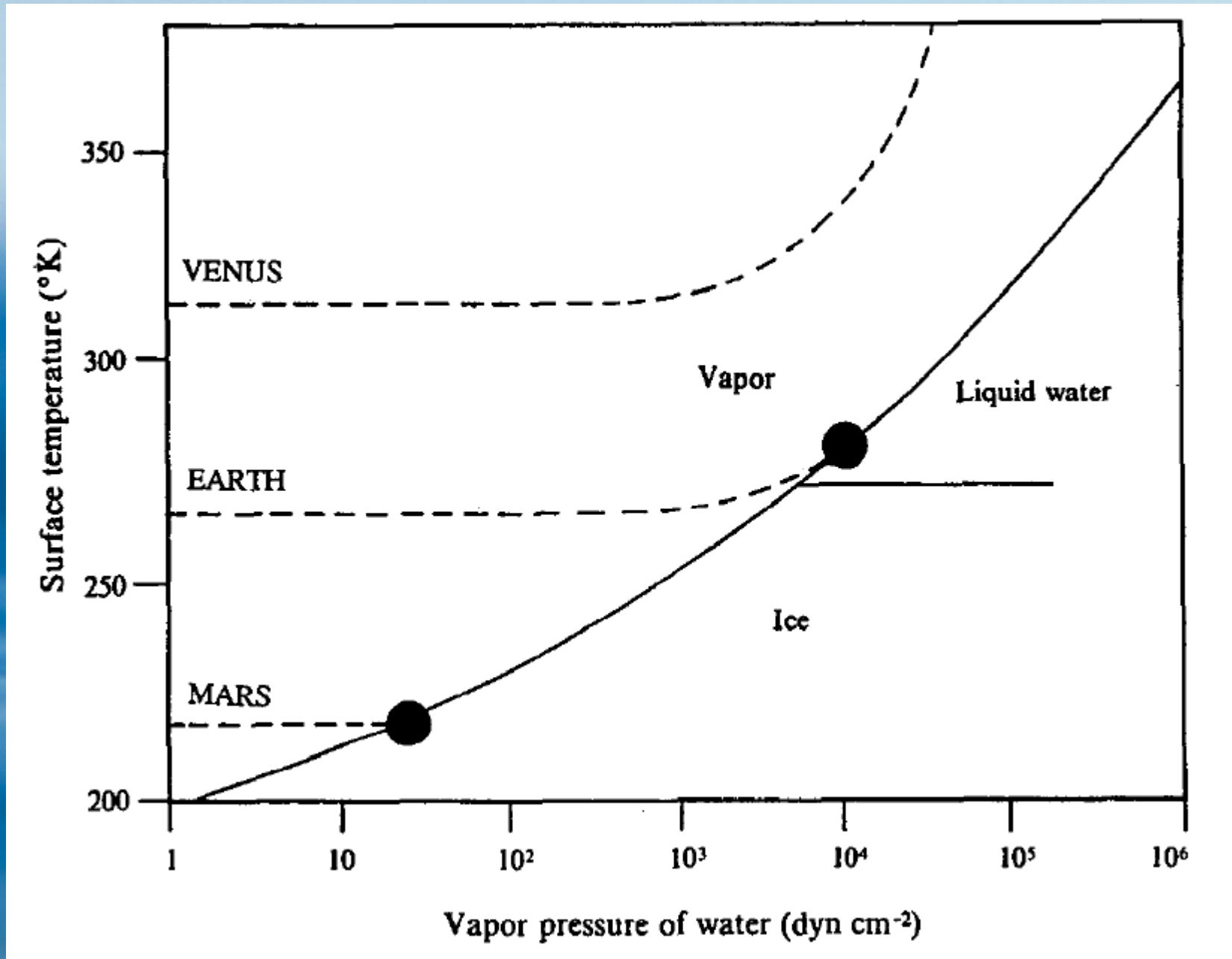
Ziemia jako samoregulująca się maszyna klimatyczna (homeostat) ?

Hipoteza Gaji (Lovelock 1973)

- Biosfera jako „organizm” adaptujący Ziemię do swoich potrzeb
- „Daisyworld”
- Gaja „mocna” i „słaba”
- Sprzężenia zwrotne ujemne
- Ile w tym prawdy?

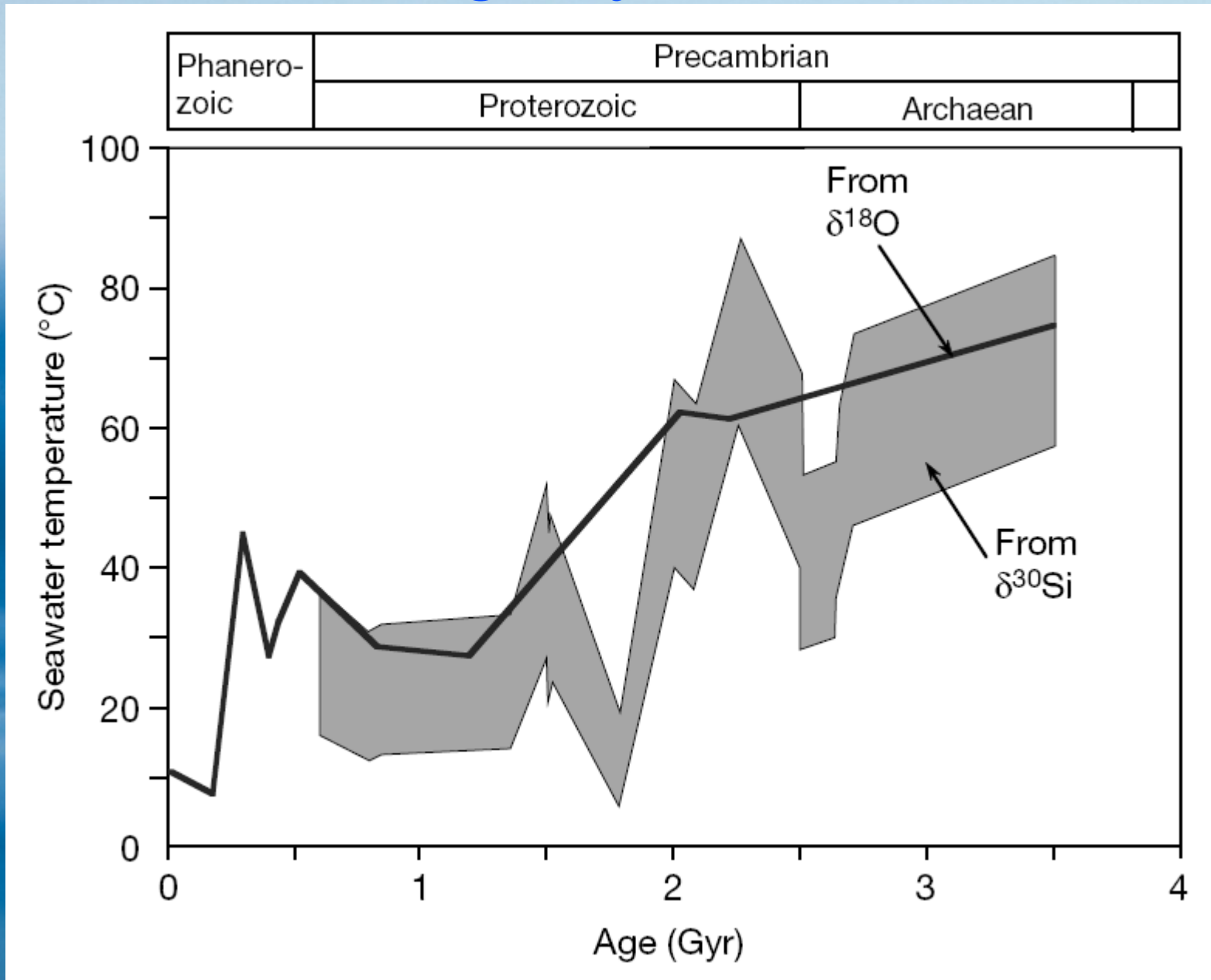


Para wodna jako gaz cieplarniany



Tylko istnienie stanu nasycenia parą wodną ratuje Ziemię przed losem Wenus (przegrzaniem). *Rampino & Caldeira 1994*

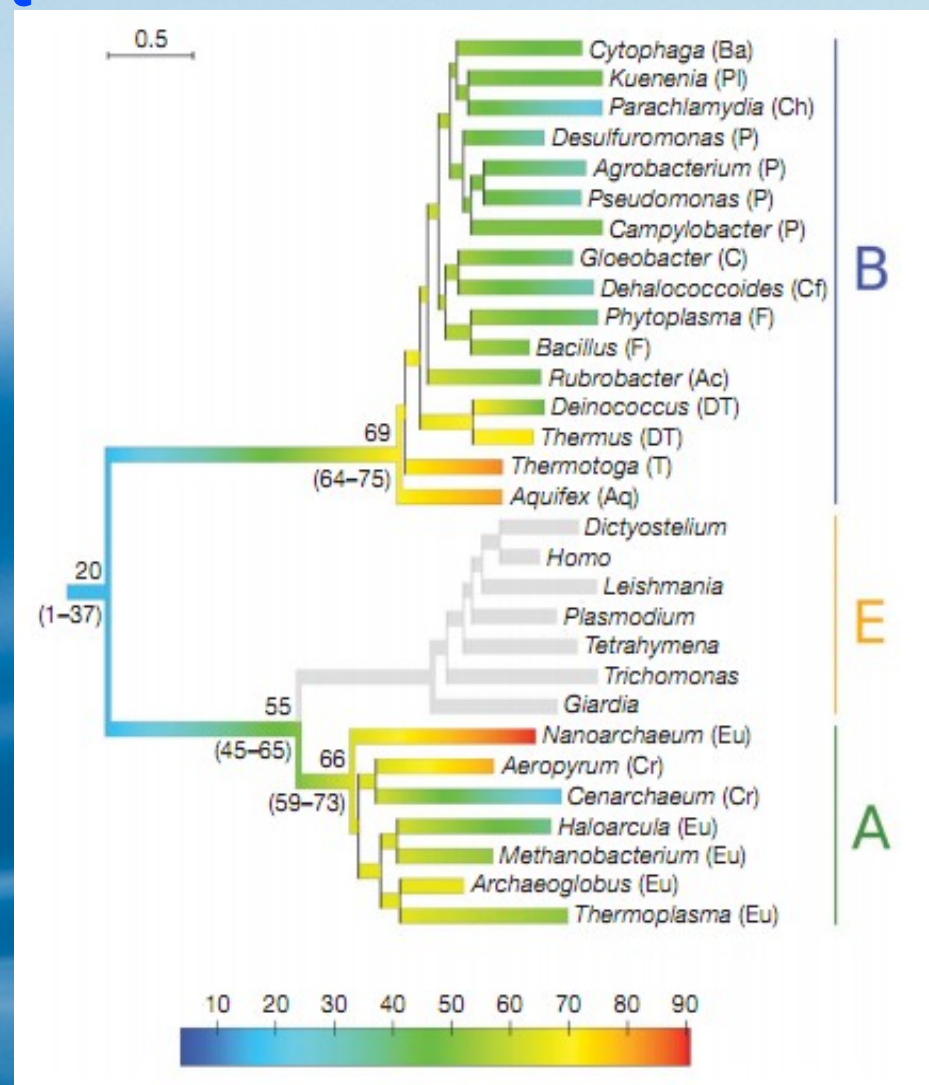
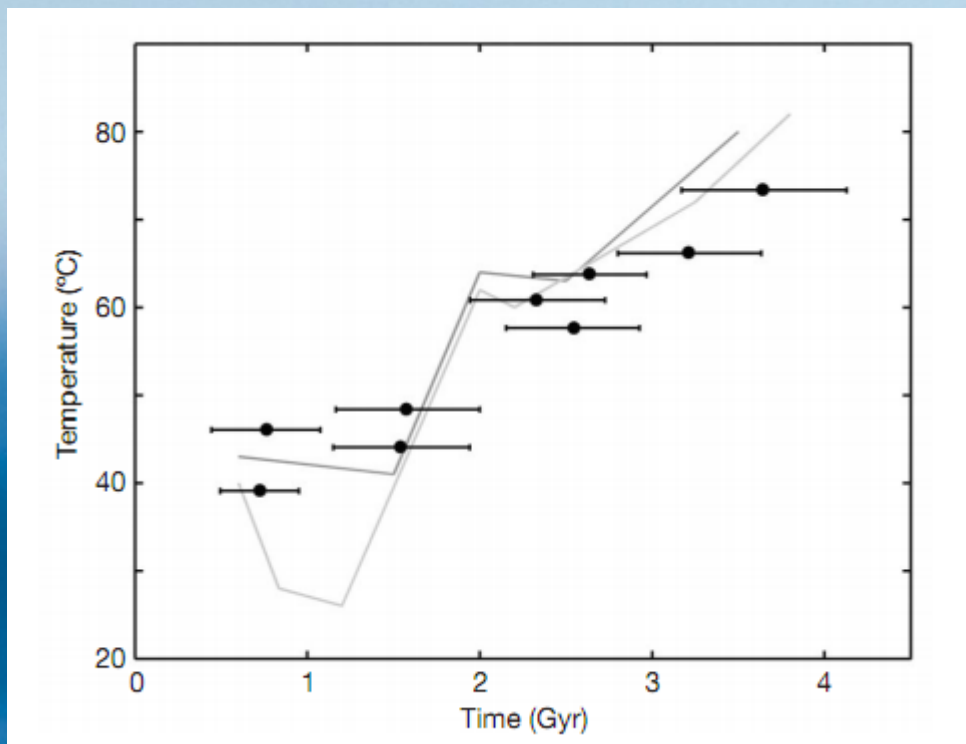
Pierwotne gorące morze 1/2



Wg. badań paleogeochemicznych życie narodziło się w temperaturze 80° C?

Robert & Chaussidon 2006 (Nature)

Pierwotne gorące morze 2/2



Co ciekawe badanie genetyczne nad drzewem genealogicznym białek Elongation Factor wskazują na powstanie życia w temperaturze ponad 60° C. Jednak badanie rybosomalnego RNA zdają się wskazywać, że Ostatni Uniwersalny Wspólny Przodek (LUCA) żył w znacznie niższych temperaturach...

Gaucher Govindarajan Ganesh 2008 (Nature); Boussau et al. 2008 (Nature)

Podsumowanie 1/3

- Życie powstało na naszej planecie bardzo wcześnie – gdy tylko było to możliwe (albo nawet wcześniej – ale za to kilkakrotnie)
- Rozwój życia do form o wysokim metabolizmie a następnie wielokomórkowych był możliwy dzięki wzrostowi koncentracji tlenu – dzięki procesom biologicznym!
- Utrzymanie życia na Ziemi od czasu jego powstania możliwe było dzięki utrzymywaniu jej średniej temperatury w wąskim zakresie przyjaznym dla białka.
- Było to możliwe dzięki zmniejszaniu się koncentracji gazów cieplarnianych przy jednoczesnym wzrastaniu jasności Słońca.
- Na ile jest to przypadek a na ile zespół sprzężeń zwrotnych z udziałem samego życia?

Cykl superkontynentów (cykl Wilsona)

Superkontynenty i ich daty powstania (w odwrotnej kolejności chronologicznej i rosnącej fantazji geologów):

Pangea: 300 Ma

Pannotia: 600 Ma

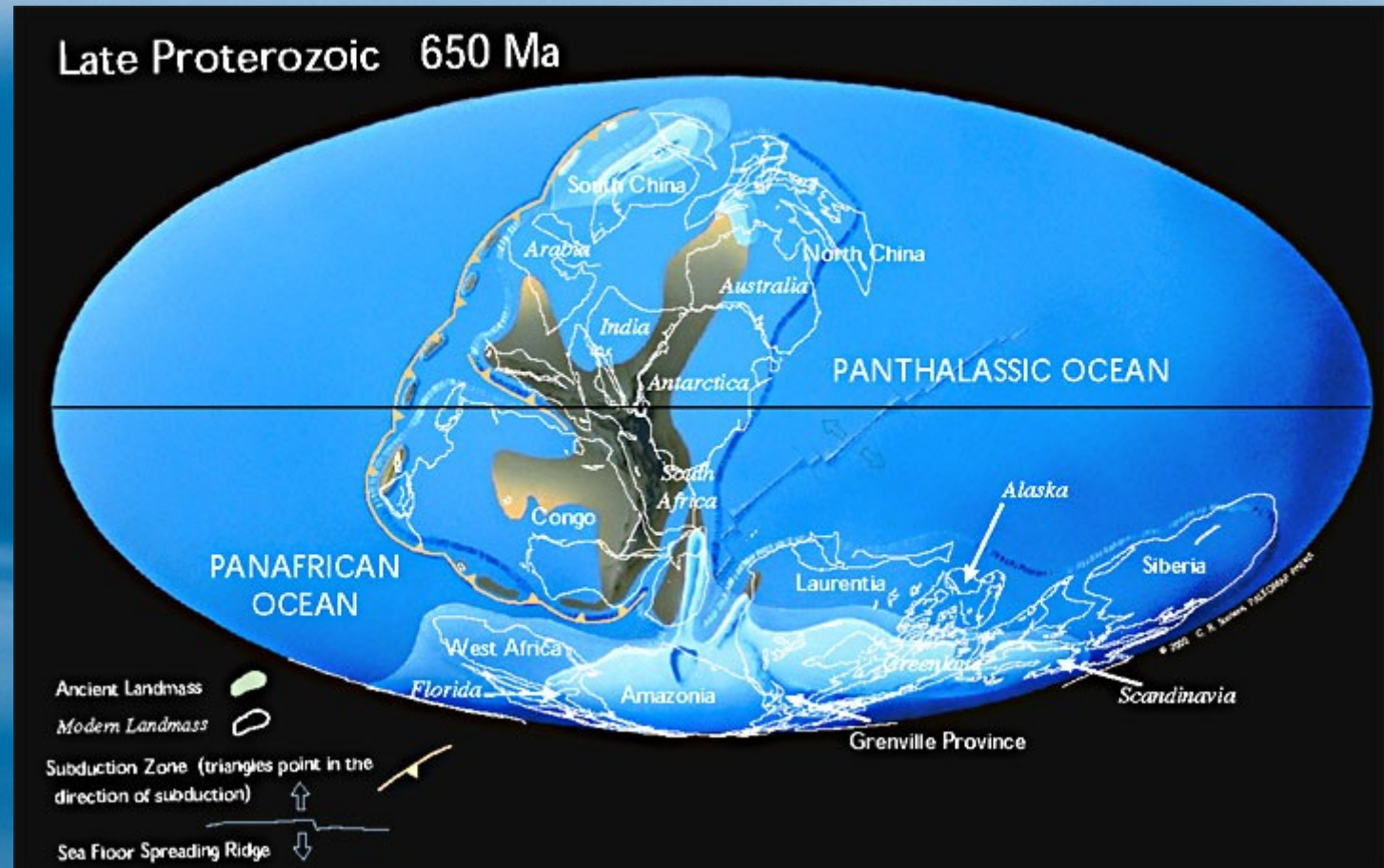
Rodinia: 1100 Ma

Kolumbia 1,8 Ga

Kenorland: 2,7 Ga

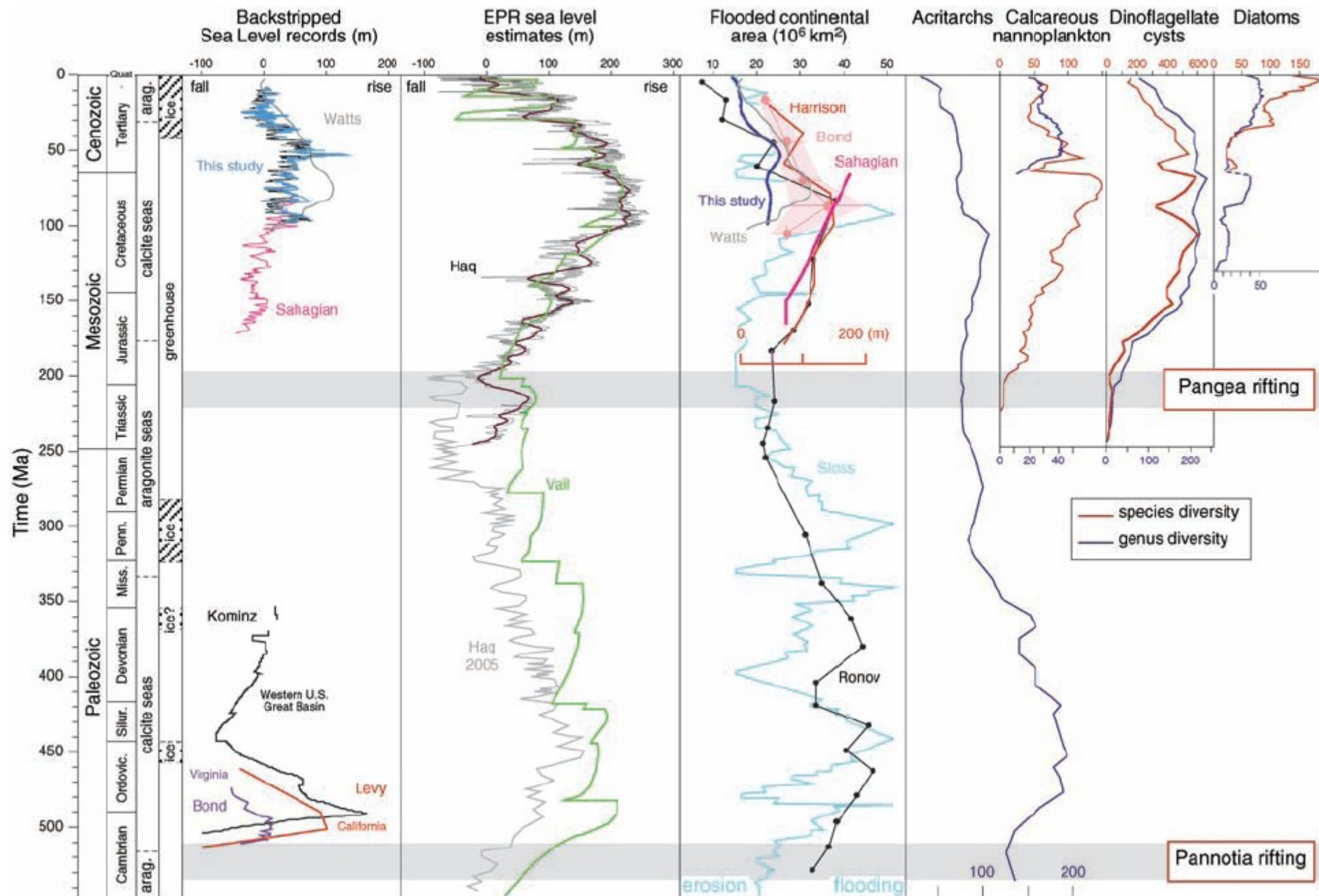
Ur: 3,0 Ma

Vaalbara: 3,6 Ma



Pannotia: między Rodinią a Pangeą

Zmiany poziomu morza w fanerozoiku: działanie cykli geologicznych w skali setek milionów lat



Kula Śnieżna Ziemia

Snowball Earth: Kryzys życia 800-600 mln lat temu



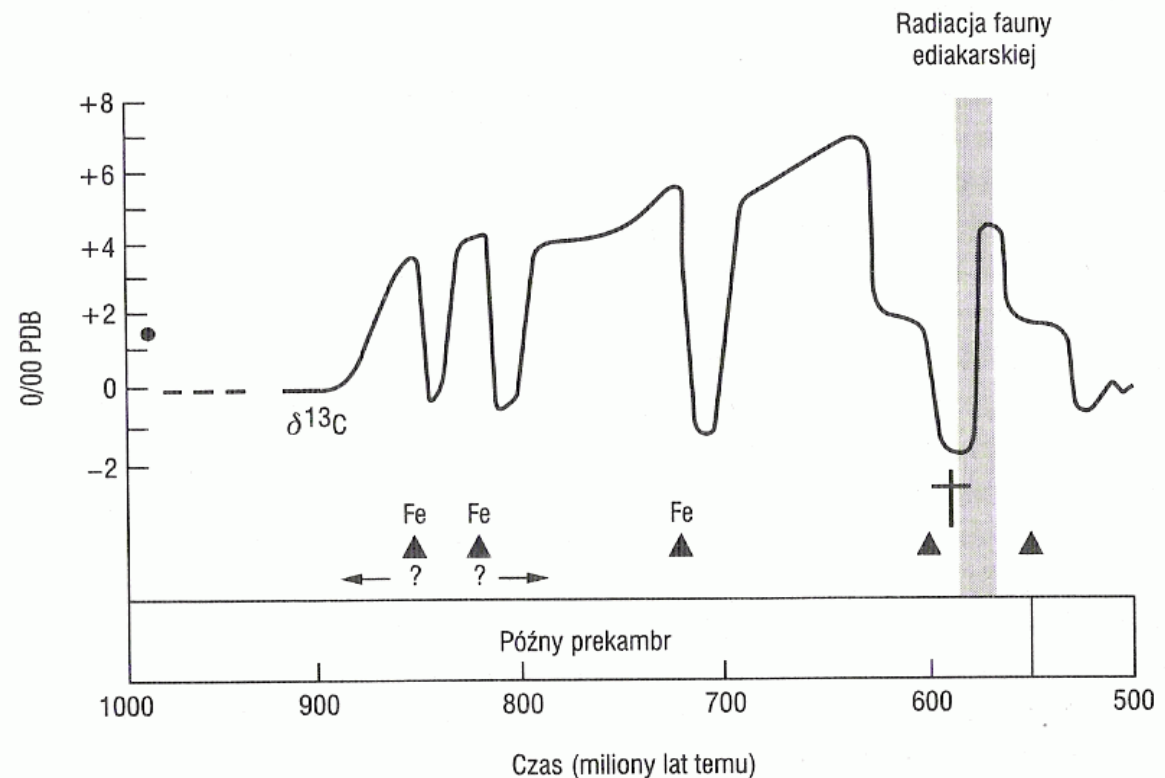
Rozkład kontynentów 600 mln lat temu
(*Hoffman & Schrag 2000*)

Fazy:

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

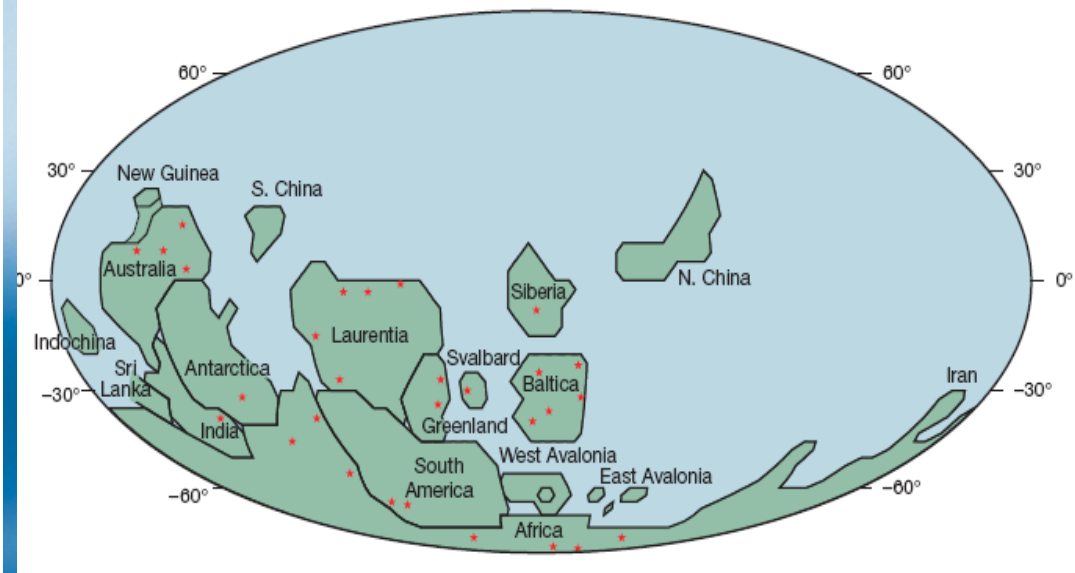
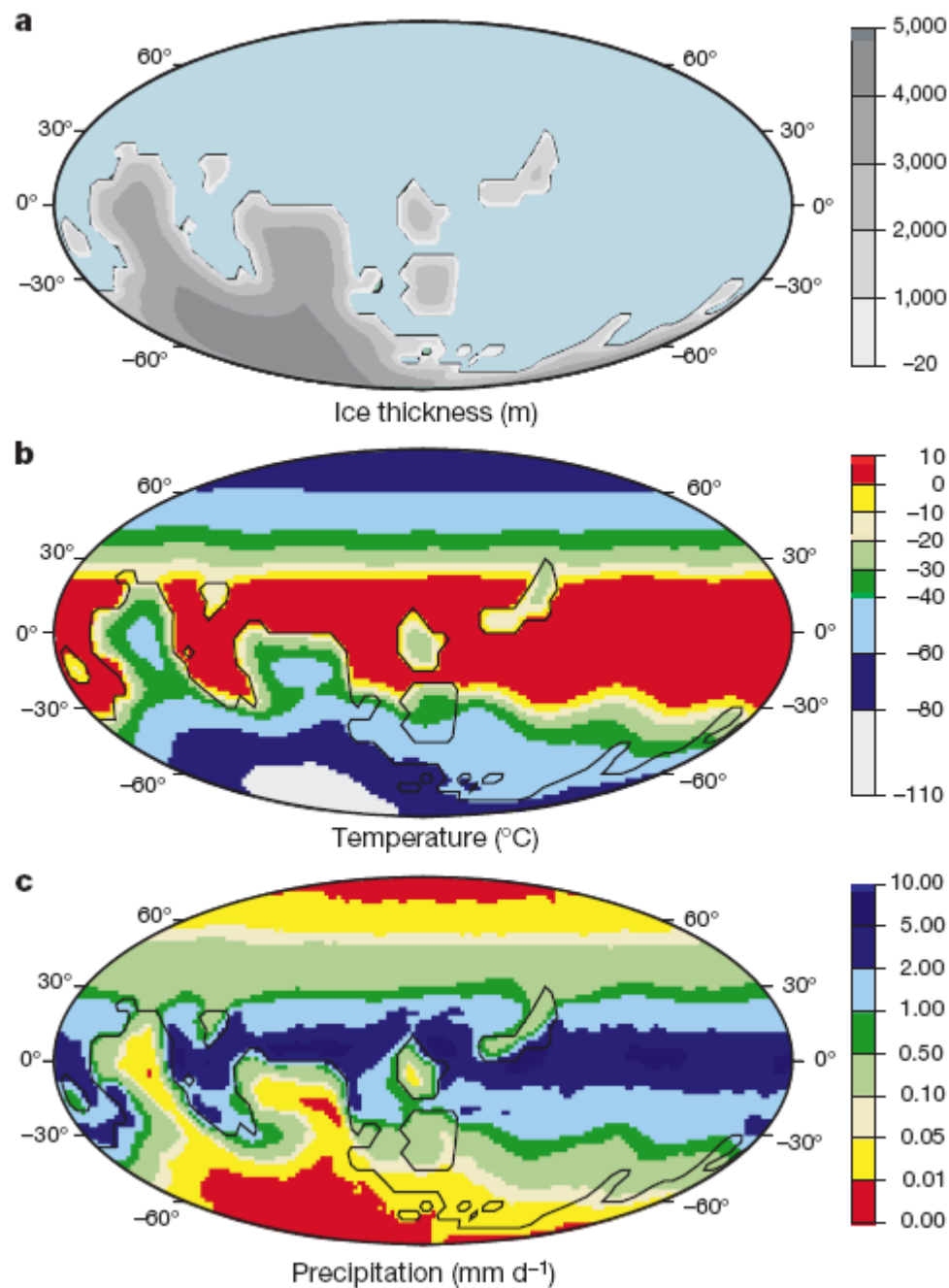
Początek: brak lądów polarnych (?)
(Hoffman et al. 1998) czy niska koncentracja gazów cieplarnianych?

Koniec: olbrzymi efekt cieplarniany



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

Kula śnieżna („snowball”) czy kula breji („slushball”)?

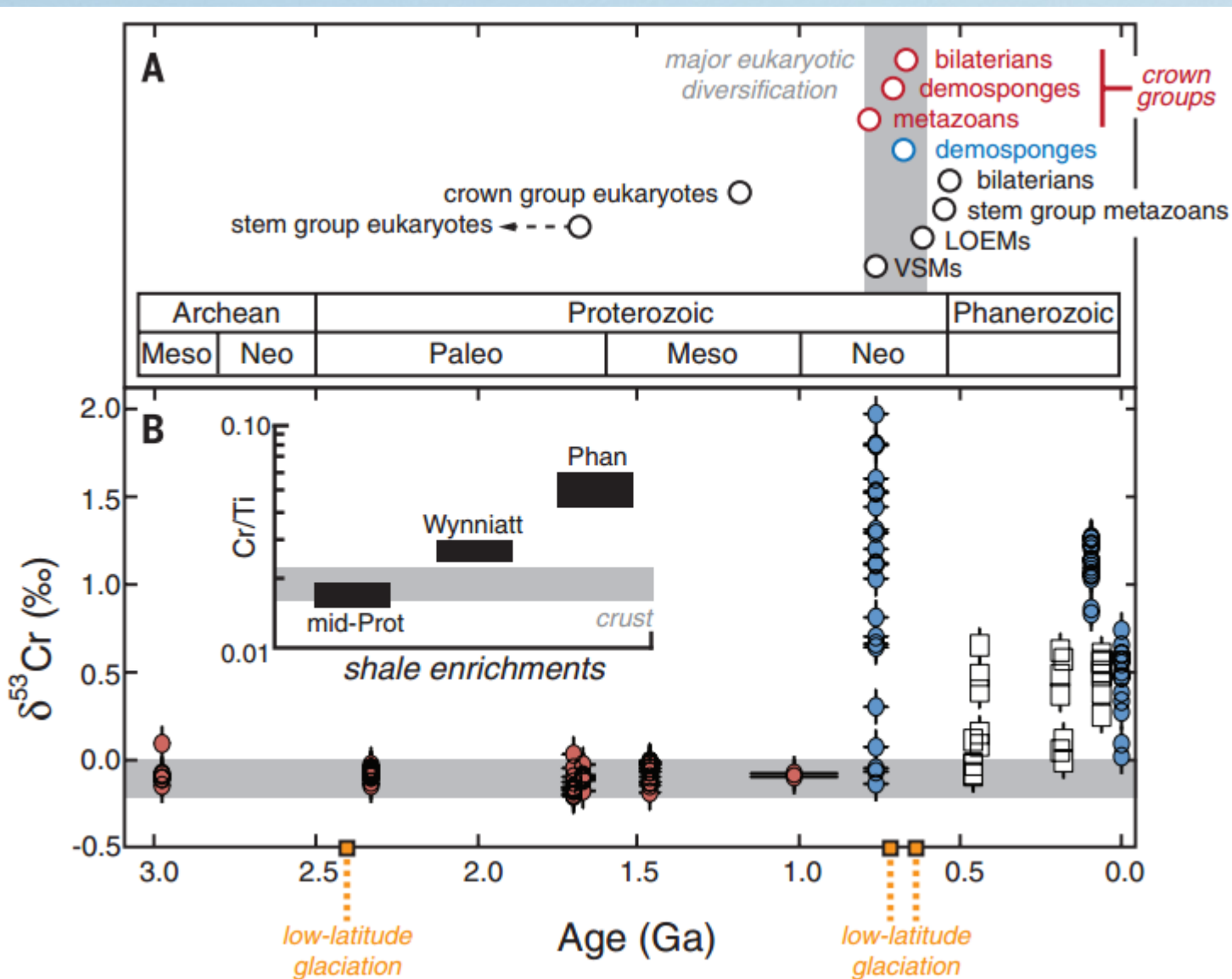


Być może Ziemia nigdy nie zamarzała całkowicie (dzięki czemu życie przetrwało).

Powyżej: ślady zlodowaceń.

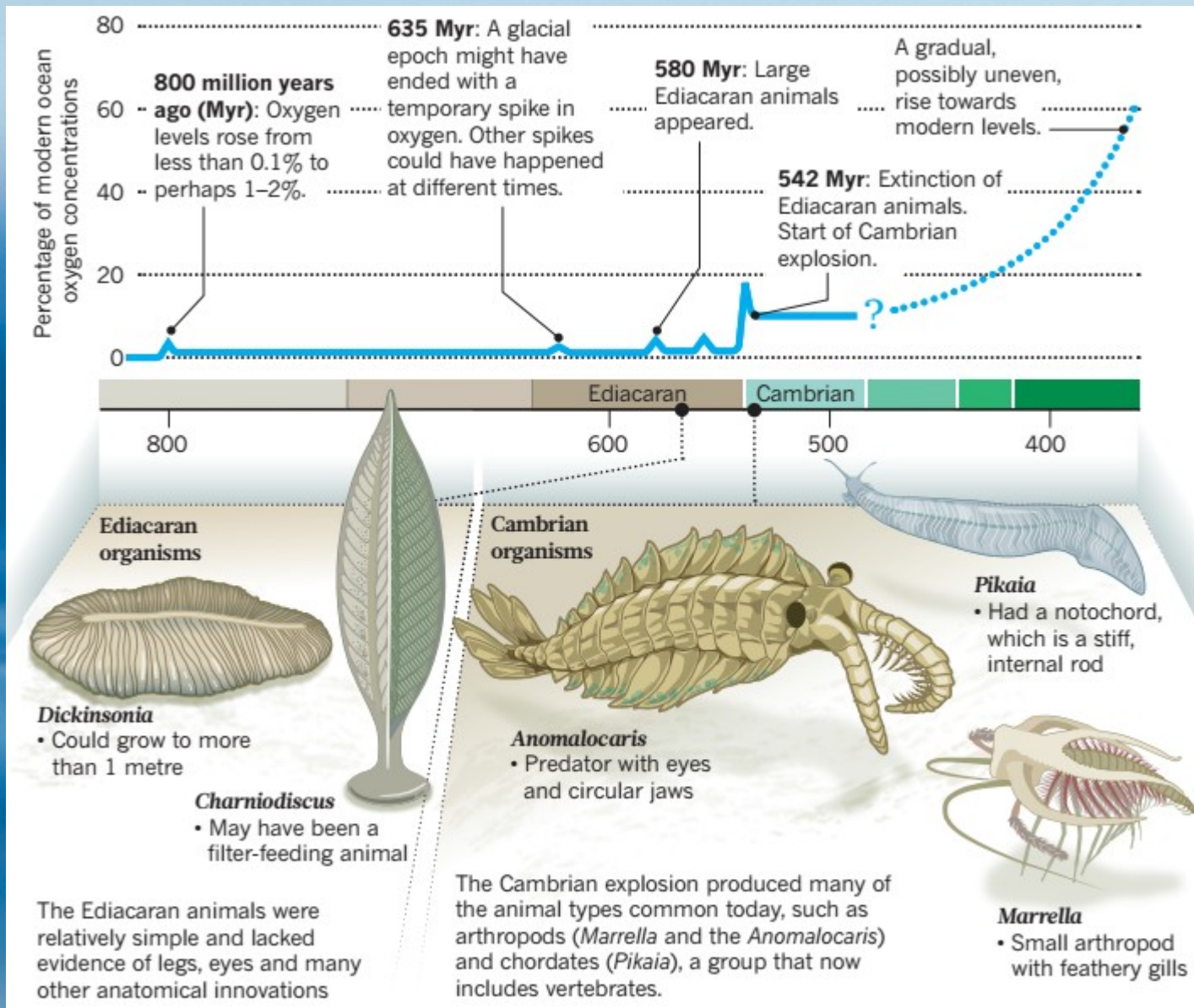
Po lewej: modelowana grubość lądolodu, temperatura i opady.

Tlen i złodowacenia: co jest przyczyną a co skutkiem?



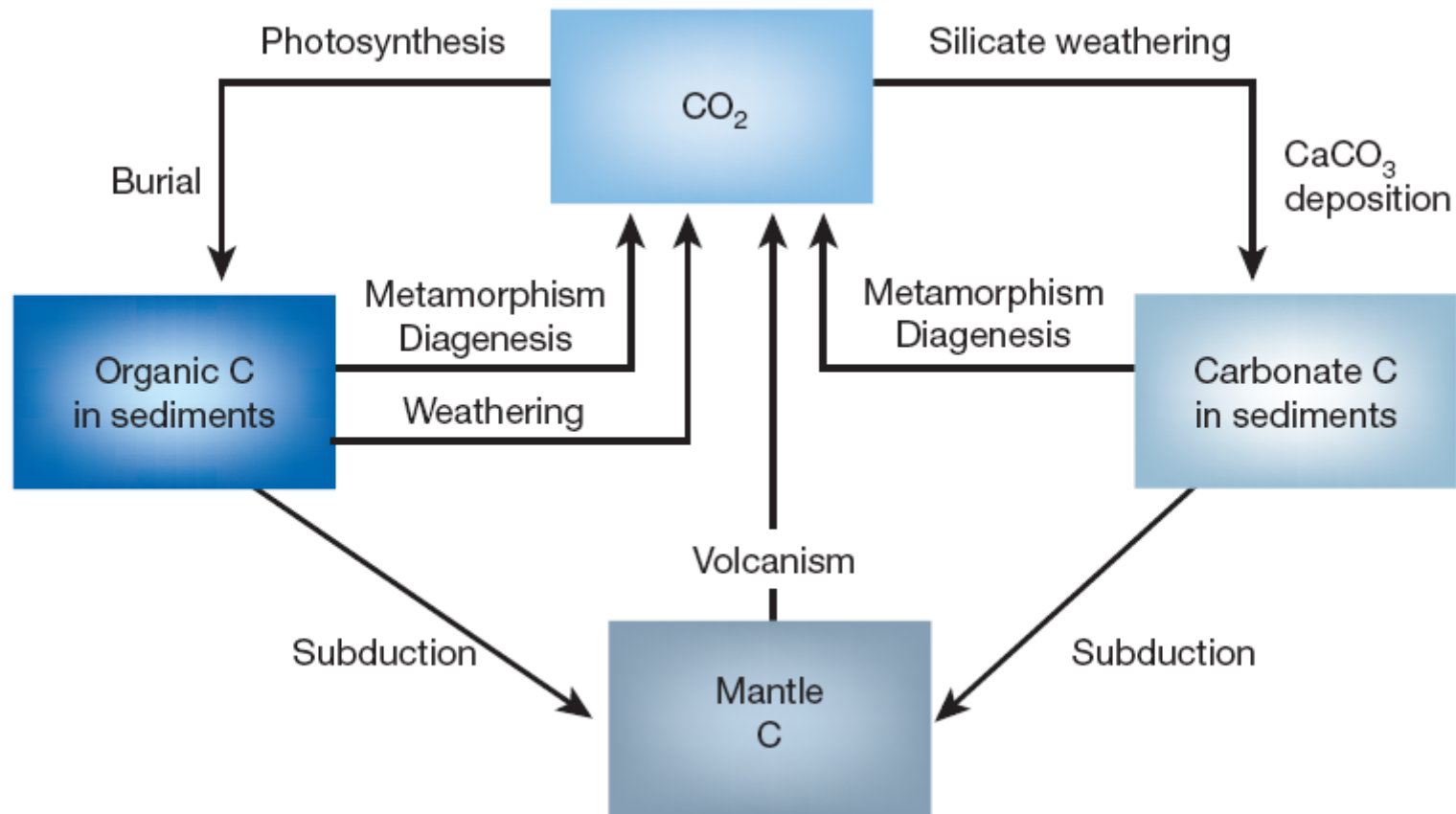
Wydaje się, na podstawie proxy obecności tlenu w atmosferze (stosunku izotopów chromu), że atmosfera wzbogaciła się w tlen tuż przed globalnymi złodowaceniami. Odpowiada to także datom pojawienia się organizmów wielokomórkowych. Czy zatem tlen w atmosferze był przyczyną złodowacenia?

Tlen, zlodowacenia i „eksplozja” kambryjska



Tlen wydaje się zarówno jedną z przyczyn zlodowaceń jak i ich skutkiem (w wyniku intensywnego “zakopywania” węgla) w końcu zlodowacenia. Jednak prawie na pewno był on przyczyną “eksplozji” życia wielokomórkowego.

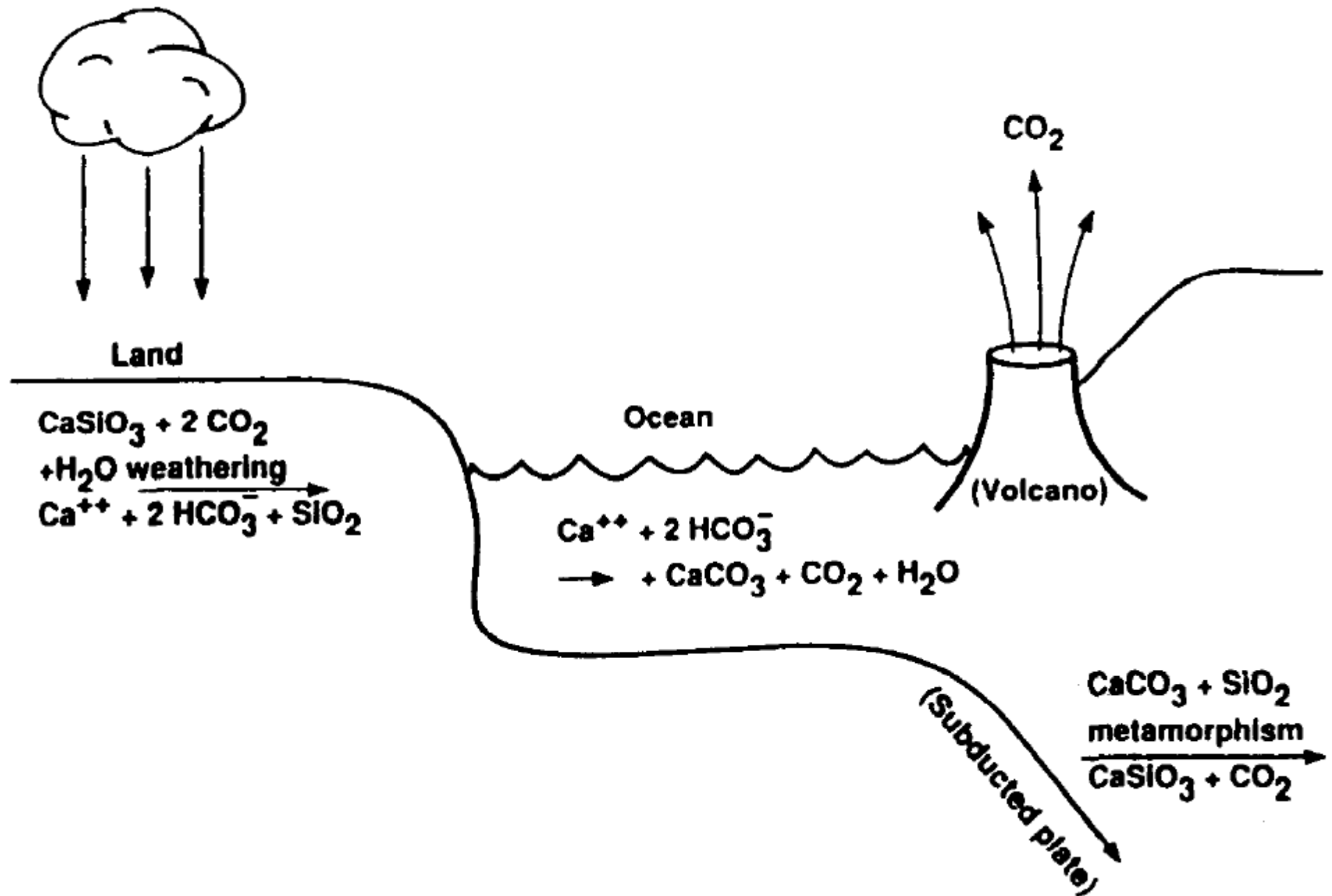
Cykl węgla w przyrodzie w skali geologicznej



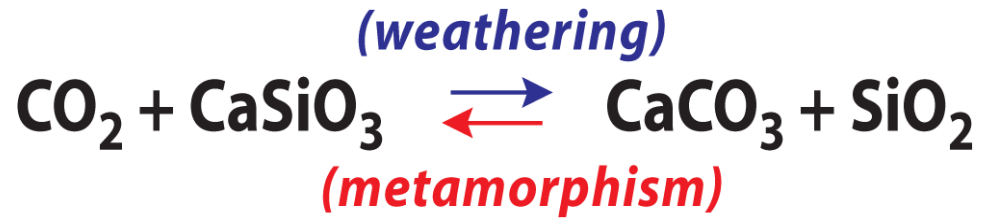
W geologicznej skali czasu na ilość CO_2 w atmosferze ma wpływ wiele procesów. Nie wszystkie jednak są równe...

Berner 2003 (Nature)

W geologicznej skali dominują dwa procesy: wulkanizm i wietrzenie



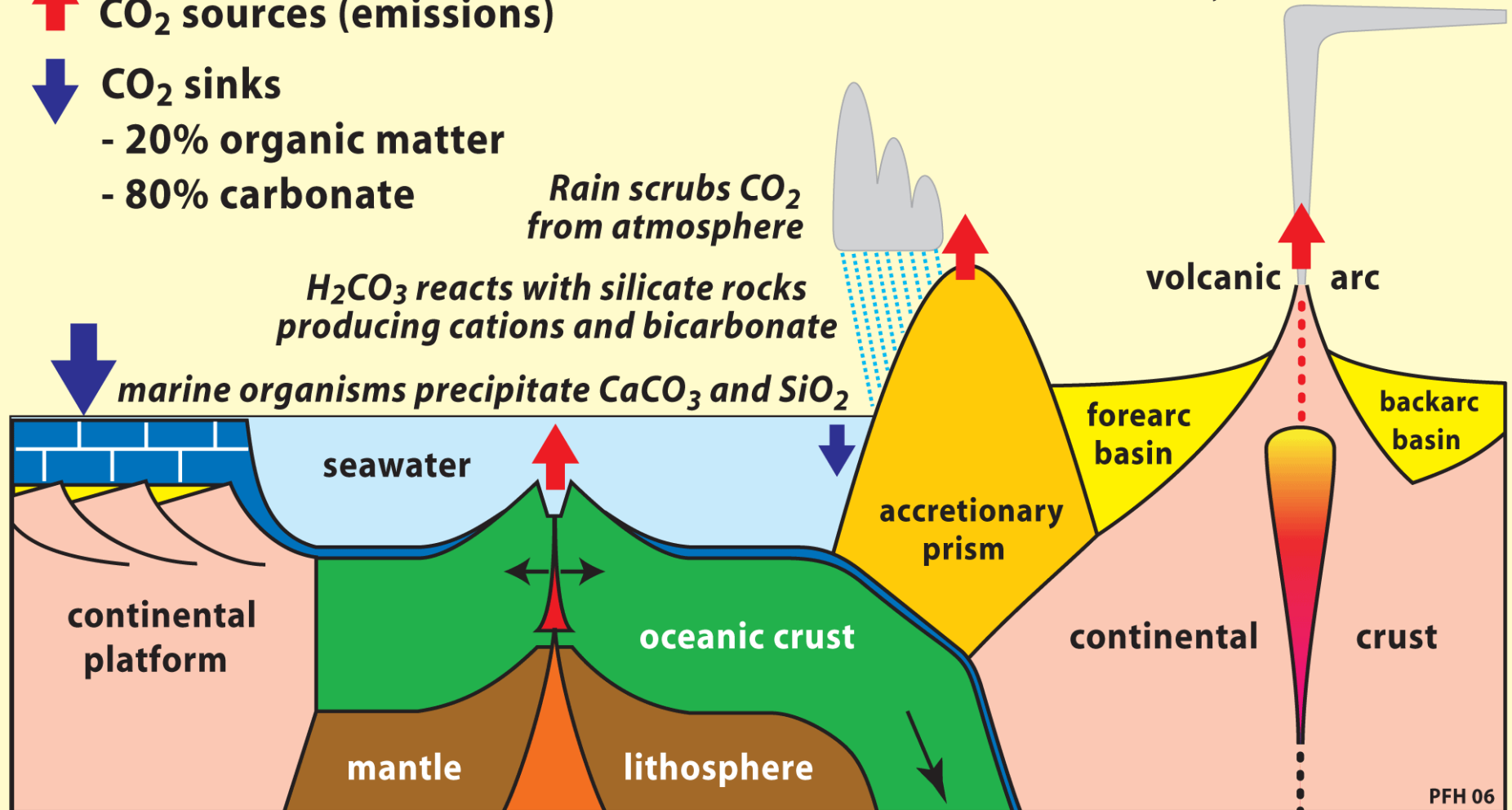
CO₂ emission and consumption are kept in rough balance by a negative feedback resulting from the temperature-dependence of silicate weathering. The feedback operates on a million-year time scale.



Walker et al. (1981) Jour. Geophys. Res., 86, 9776.

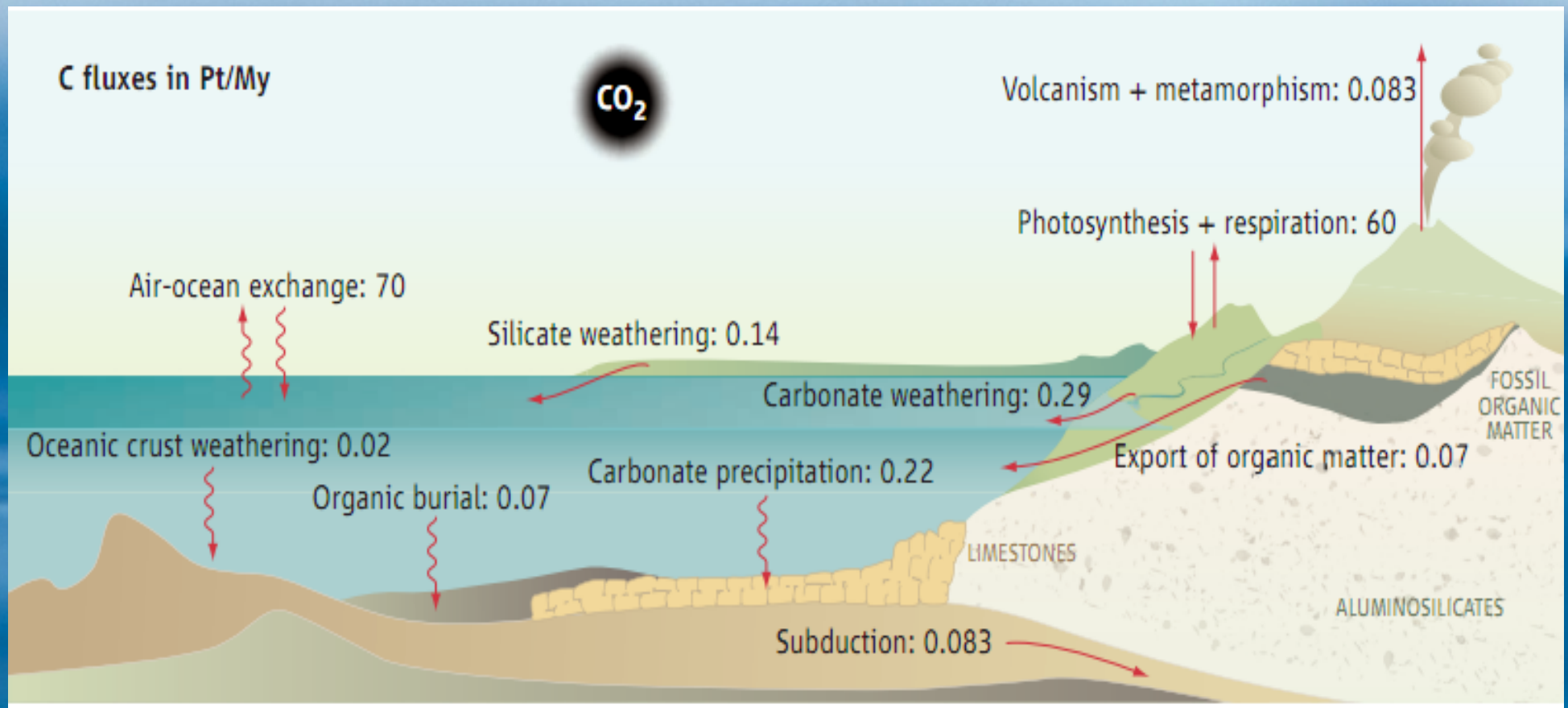
↑ CO₂ sources (emissions)

↓ CO₂ sinks
 - 20% organic matter
 - 80% carbonate

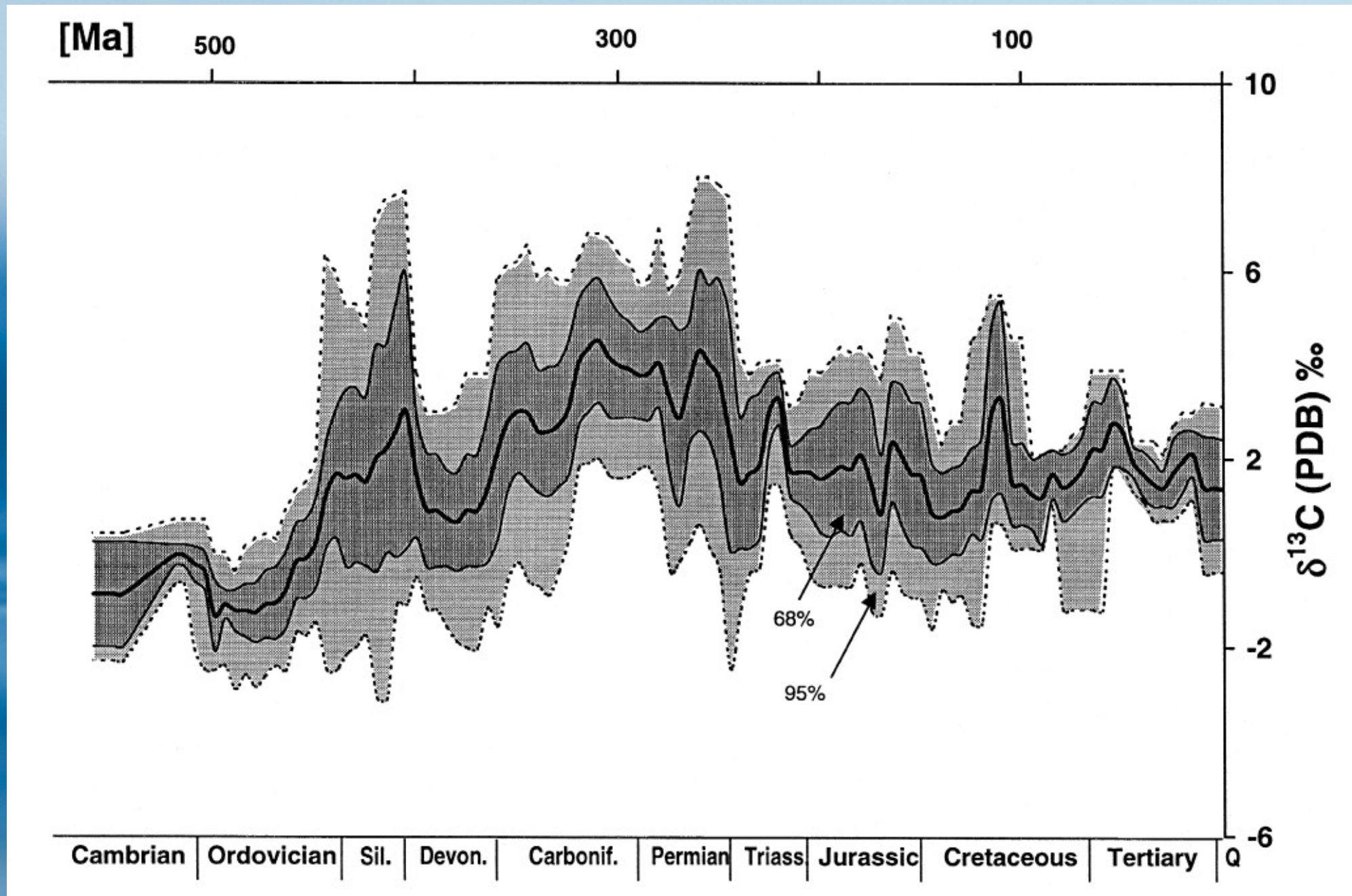


PFH 06

Cykl węgla w geologicznej skali czasu



Strumień węgla zakopywanego w osadach (*carbon burial*)



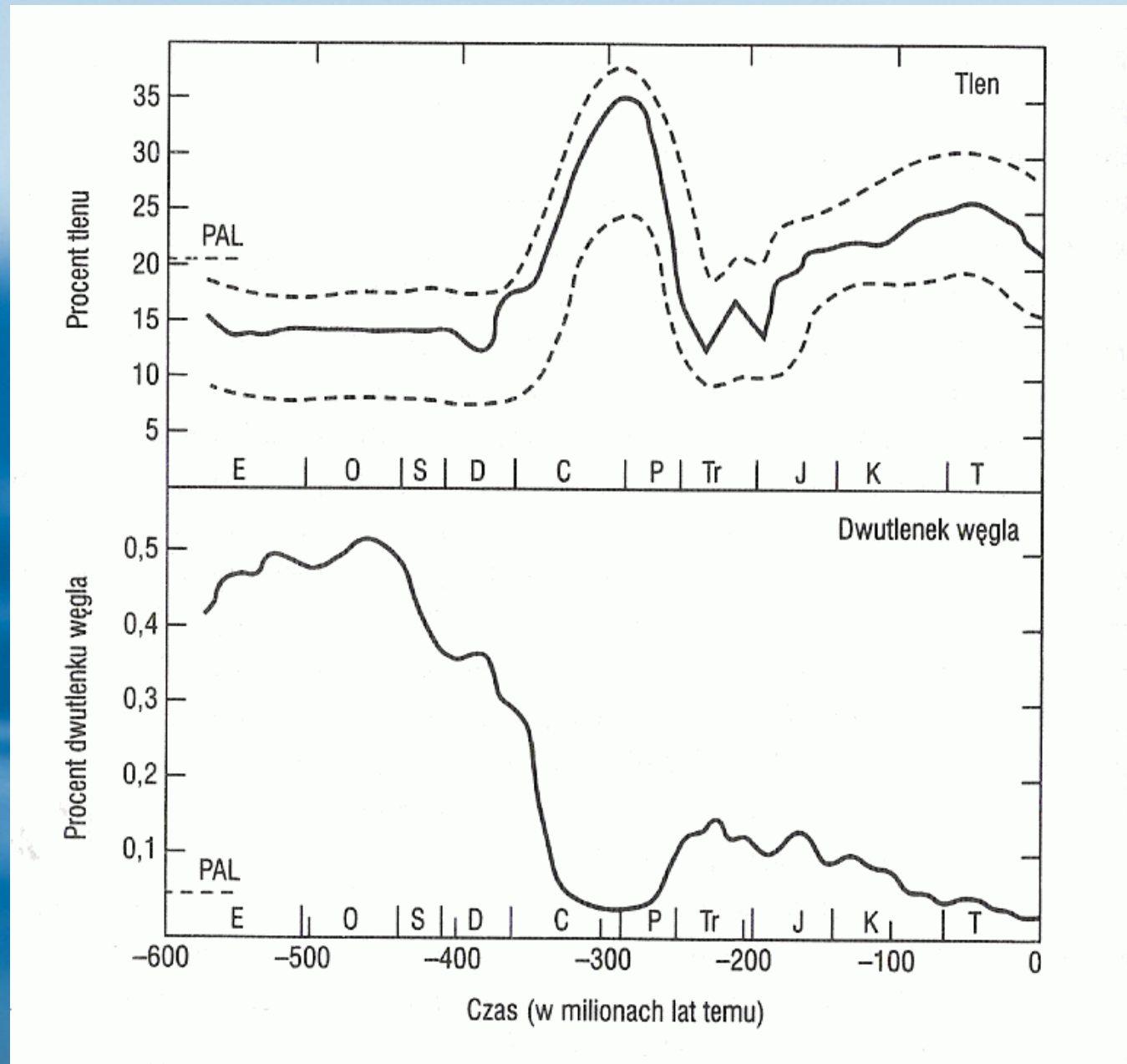
O_2 i CO_2 w fanerozoiku: szersze spojrzenie

Metoda:

Model z zastosowaniem względnej koncentracji C^{13} w osadach, oraz danych o cyklu węgla (wulkanizm, subdukcja, metabolizm, erozja itd.)

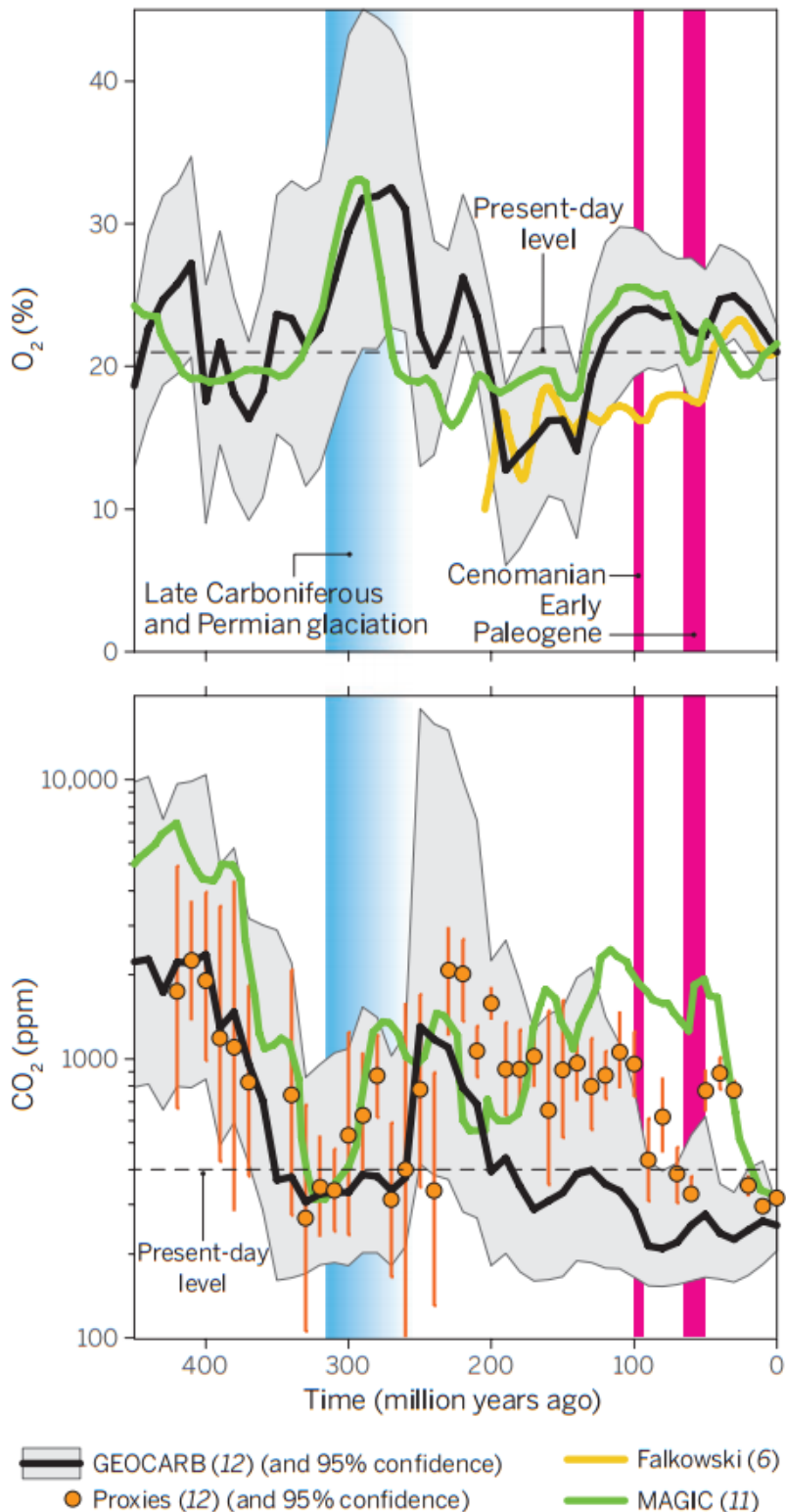
Wnioski:

Koncentracja CO_2 spada stopniowo w skali geologicznej – jednak z dużymi oscylacjami!



Zmiany koncentracji O_2 i CO_2 w fanerozoiku (N. Lane "Tlen" 2005 za Berner & Canfield 1989 oraz Berner 1994)

O_2 i CO_2 w fanerozoiku: najnowsze dane



Wykres przedstawia najnowsze rekonstrukcje stężenia atmosferycznego O_2 (góra) oraz CO_2 (dół).

Złodowacenia w karbonie być może ułatwione były przez... wysokie stężenie tlenu (Poulsen, Tabor & White 2015).

Peppe & Royer 2015 (Science)

Tlen jako gaz “zimniarniany”

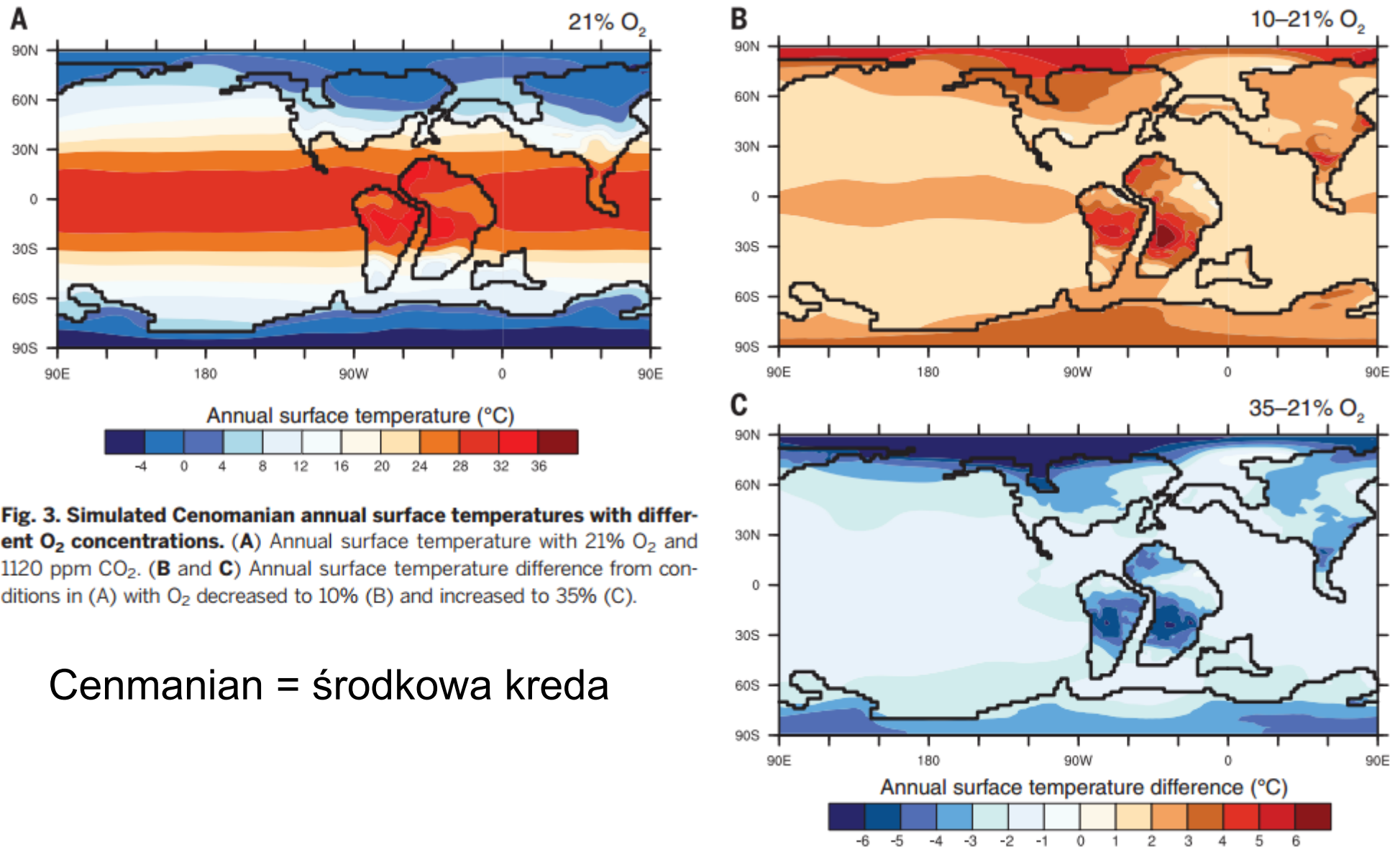


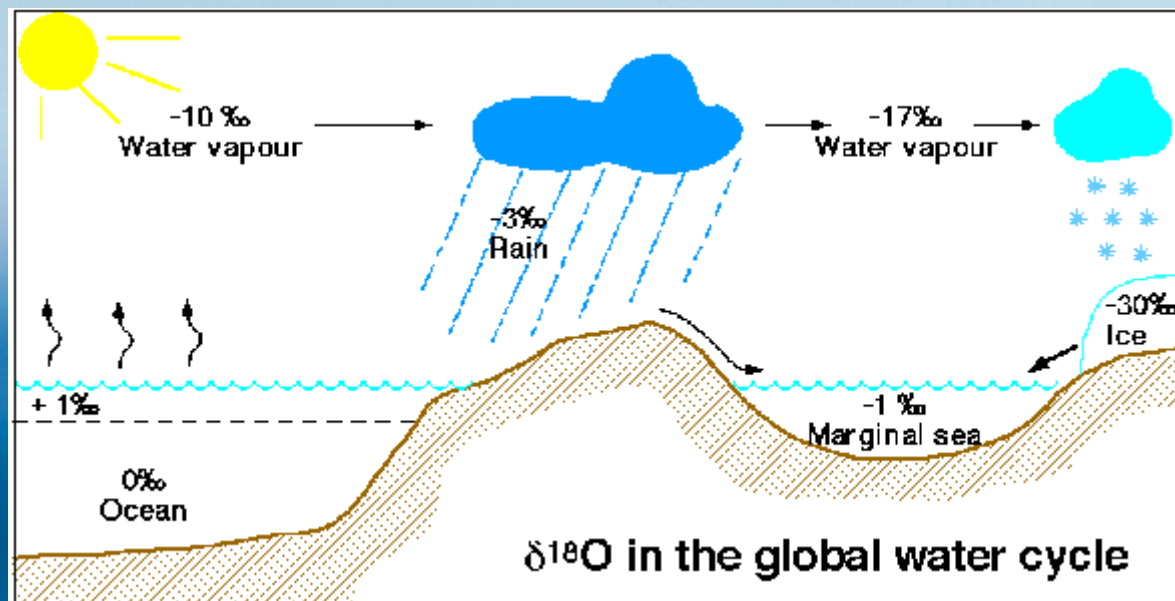
Fig. 3. Simulated Cenomanian annual surface temperatures with different O₂ concentrations. (A) Annual surface temperature with 21% O₂ and 1120 ppm CO₂. (B and C) Annual surface temperature difference from conditions in (A) with O₂ decreased to 10% (B) and increased to 35% (C).

Cenmanian = środkowa kreda

Zwiększone stężenie tlenu w atmosferze oznacza większe rozpraszanie promieniowania słonecznego i w wyniku tego mniejsze nasłonecznienie powierzchni

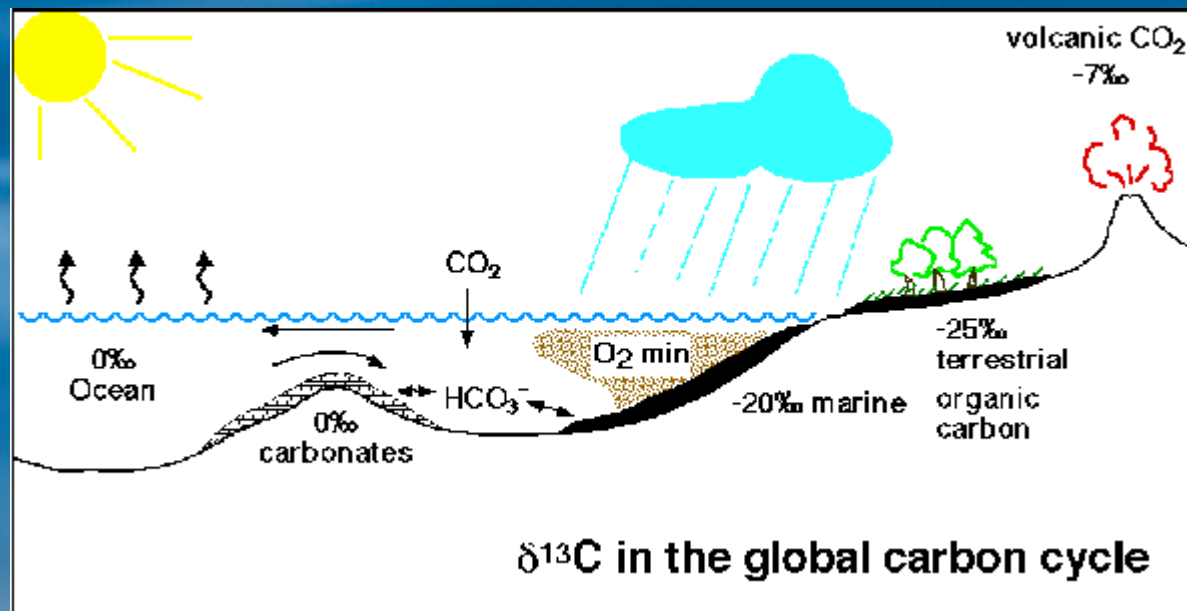
Poulsen, Tabor & White 2015 (Science)

Cykl ciężkich izotopów tlenu i węgla podstawowych narzędzi paleoklimatologii

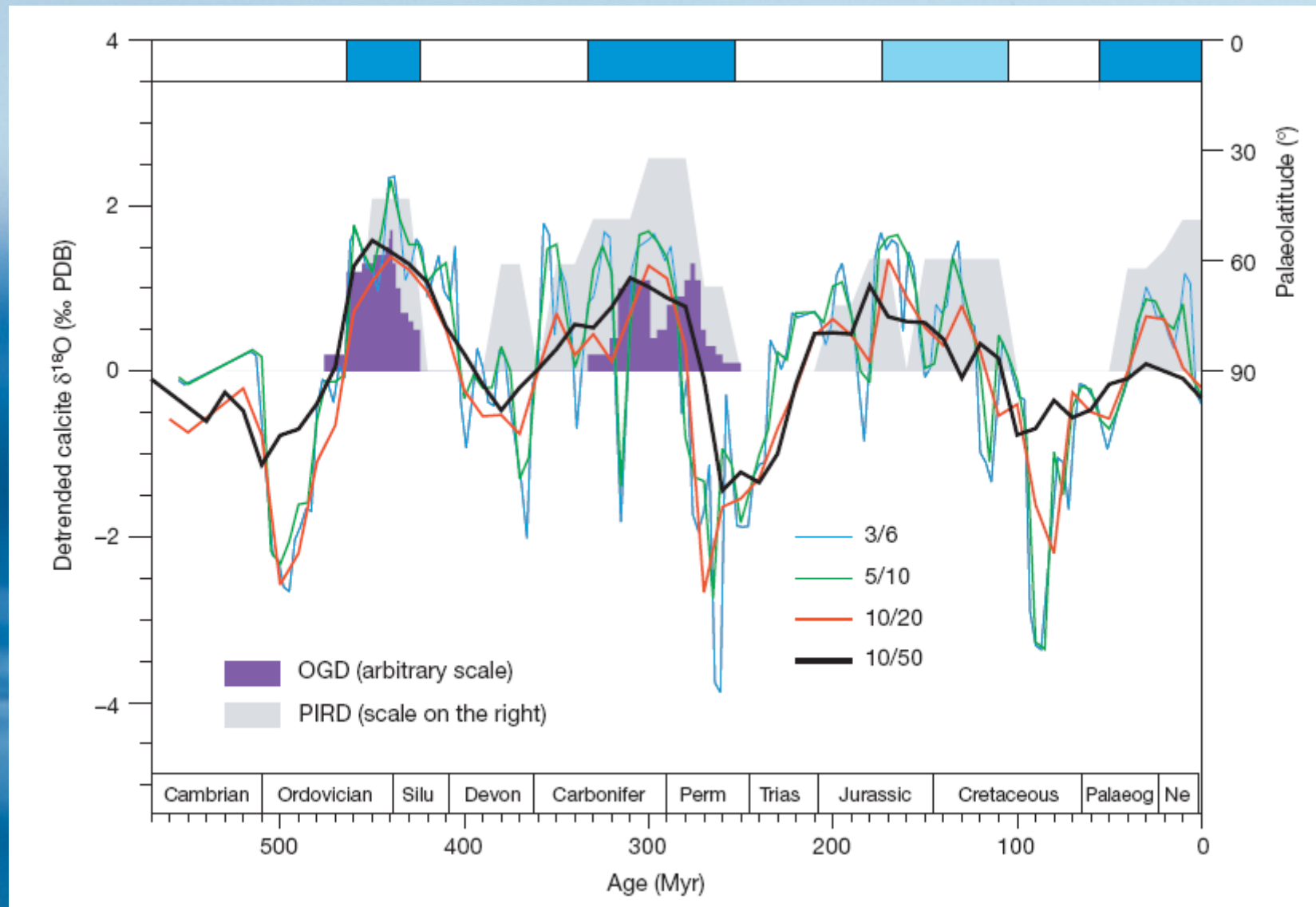


^{16}O - 0,99757(16)
 ^{18}O - 0,00205(14)

^{12}C - 0,9893(8)
 ^{13}C - 0,0107(8)

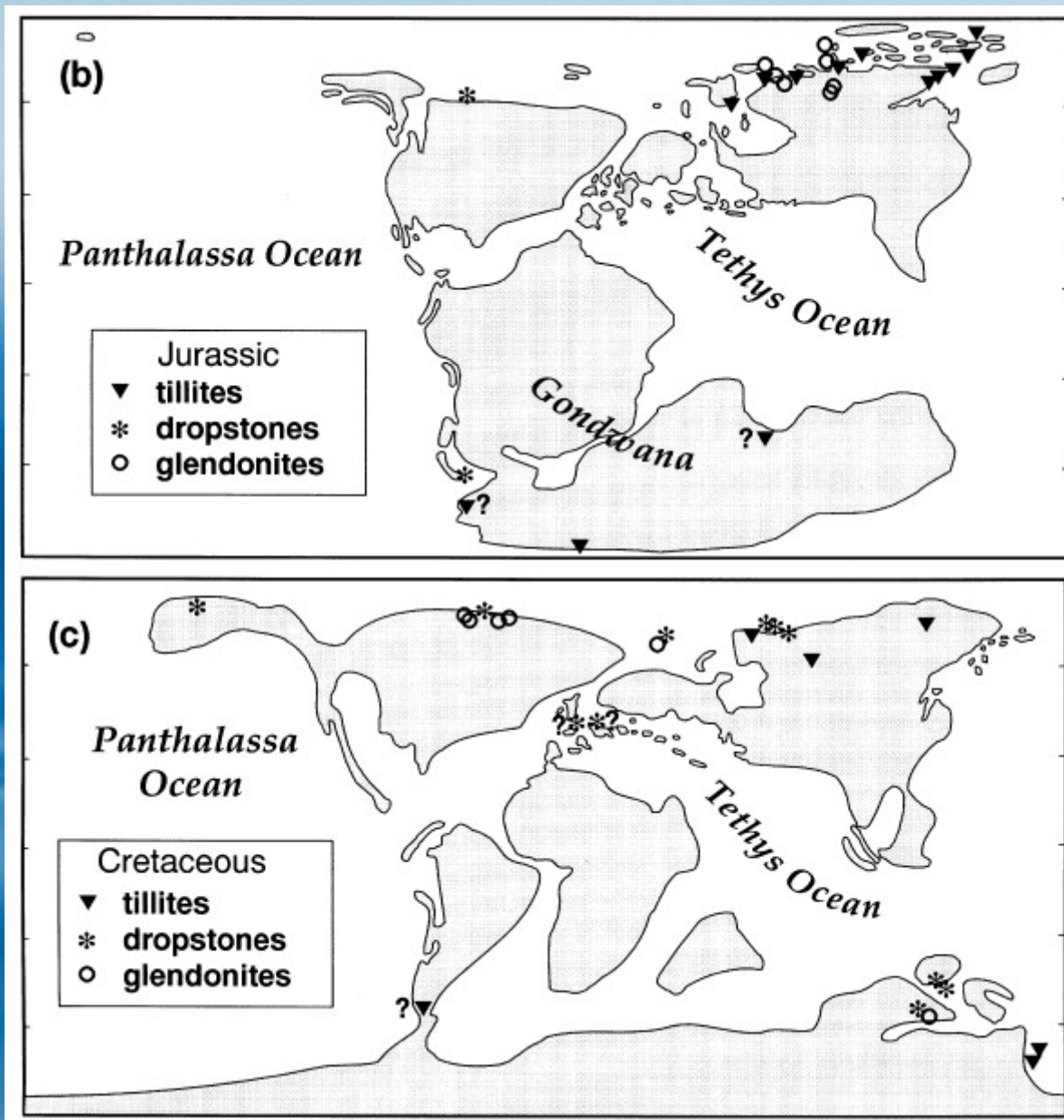


Izotopy tlenu a zlodowacenia w fanerozoiku



Dane wskazują na zmiany klimatu w cyklu ok. 140 Ma.
Co je powoduje?

Czy w mezozoiku były zlodowacenia?

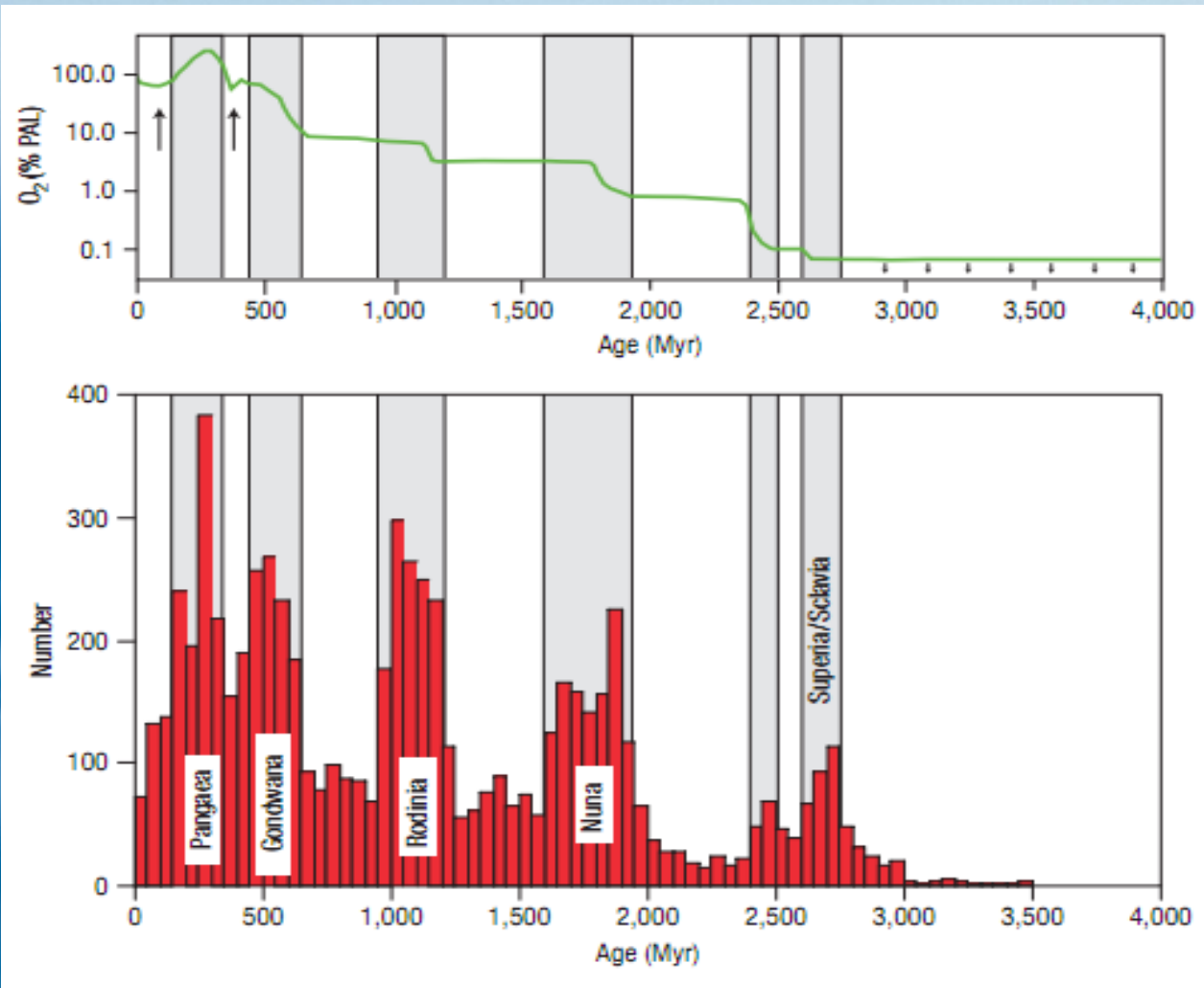


Ślady działania lodu z okresu jury i kredy.

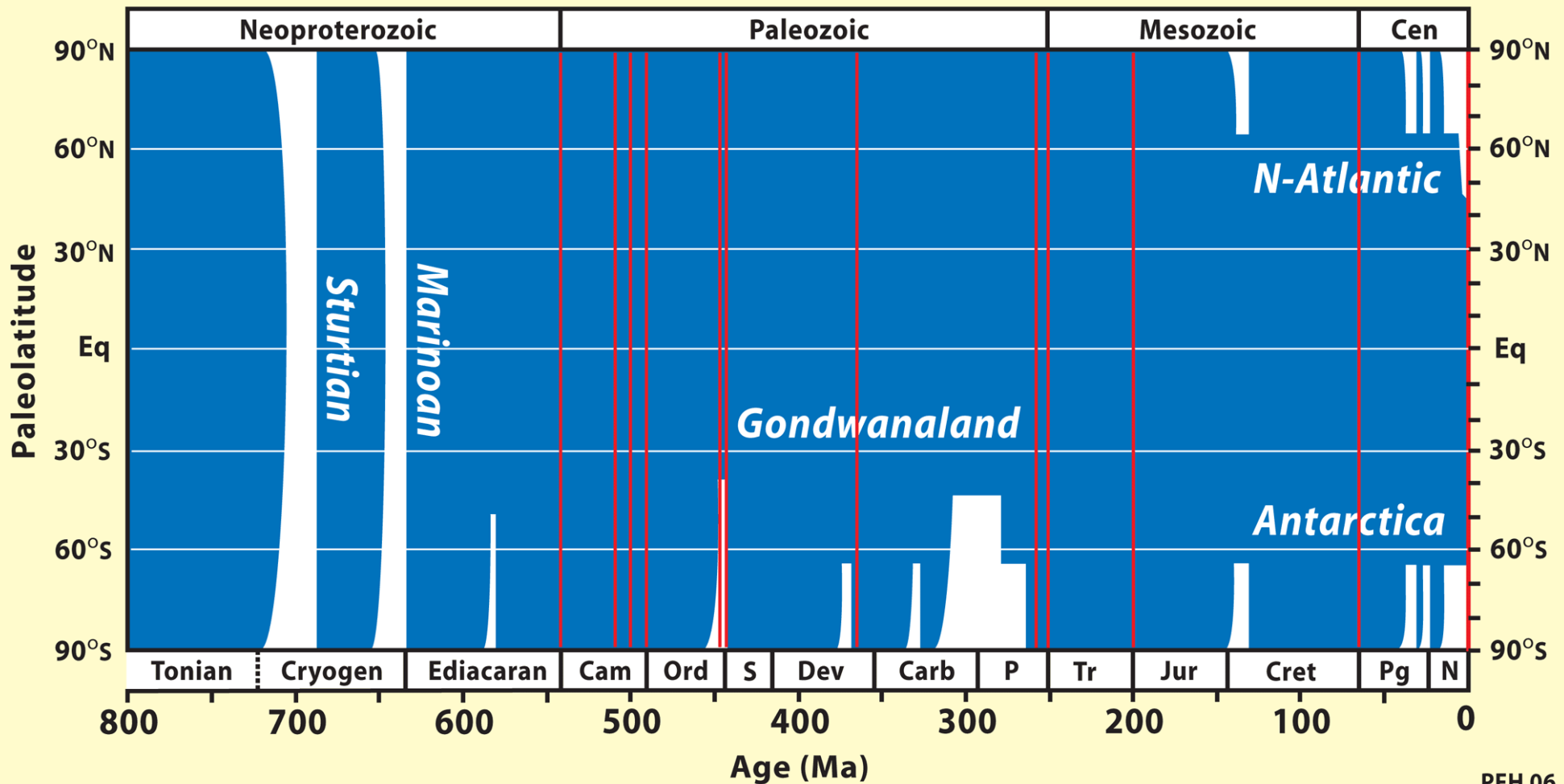
Werdykt: w pobliżu granicy jury i kredy istniał lód morski i prawdopodobnie lodowce polarne w górach, nie było jednak dużych zlodowaceń kontynentalnych.

Cykl kontynentów a historia tlenu...

Wydaje się, że jest wyraźna zależność między przybywaniem tlenu w atmosferze a cyklem kontynentów (tu reprezentowanym przez wiek ziaren cyrkonu). A że przybywanie tlenu oznacza zwiększone “zakopywanie” węgla w osadach, musi to być także związane z ubywaniem CO₂, a stąd pewnie związek cyklu kontynentów ze zlodowaceniami.

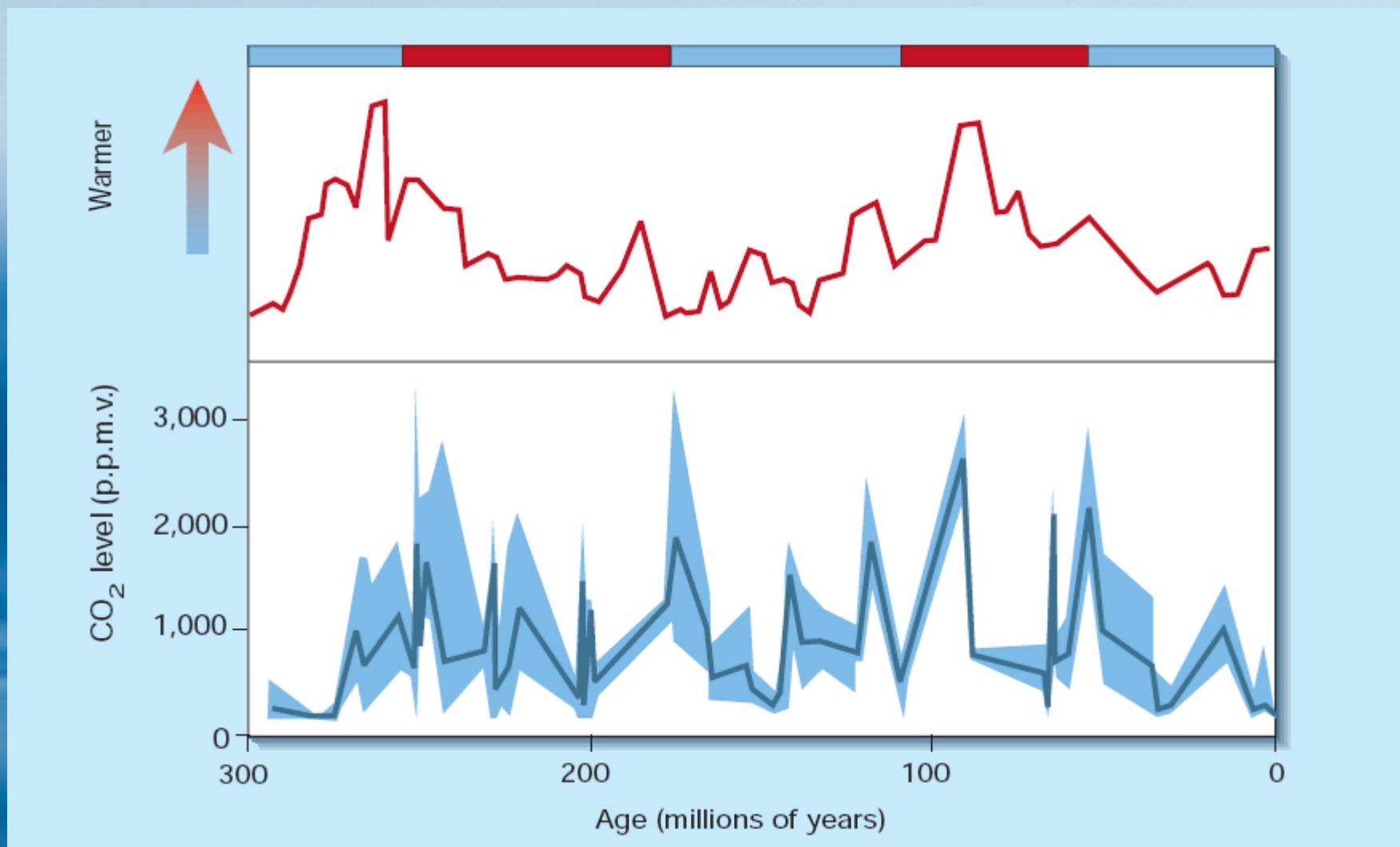


Paleogeographic extent of continental ice sheets and permanent sea ice over the last 800 Myr (red lines indicate major mass extinctions)



PFH 06

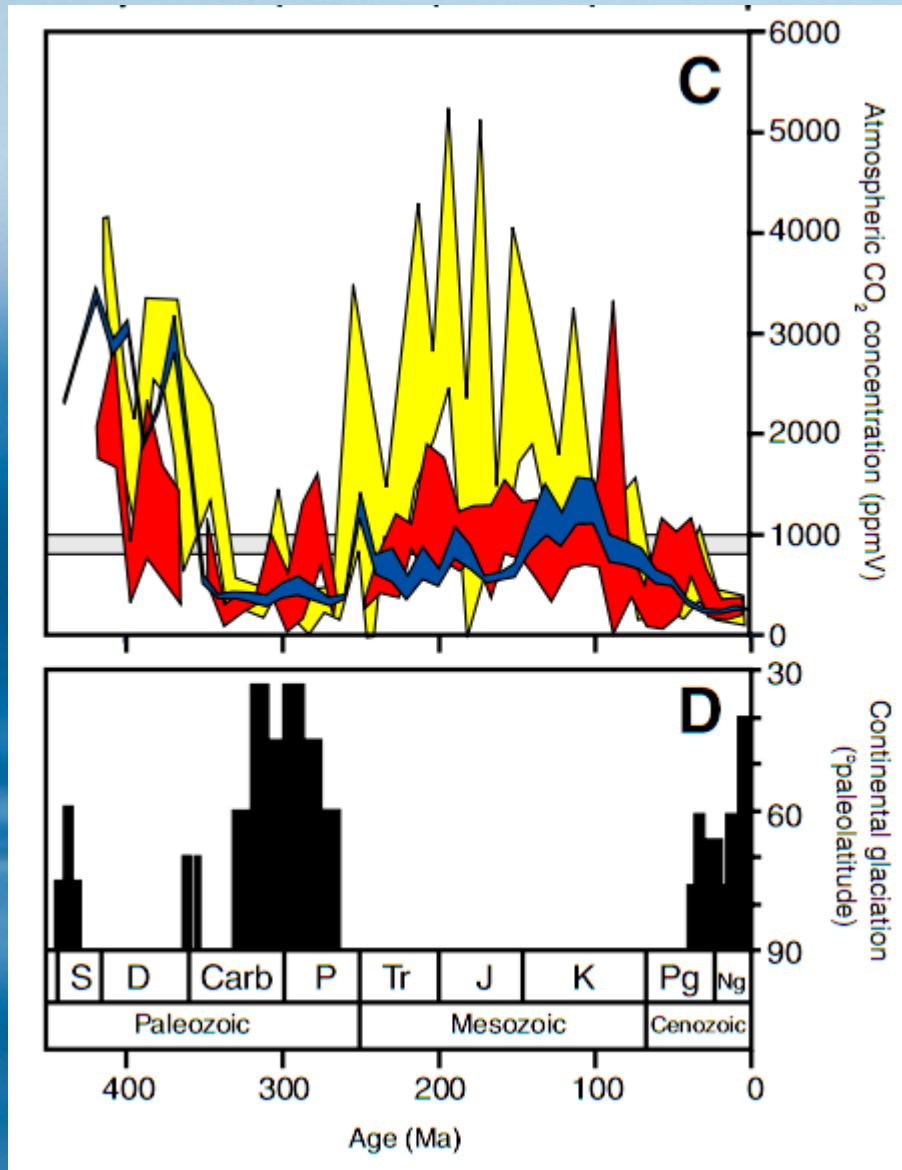
Czy naprawdę znamy dawne wartości CO₂?



Temperatura (izotopy tlenu) i CO₂ (ilość porów w kopalnych liściach):
czy znamy te wartości z dostateczną rozdzielczością czasową aby
zauważyć okresy ekstremów klimatycznych?

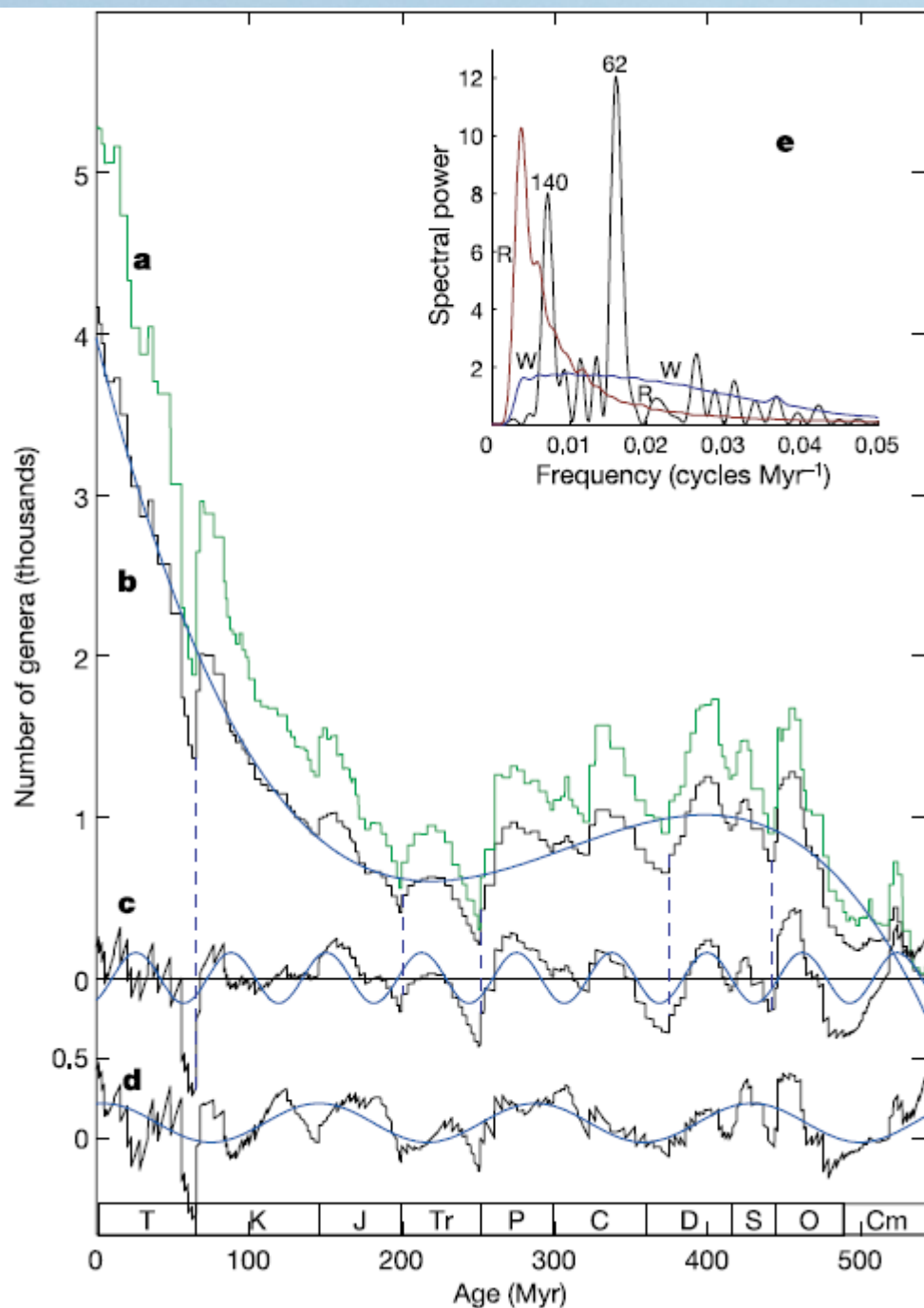
Kurschner 2001 (Nature)

Ale robimy postępy...



Dotychczasowe wyniki niektórych ocean dawnych koncentracji CO₂, szczególnie z gleb kopalnych (paleozoli) (**żółte**) nie zgadzały się z wynikami modeli geochemicznych opisujących cykl węgla (**niebieskie**). Niedawno stwierdzono, że badania paleozoli zawyżały wartości CO₂ co najmniej dwa razy. Skorygowana rekonstrukcja (**czerwone**) zgadza się znacznie lepiej z modelem. Na dole okresy zlodowaceń, praktycznie zawsze w okresie niskich koncentracji CO₂.

Historia bioróżnorodności



Ilość rodzin zwierząt morskich.

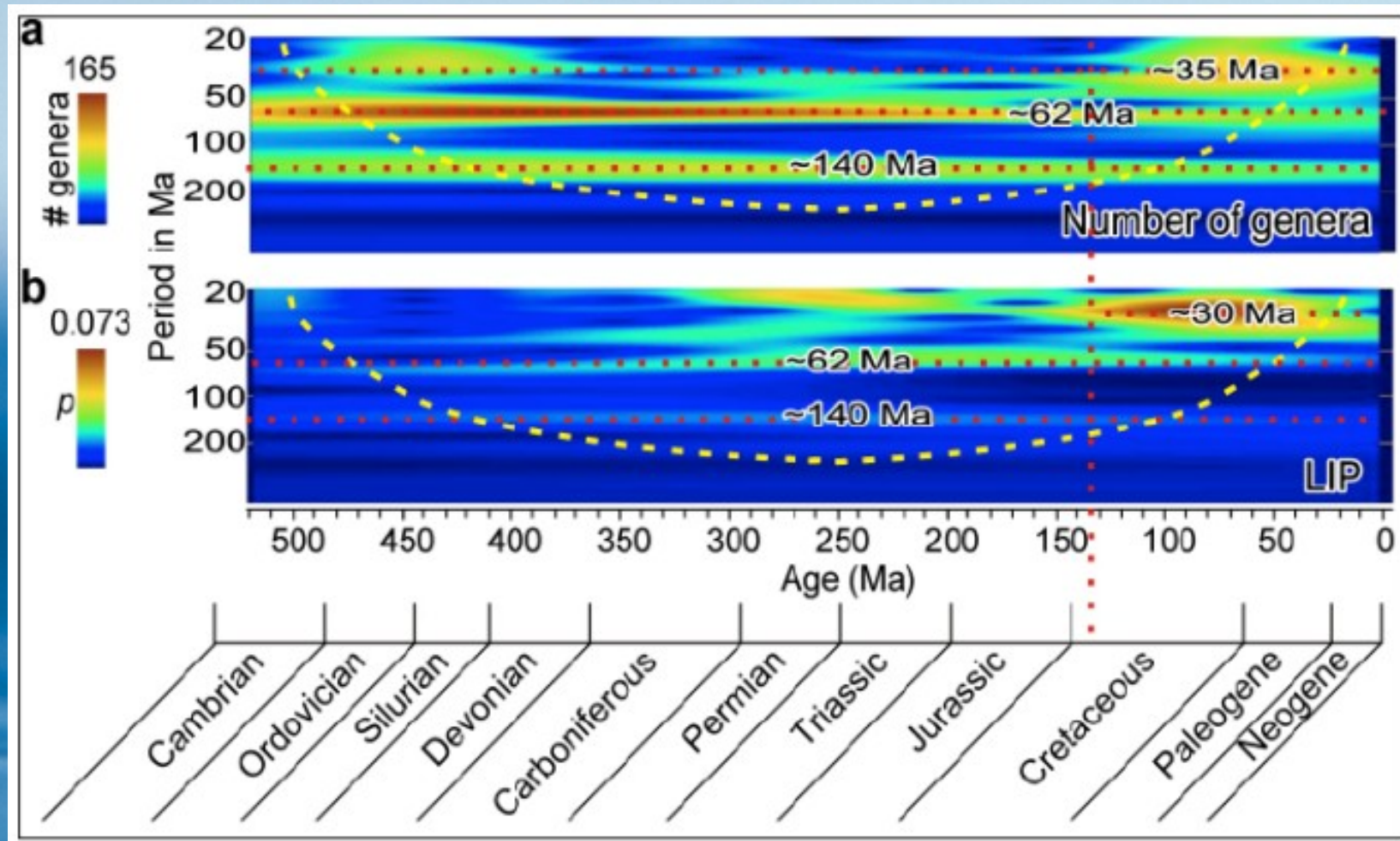
Wydaje się, że istnieją cykle bioróżnorodności o długości 62 Ma i 140 Ma.

Pierwszy z nich (62 Ma) dziwnie przypomina długością kilku z okresów geologicznych (artefakt czy wspólna przyczyna?)

Drugi (140 Ma) odpowiada postulowanemu cyklowi superkontynentów.

Rohde & Muller 2005 (Nature)

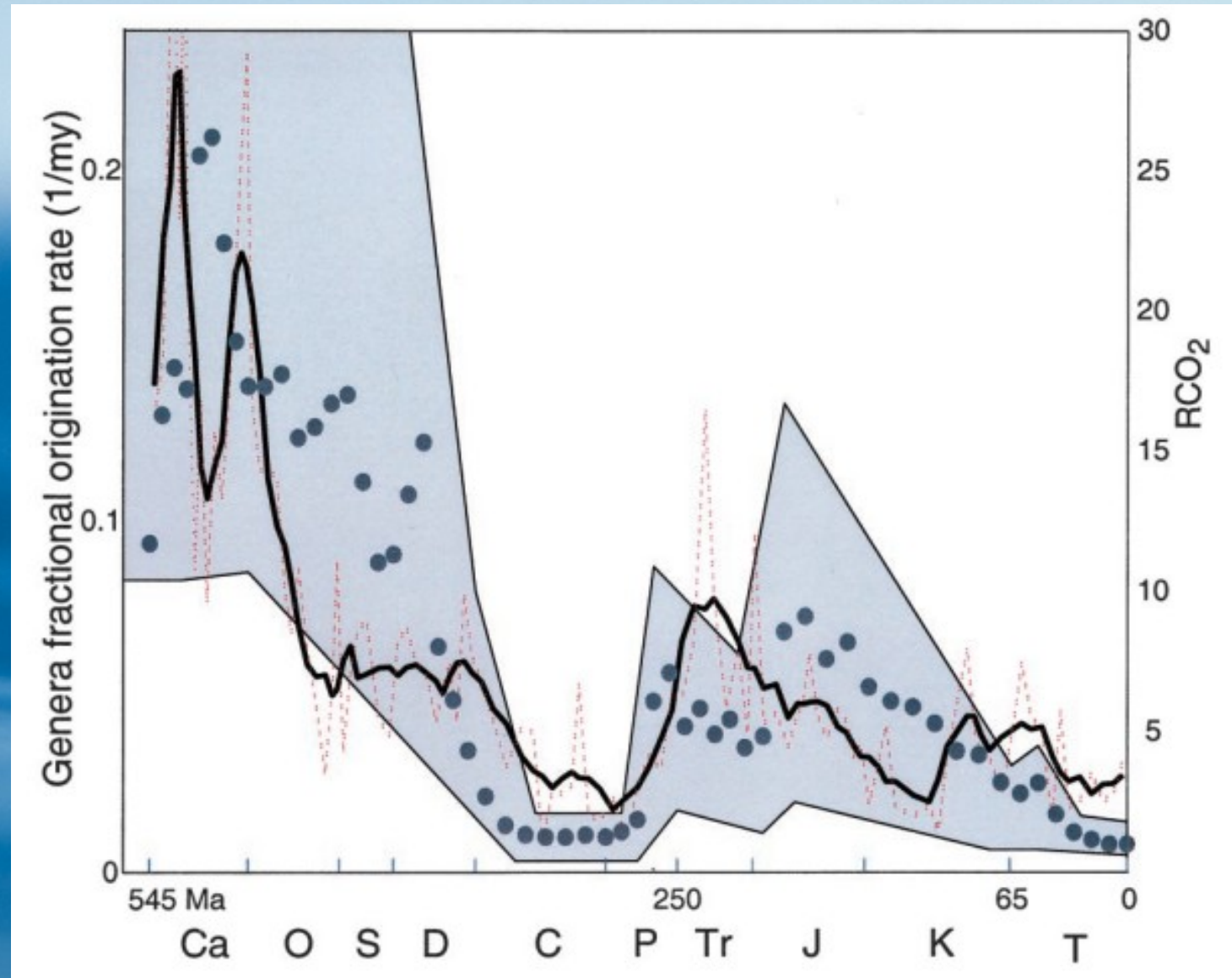
Bioróżnorodność a wylewy magmy



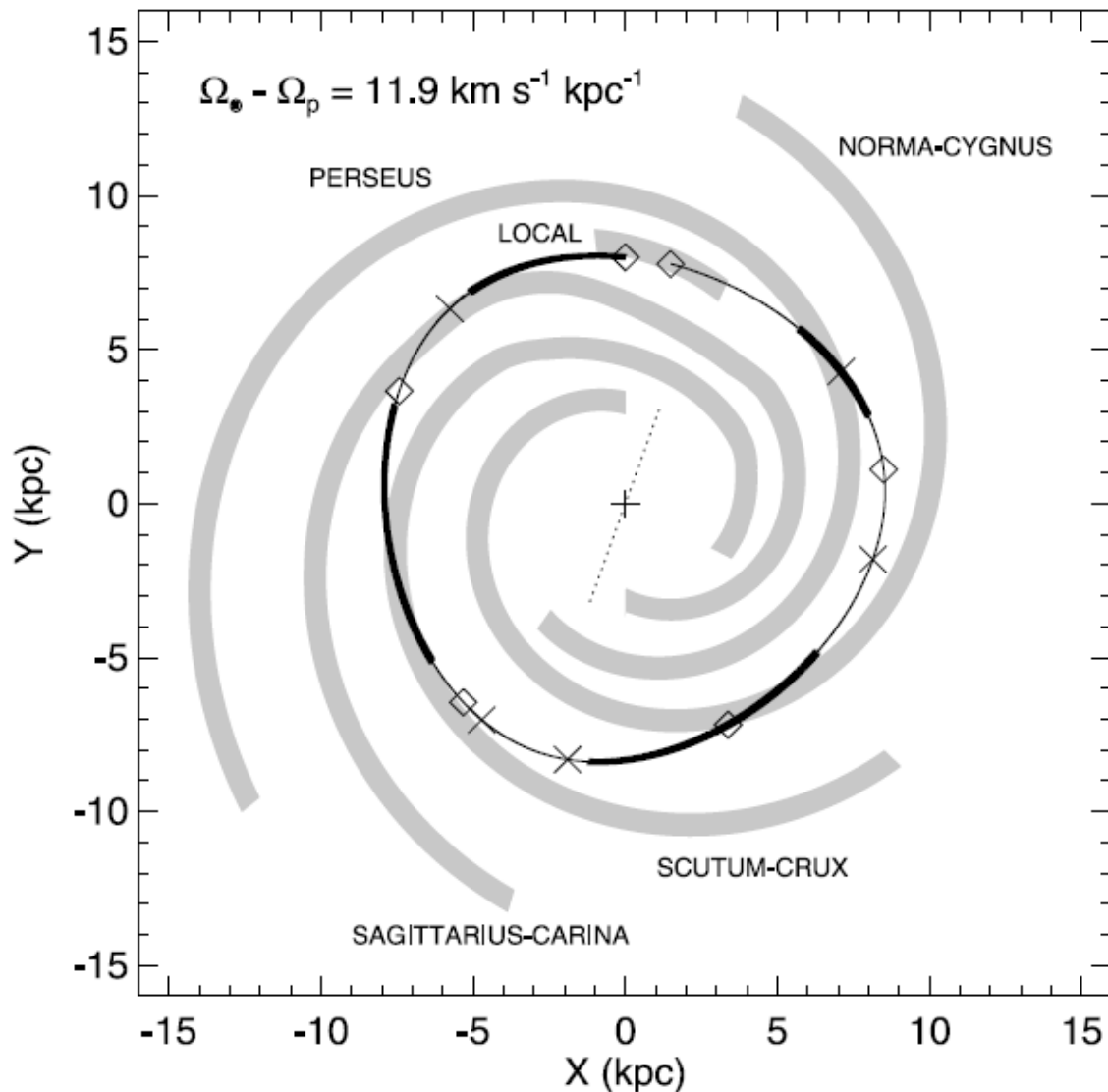
Analiza częstotliwości (metoda *wavelets*) czasu powstania rodzin organizmów morskich (Rohde & Muller 2005) (na górze) i datowań dużych prowincji magmatycznych (na dole) wskazuje na istnienie w obu cykli 140 i 62 mln lat. Koincydencja?

Bioróżnorodność skorelowana z CO_2 ?

Ilość nowo powstających rodzin organizmów morskich (czerwona przerywana linia i uśredniona czarna) porównana z rekonstrukcjami CO_2 (niebieskie kropki i zakres niepewności) w jednostkach “niedawnych koncentracji”.



Wpływ kształtu Galaktyki na klimat?



Shaviv i Veizer (2003) zaproponowali przejścia Układu Słonecznego przez kolejne ramiona Galaktyki jako wyjaśnienie cyklu 140 Ma.

Mimo wielu wątpliwości (geometria Galaktyki jest nadal słabo znana) jest to jedyny znany proces o odpowiedniej długości.

Co nie znaczy, że ma jakiegokolwiek znaczenie dla klimatu Ziemi...

Proponowana rekonstrukcja drogi Słońca przez Galaktykę (uwaga: parametry dobrane „pod wynik”)

Gies & Helsel 2005 (Astrophysical Journal)

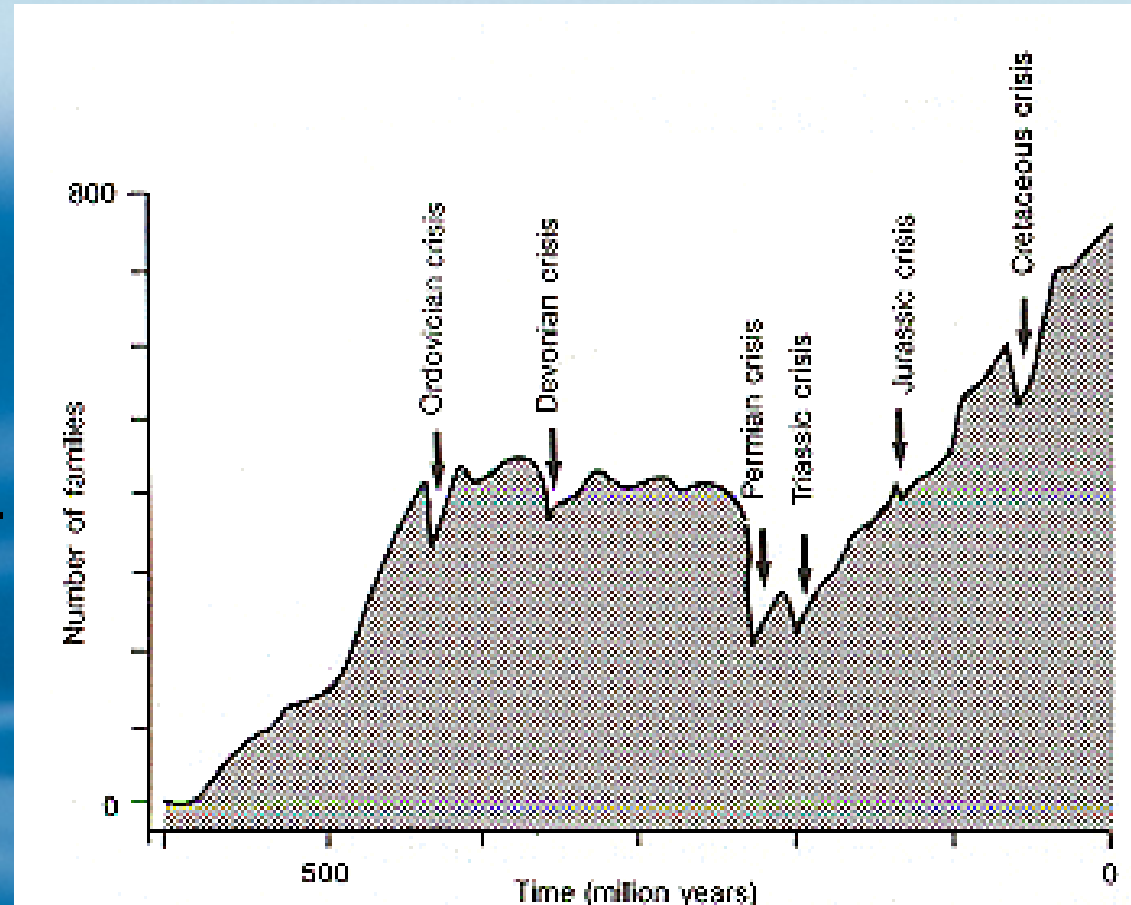
Wielkie wymierania

Znamy 6 wielkich wymierań

Przyczyny większości (w tym największego permskiego) nie są jeszcze w pełni znane (choć najbardziej prawdopodobne to wulkanizm).

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

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



Liczba rodzin fauny morskiej (za Sepkoski 1984)

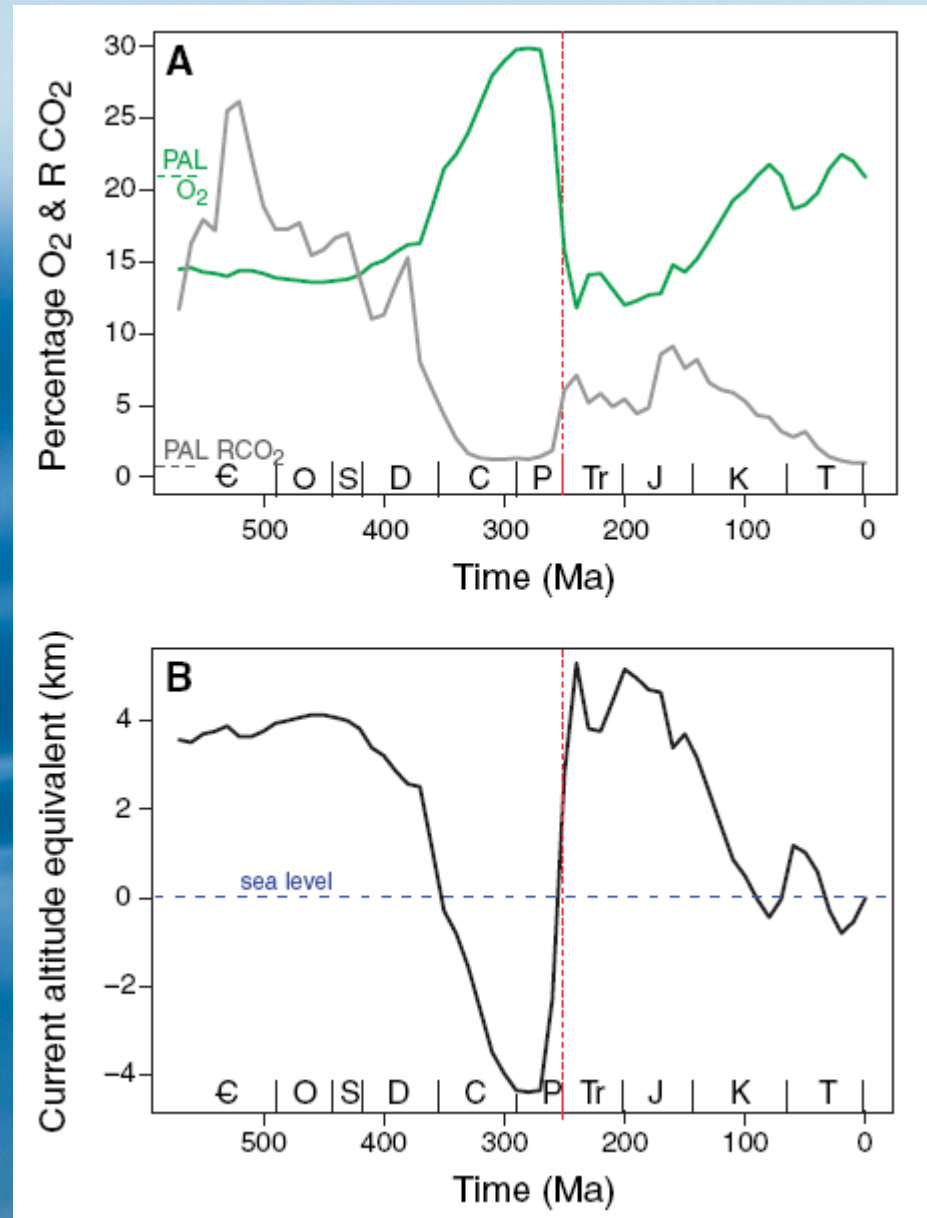
Matka wszystkich wymierań

Największe wymieranie

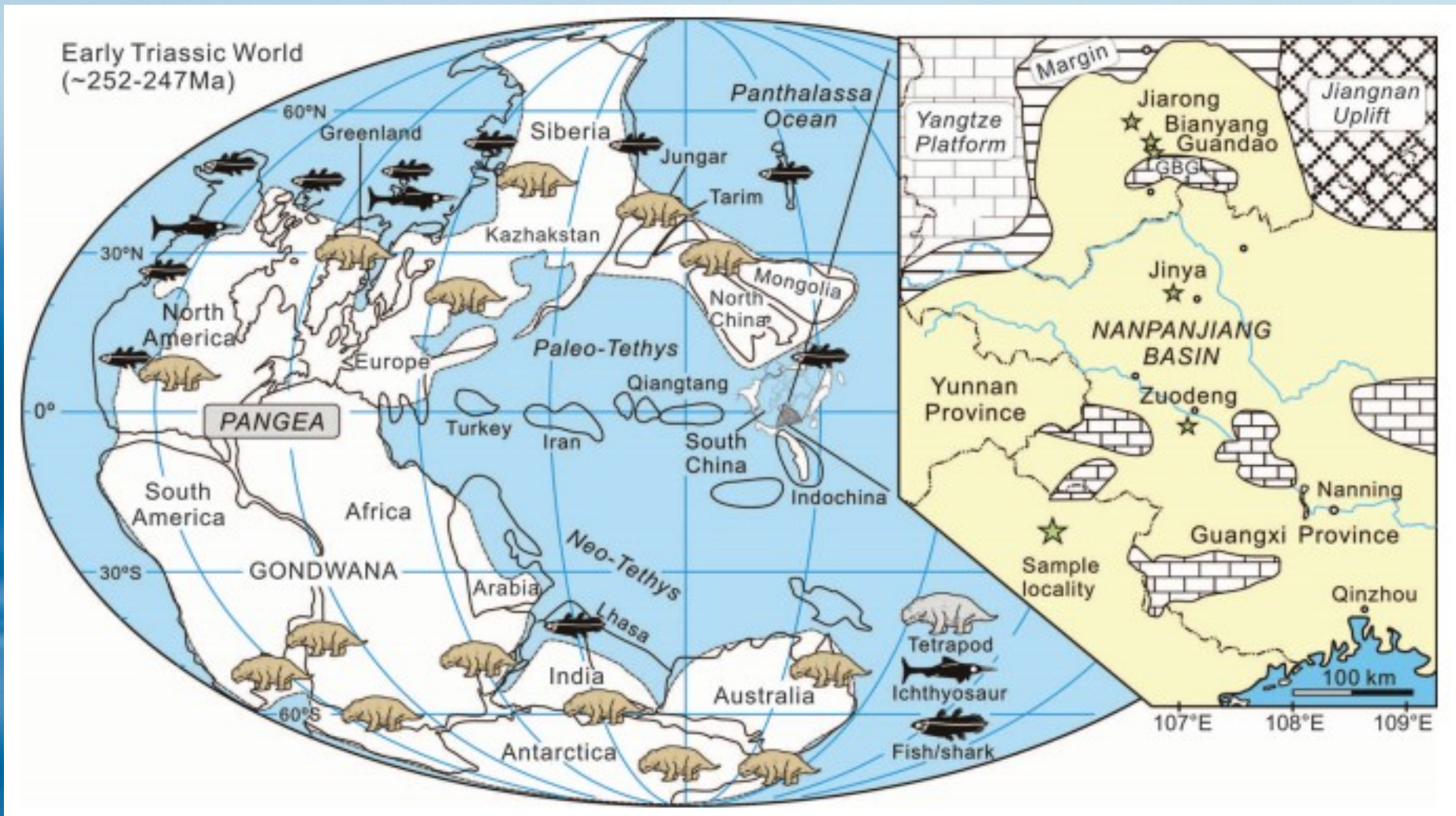
na granicy triasu i permu spowodowało anoksję (brak tlenu) w oceanach i znaczący spadek koncentracji tlenu w atmosferze (spadek odpowiadający 8 km różnicy wysokości!).

Zginęło 90% gatunków morskich oraz 70% rodzin kręgowców lądowych (Erwin 1994).

Główny podejrzany: wzmożony wulkanizm (trapy syberyjskie), ale są i inni.



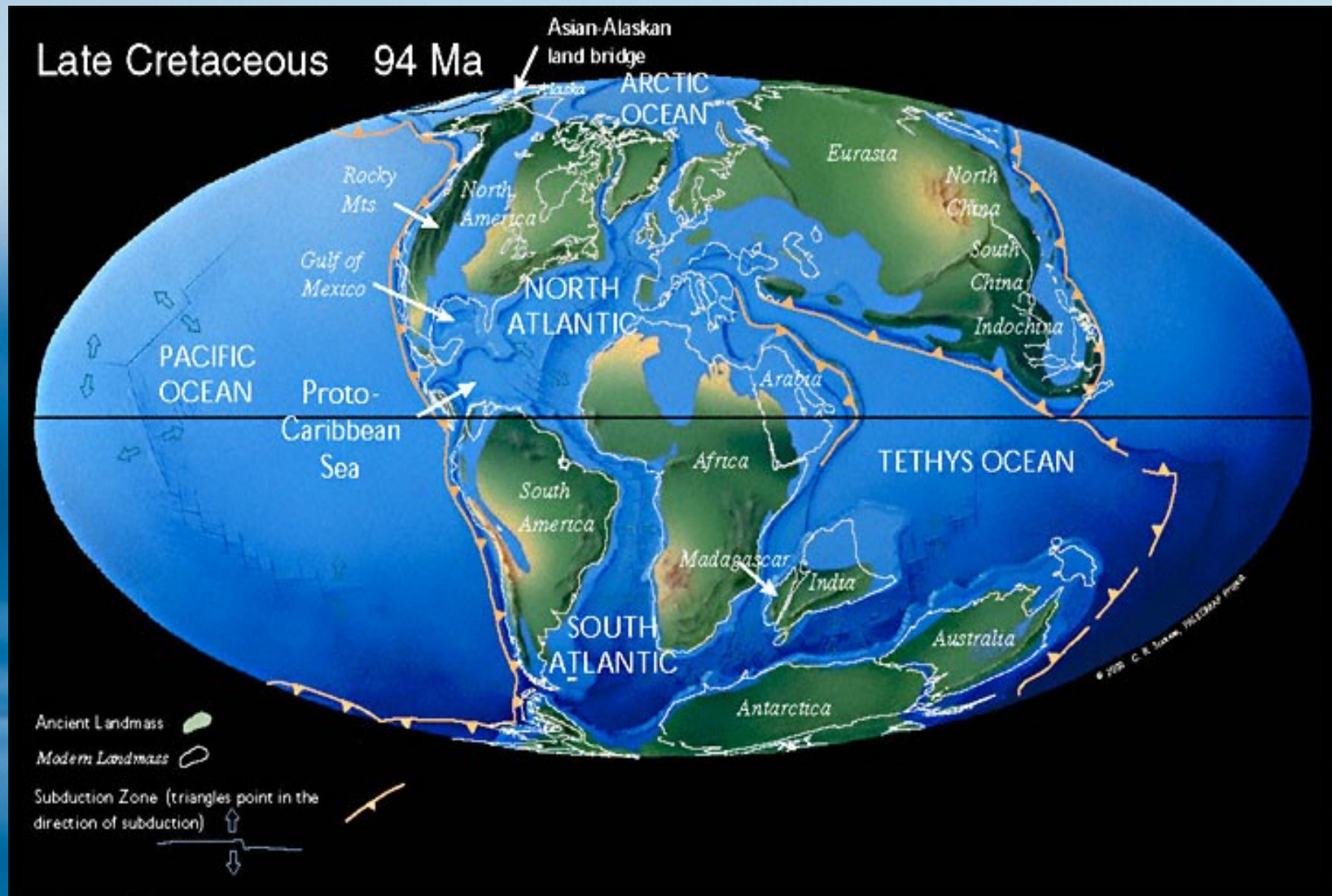
Po największym wymieraniu: za ciepło aby żyć w tropikach?



We wczesnym triasie temperatury tropików mogły przekraczać nawet 40 C. W tej temperaturze większość form życia wielokomórkowego nie jest w stanie egzystować.

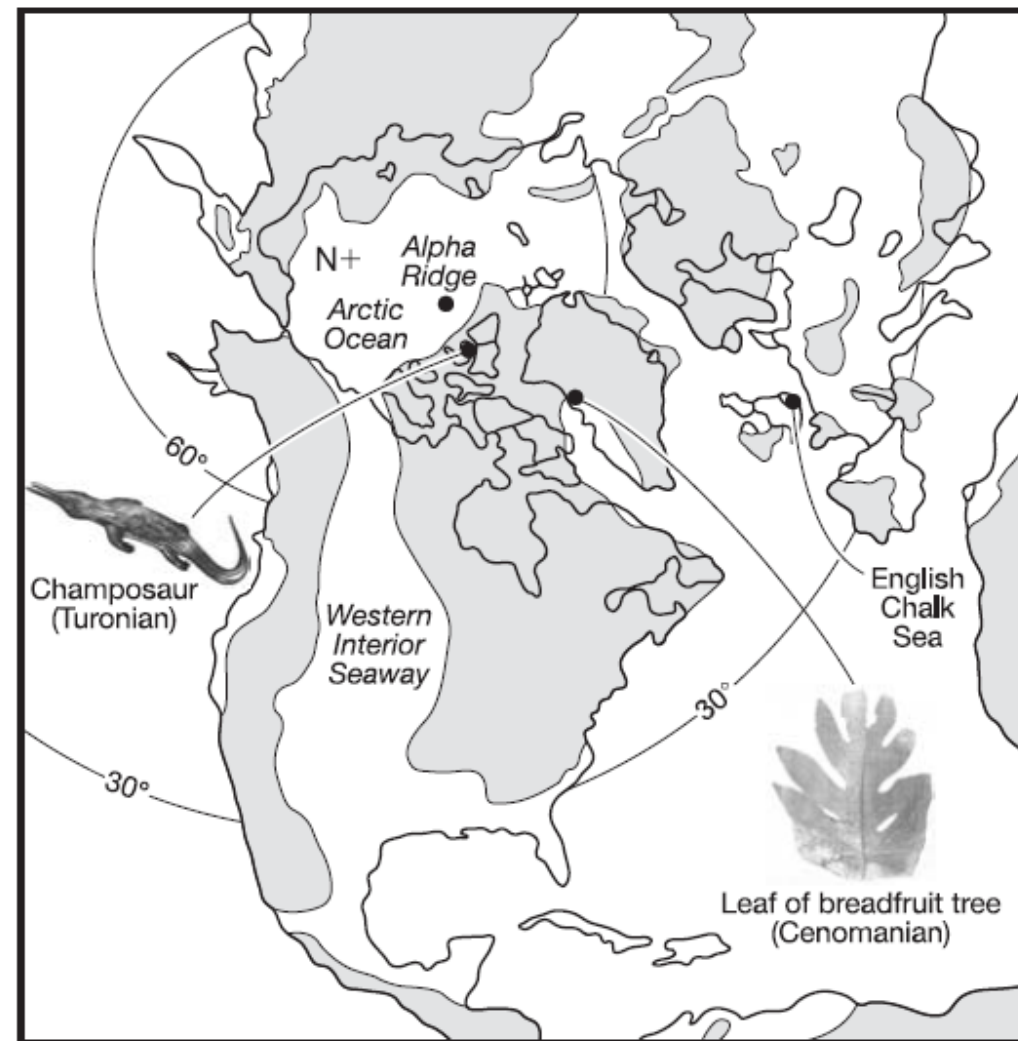
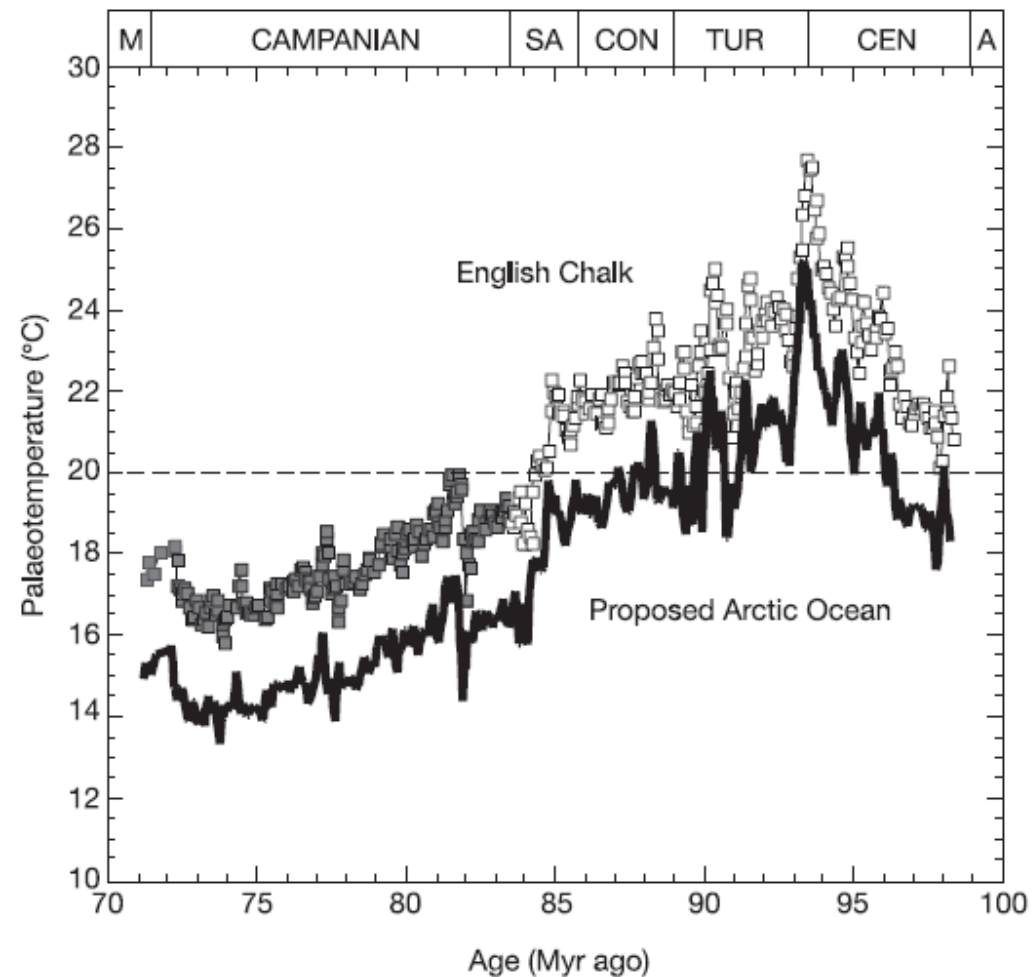
Sun et al 2012 (Science)

Kreda: otwiera się nowy ocean



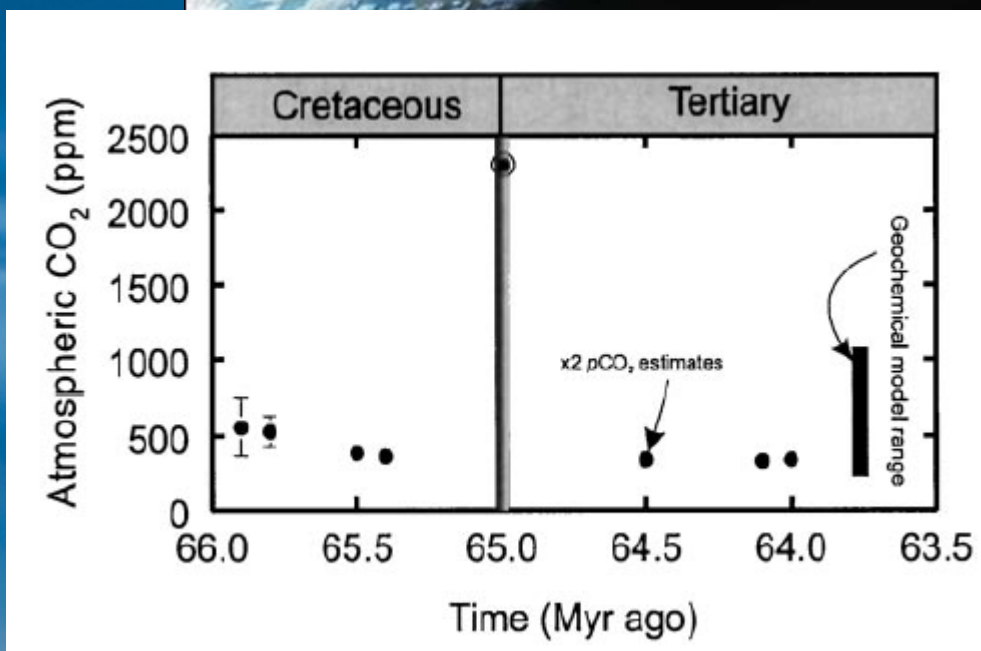
Najlepiej nam znany fragment cyklu superkontnientów. Jakie skutki klimatyczne powoduje powstanie nowego oceanu?

Klimat późnego mezozoiku (kredy)

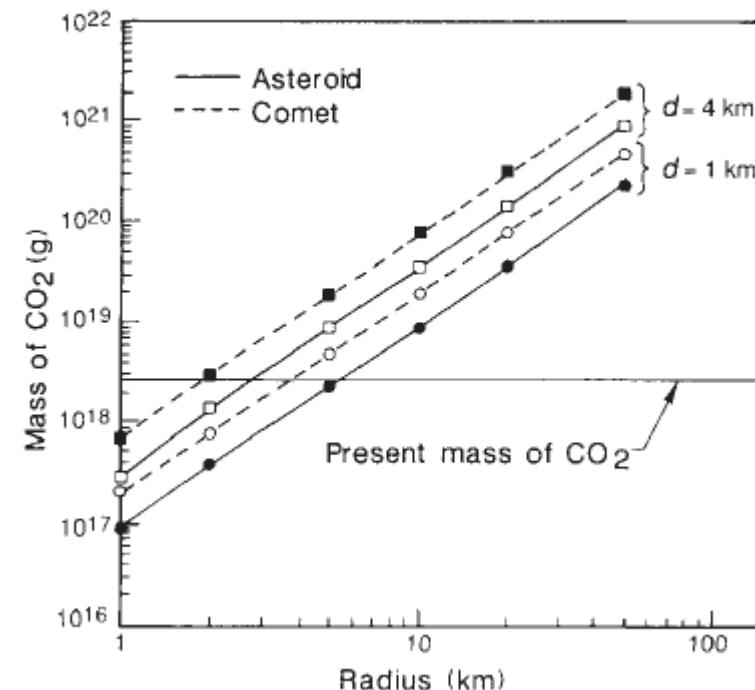


Okres kredy gdy otwierał się Ocean Atlantycki (duża produkcja CO_2) charakteryzował się wysokimi temperaturami – także w Arktyce.

Czy wysokie CO₂ zawdzięczamy asteroidowi sprzed 65 mln lat?



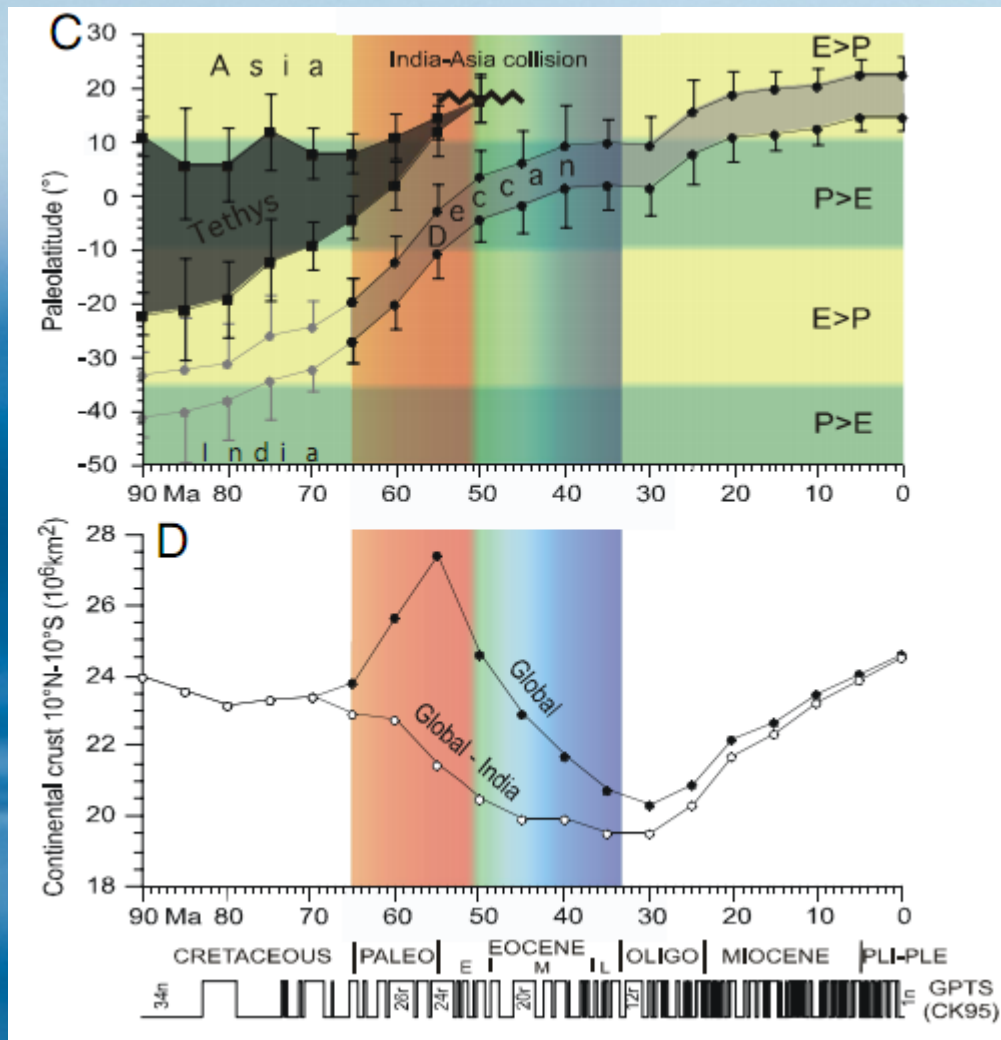
Koncentracja CO₂ przed i po katastrofie
(*Beerling i inni, 2002*)



Masa CO₂ wyzwolona do atmosfery w funkcji promienia asteroidy/komety
(*O'Keefe, Ahrens 1989*)

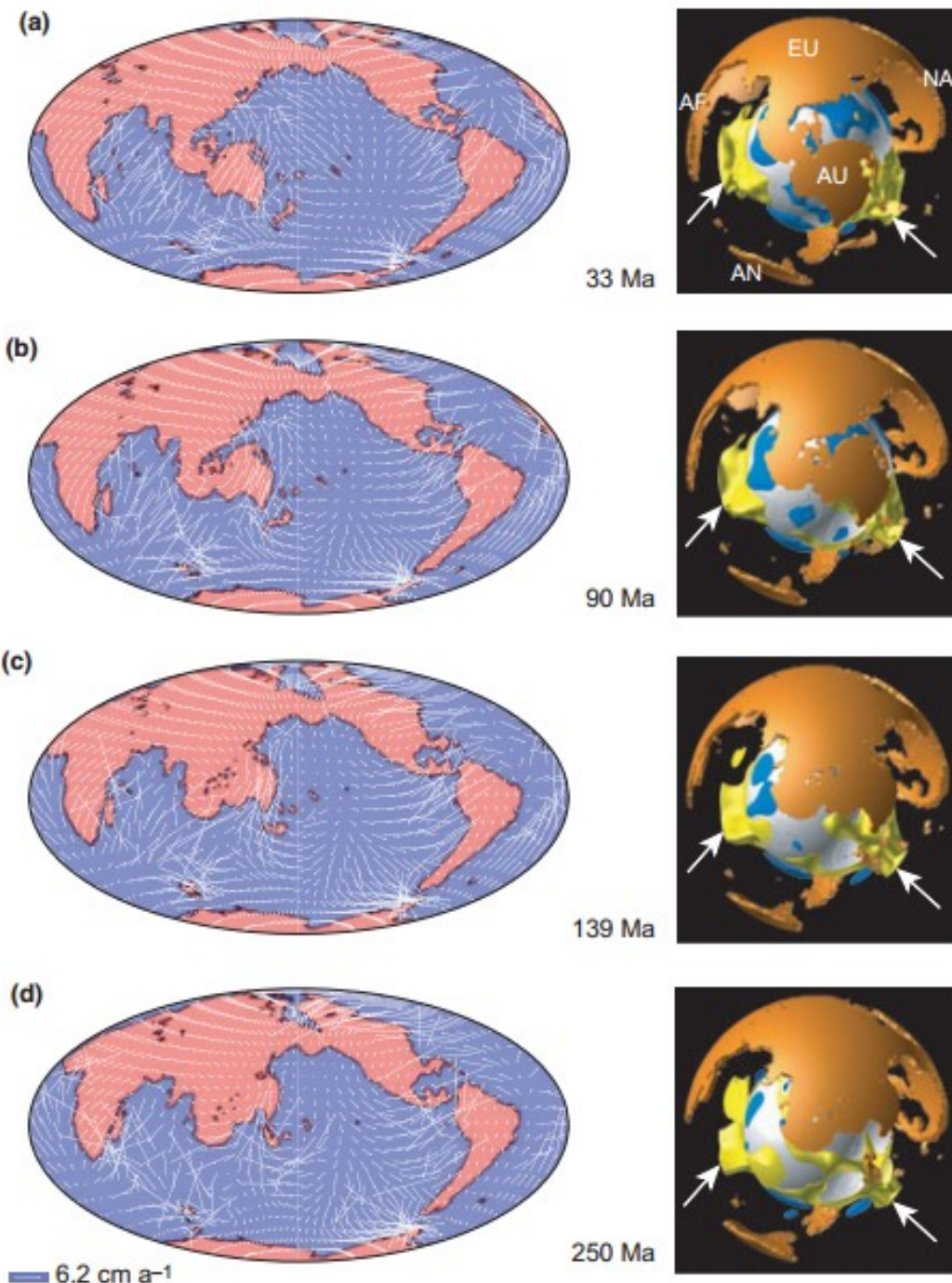
Odpowiedź: nie, jego efekt utrzymał się przez mniej niż 100 ka

Zagłada Oceanu Tetydy a klimat Ziemi...



Jedną z przyczyn wysokich koncentracji CO₂ w kredzie i paleocenie mogła być subdukcja Oceanu Tetydy (Tethys Ocean) oraz dostępność osadów węglanowych z jego dna dla wulkanizmu kontynentalnego (produkcja CO₂!)

Ciekawostka: cykl kontynentów w przyszłości



Geologów gnębi pytanie który ocean zamknie się następny: znowu Atlantyk czy tym razem Pacyfik? Model cyrkulacji materii w płaszczu Ziemi (położenia i prędkość płyt po lewej a anomalie temperatury płaszczu po prawej) wskazuje na trzecią możliwość: zgromadzenie kontynentów (w wyjątku Antarktydy i Ameryki Południowej wokół Bieguna Północnego i zamknięcie Oceanu Arktycznego.

Yoshida & Santosh 2011 (Terra Nova)

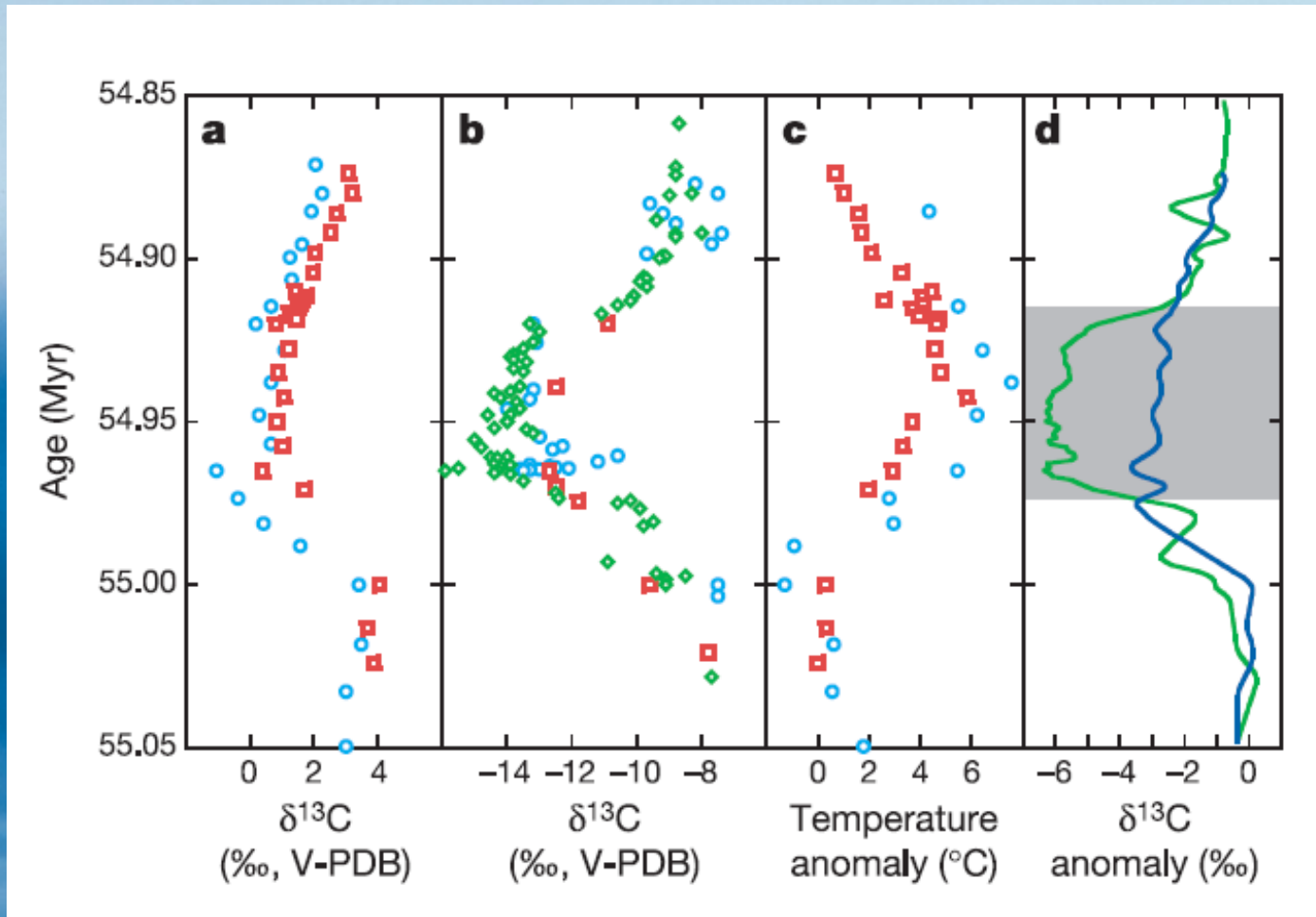
Podsumowanie 2/3

- W skali geologicznej cykle klimatyczne sterowane są głównie cyklem superkontynentów o okresie ok. 600 mln lat, albo (widocznym w danych geologicznych fanerozoiku) cyklu o okresie 300 mln lat.
- Cykle te wpływają na ilość CO₂ w atmosferze poprzez zmiany intensywności wulkanizmu i wietrzenia skał krzemianowych. Te same mechanizmy zapewniają względną (jednak bardzo zgrubną) stabilność klimatu w skali geologicznej.
- Istnieją przesłanki (zlodowacenia i wymierania) istnienia cyklu o okresie 140 mln lat o niejasnym mechanizmie (raczej geologia ale może astronomia?)
- Zbyt słabo jeszcze znamy (mała rozdzielczość czasowa i dokładność metod) historię zmian gazów cieplarnianych i temperatury oceanów przed Kenozoikiem (65 Ma) aby wyciągać pewne wnioski na temat klimatu tych epok.
- Wielkie Wymierania występują nieregularnie i zapewne losowo. Nie pozostawiają one śladów klimatycznych w geologicznej skali czasu – za wyjątkiem największego na granicy triasu i permu.

Alaska podczas optimum klimatycznego 55 Ma



Optimum klimatyczne 55 mln lat temu



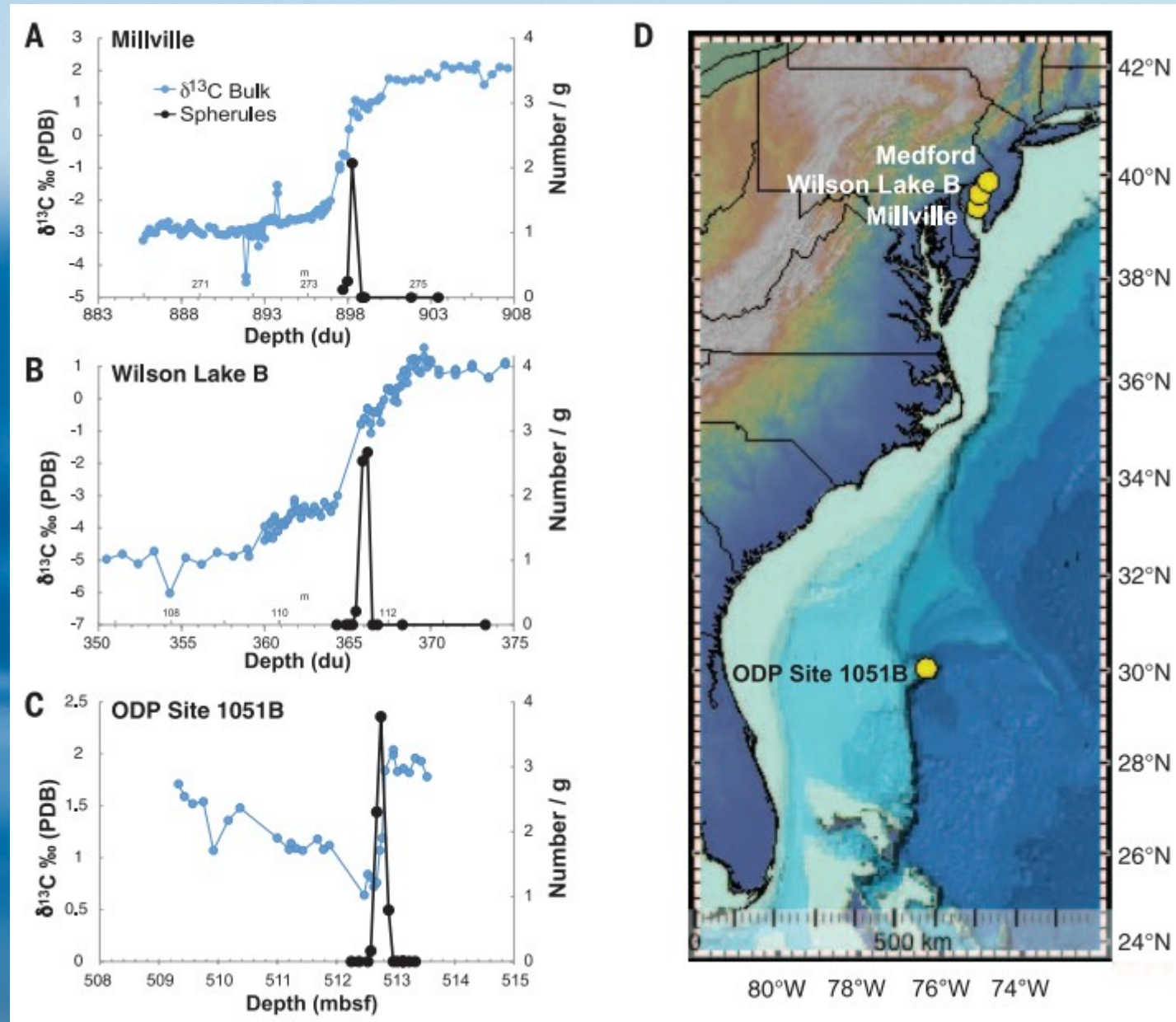
Wzrost temperatury (c) połączony był ze zmianami cyklu węgla w morzu (a), i glebach lądowych (b).

Przyczyna: emisja metanu z dna morza, bagien lub pożary lasów?
Maksimum klimatu wiązało się z dużą wilgotnością (wykres d).

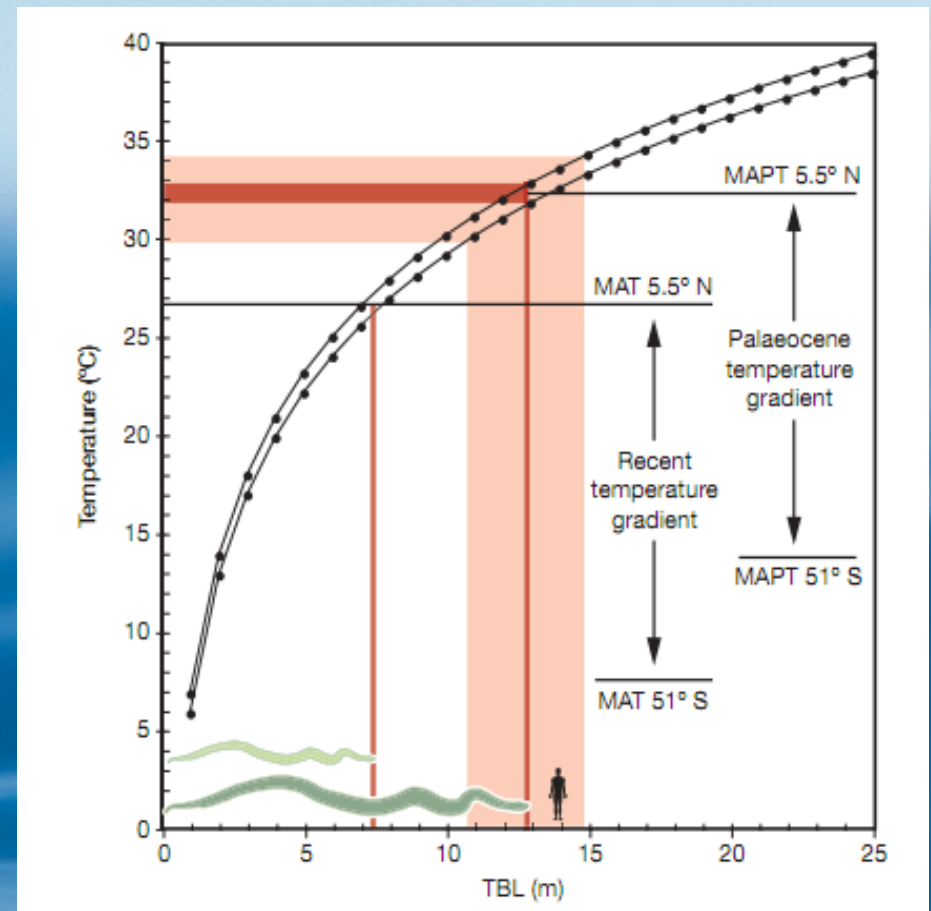
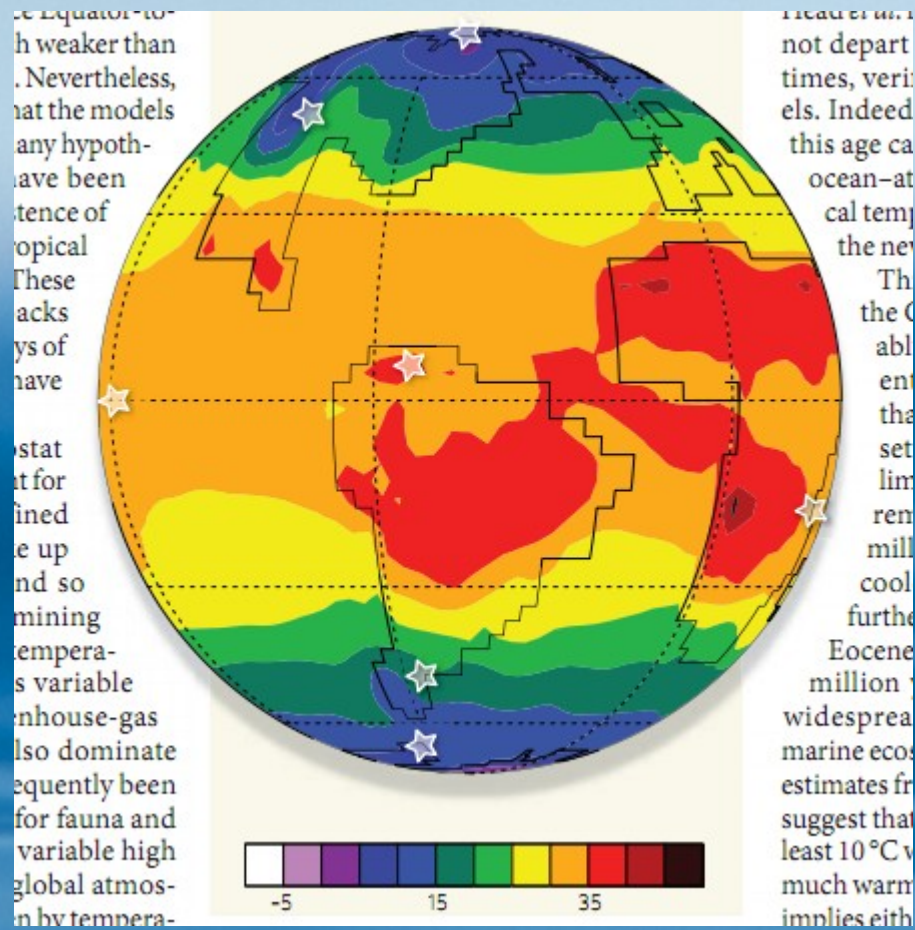
Bowen et al. 2004 (Nature)

„Impakt” 55 mln lat temu?

Rdzenie z zachodniej części Pn. Atlantyku pokazują obecność „sferuli” pochodzenia meteorytowego dokładnie w momencie gdy węgiel kopalny zaczął stawać się lżejszy (mniej C13). Czyżby asteroid spowodował emisję metanu z dna niedawno powstałego Atlantyku?



Jak gorąco było 55 mln lat temu?

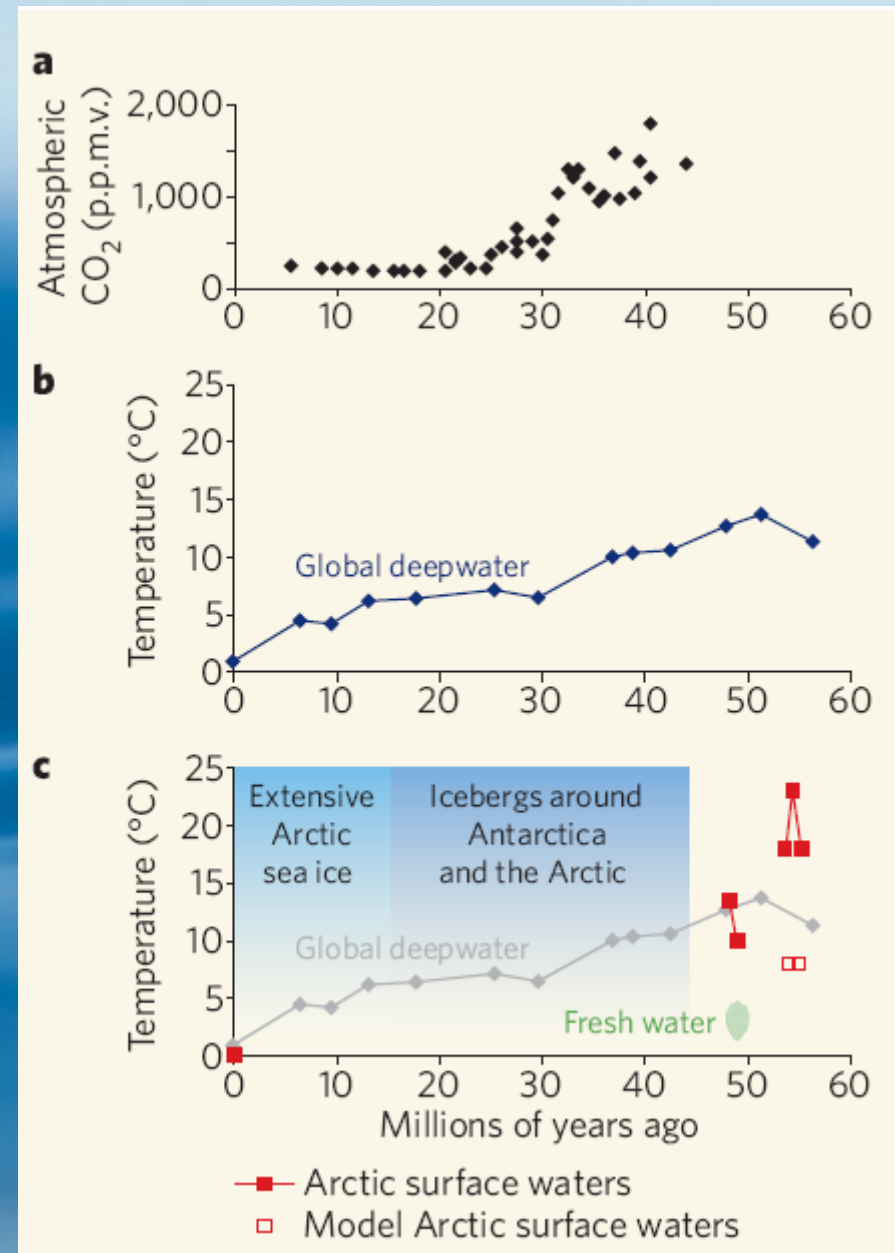


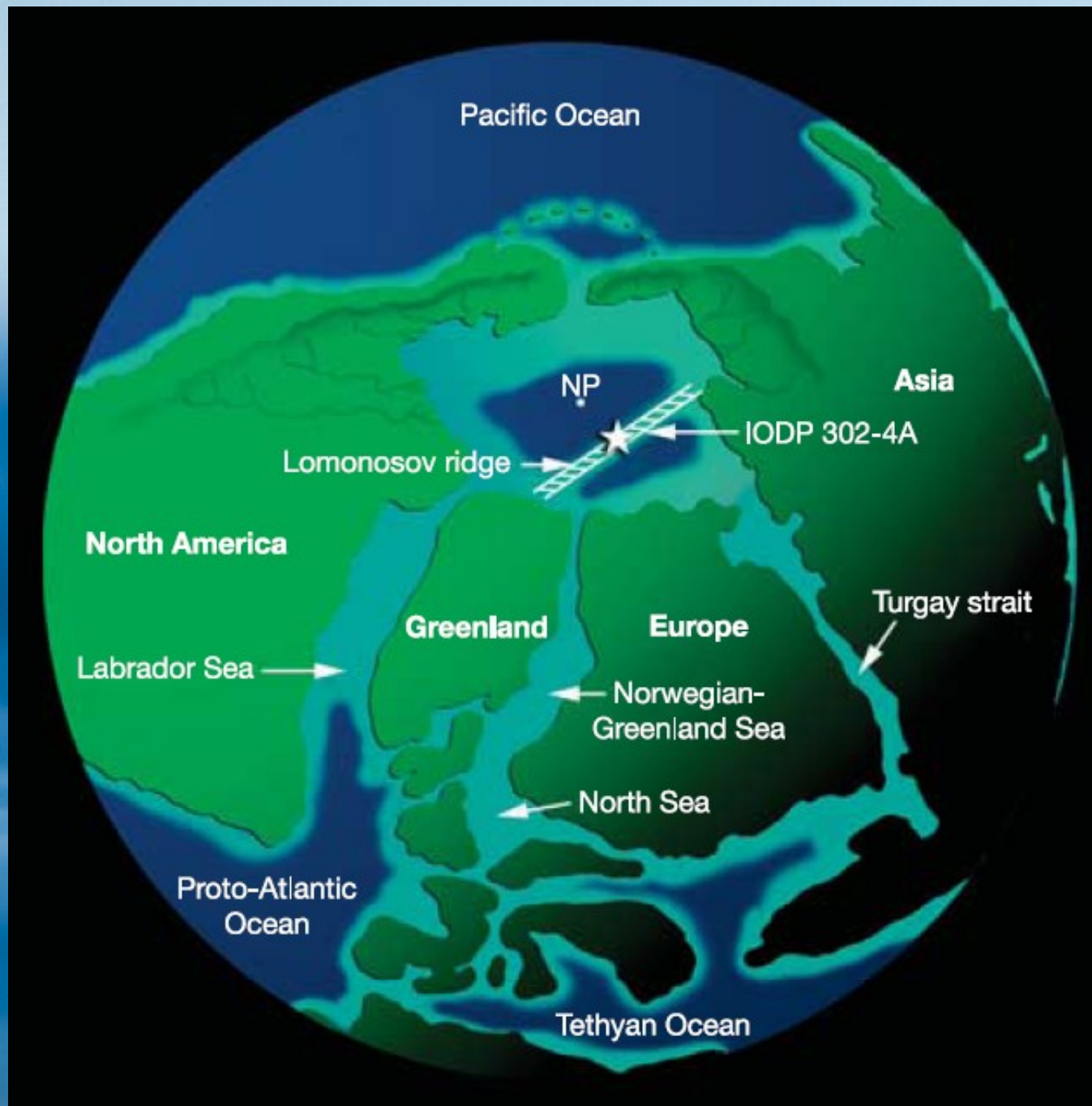
Model klimatyczny oddający dobrze wszystkie znane temperatury z tego okresu, w tym wartość z Kolumbii wyznaczona na podstawie... długości kopalnego węża.

Huber 2009 (Nature); Head et al. 2009 (Nature)

Zmiany klimatyczne w oceanach w ciągu ostatnich 50 mln lat

- Spadek koncentracji atmosferycznego CO₂
- Spadek temperatury wód głębinowych
- Spadek temperatury wód powierzchniowych w Arktyce
- Powstanie i wzrost lodu morskiego w rejonach polarnych





Morze Arktyczne 55 mln lat temu na granicy eocenu i oligocenu
(*Sluis i inni, 2006*)

Skąd znamy klimat Arktyki sprzed 50 mln lat?



**Statek wiertniczy *Vidar Viking* oraz lodolamacze *Oden* i *Sovetsky Soyuz* ponad Grzbietem Łomonosowa na Morzu Arktycznym
(Stoll, 2006)**

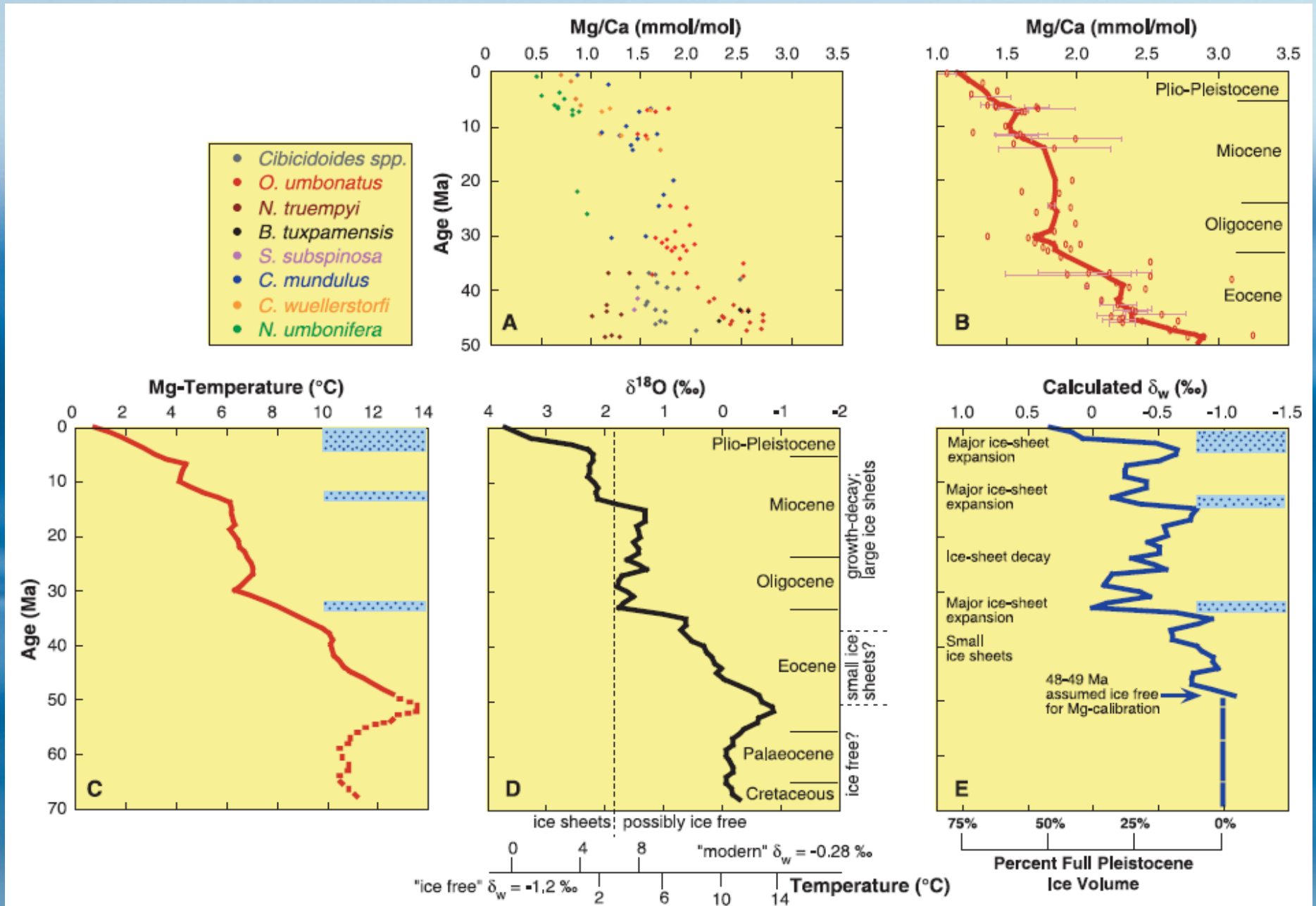
Otwornice: termometry paleoklimatyczne



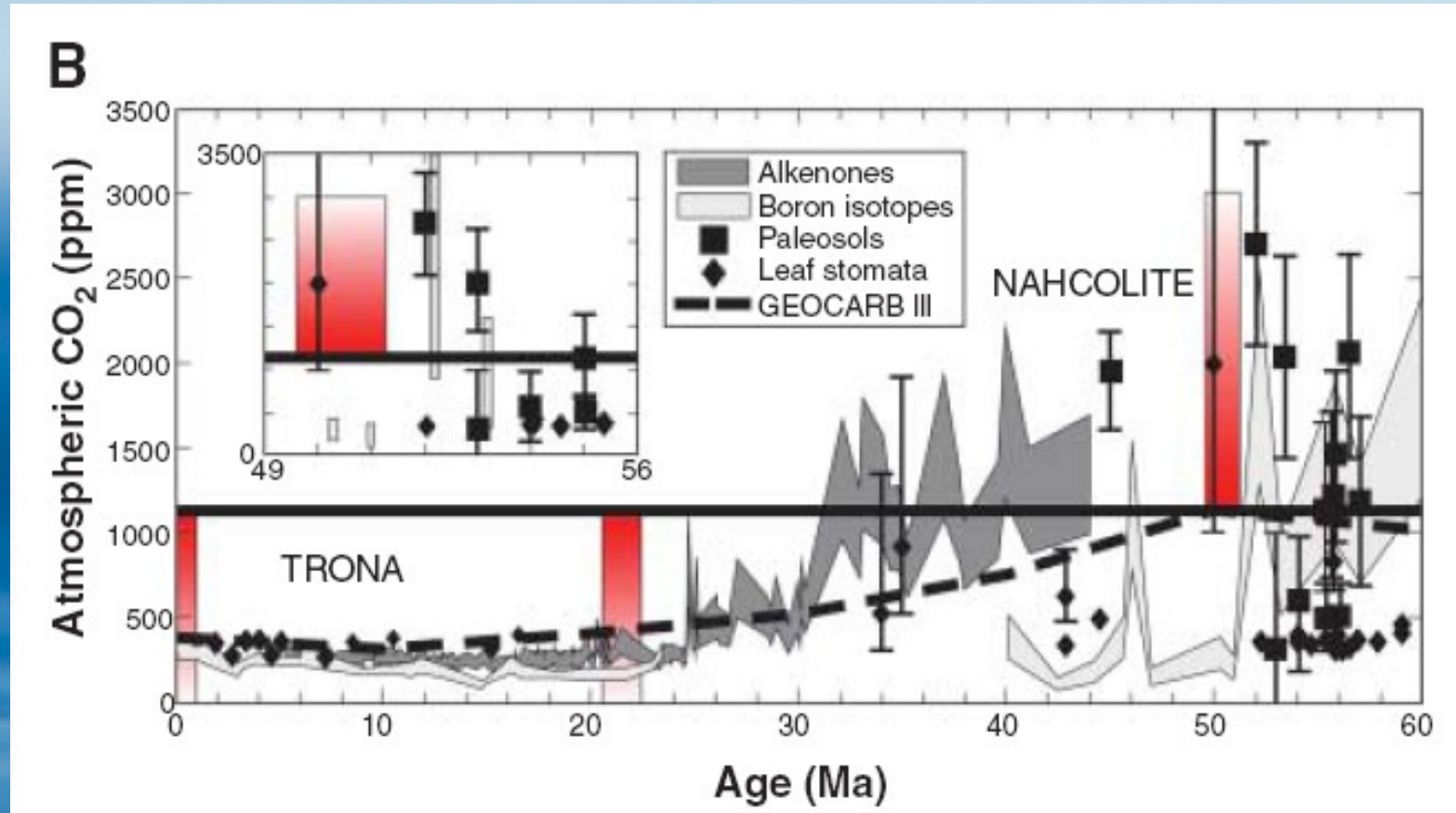
Cribrohammina inflata

- Stosunek izotopów tlenu wbudowanego w skorupki otwornic (*Foraminifera*) zależy od temperatury wody.
- Niestety zależy też od składu izotopowego wody morskiej (zależnego głównie od ilości wody wbudowanej w lądolód).
- Na szczęście istnieje drugi niezależny „termometr”: stosunek Mg/Ca w skorupce.
- Niestety jest on różny dla różnych gatunków. Do celów paleoklimatycznych są przydatne jedynie te, które istnieją do dziś.
- Istnienie dwóch “termometrów” pozwala rozdzielić efekt temperatury i składu wody.

Procedura wyznaczania jednocześnie temperatury wód oceanicznych i objętości lądolodów przy pomocy otwornic

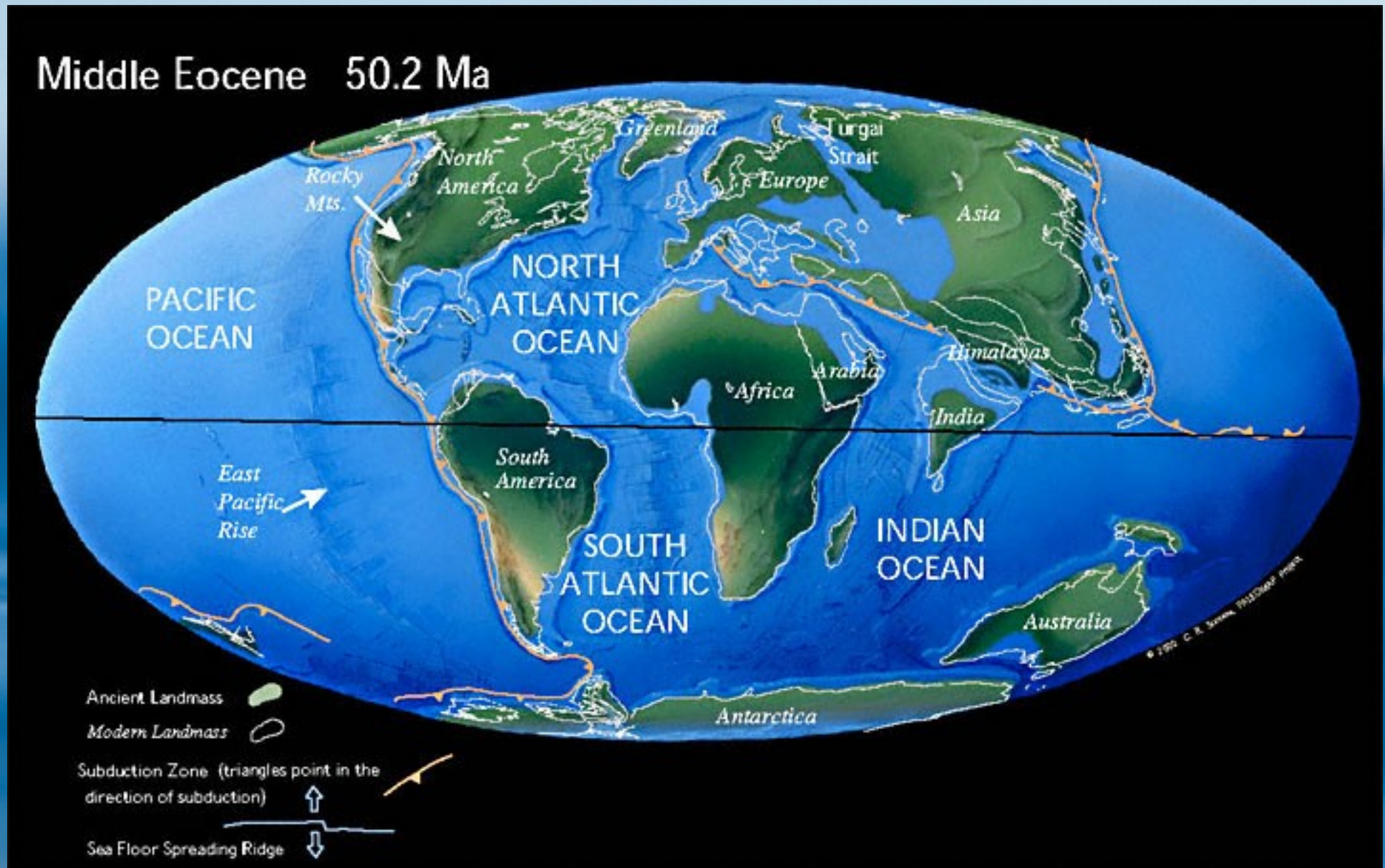


Ostatnie 55 Ma: coraz mniej CO₂



Rekonstrukcje koncentracji CO₂ w ostatnich 60 Ma wykonane różnymi metodami.

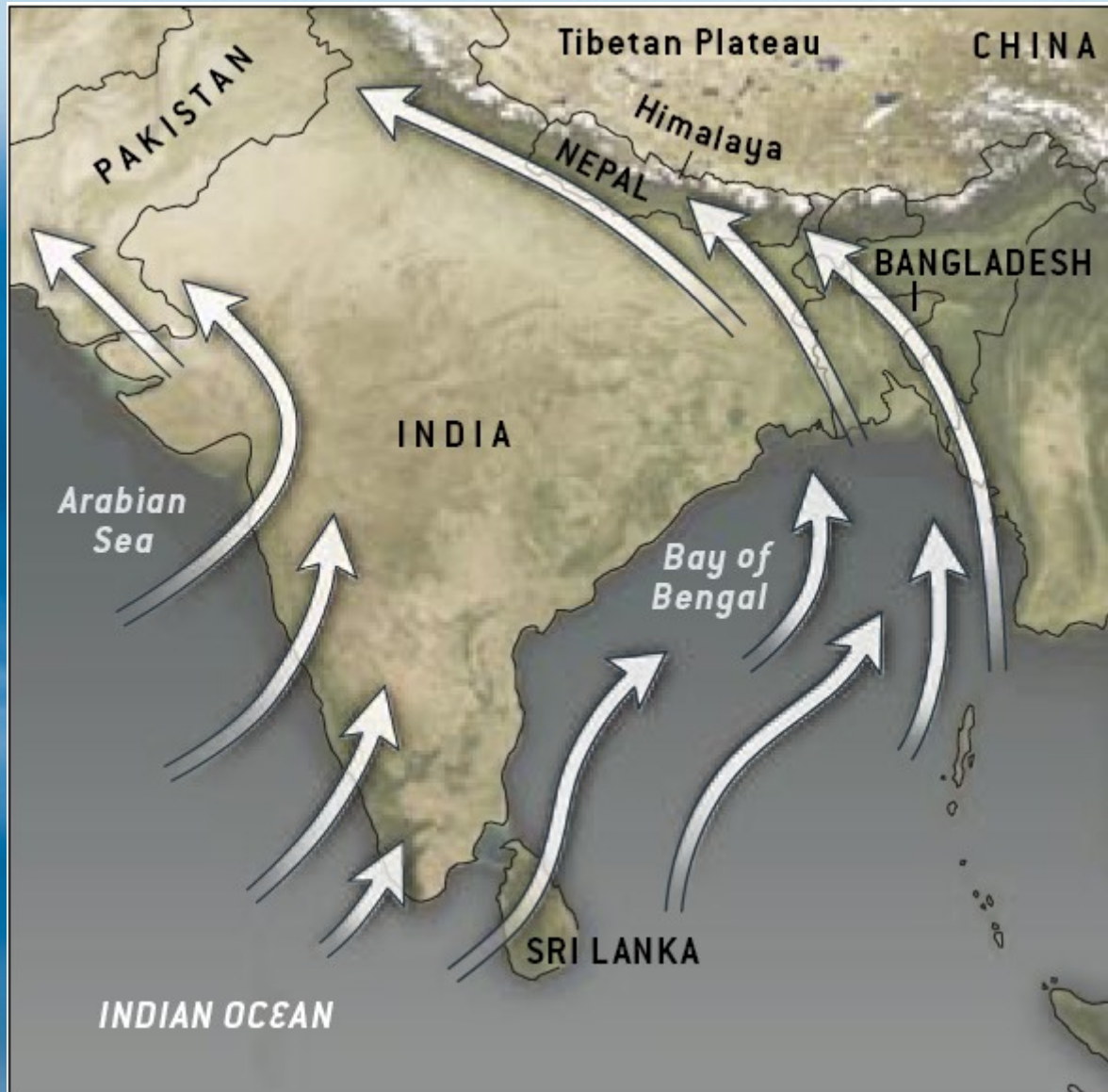
Co zdarzyło się ok 50 mln lat temu?



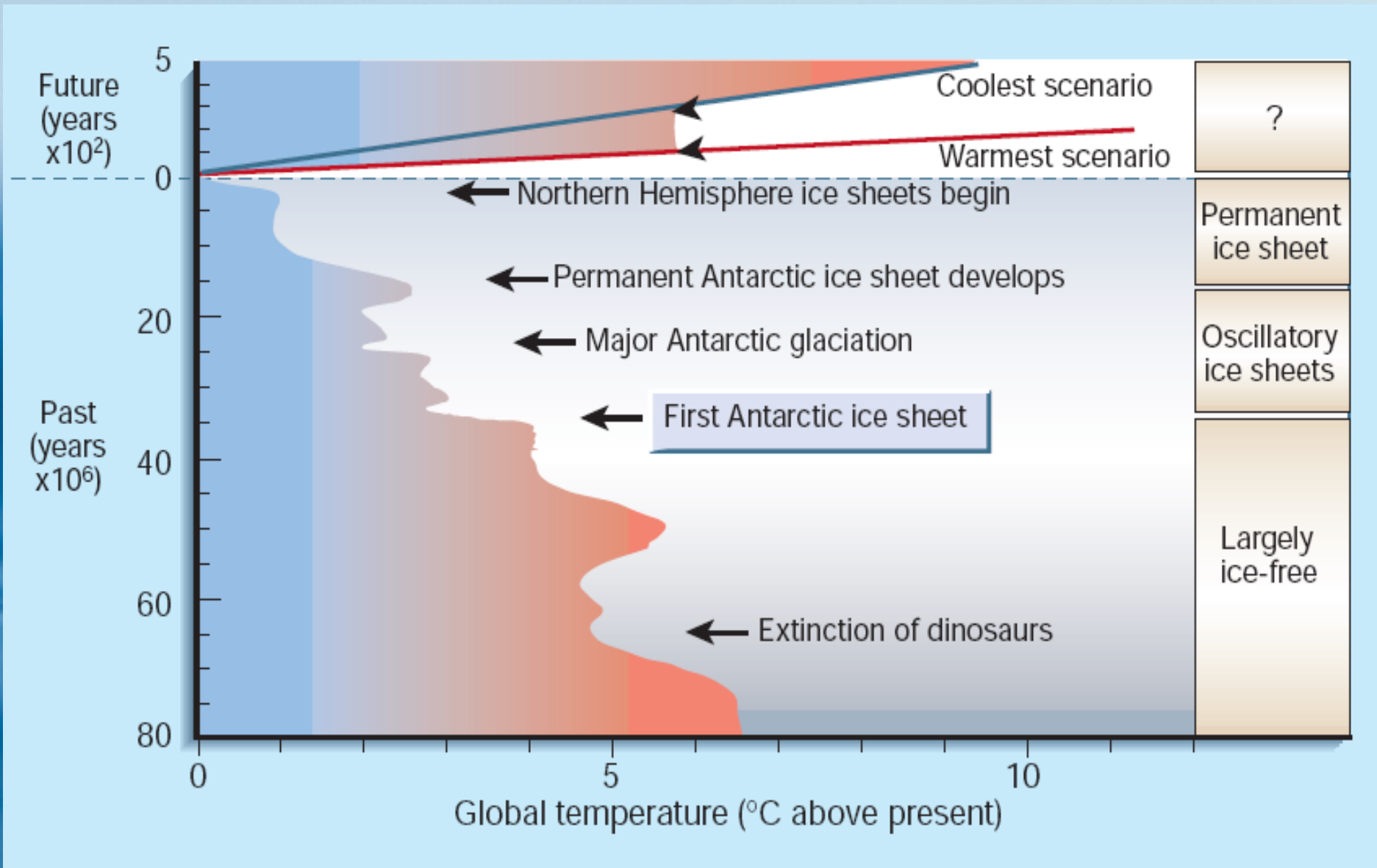
Rekonstrukcja położenia kontynentów 50 mln lat temu

Wzrost Himalajów a klimat

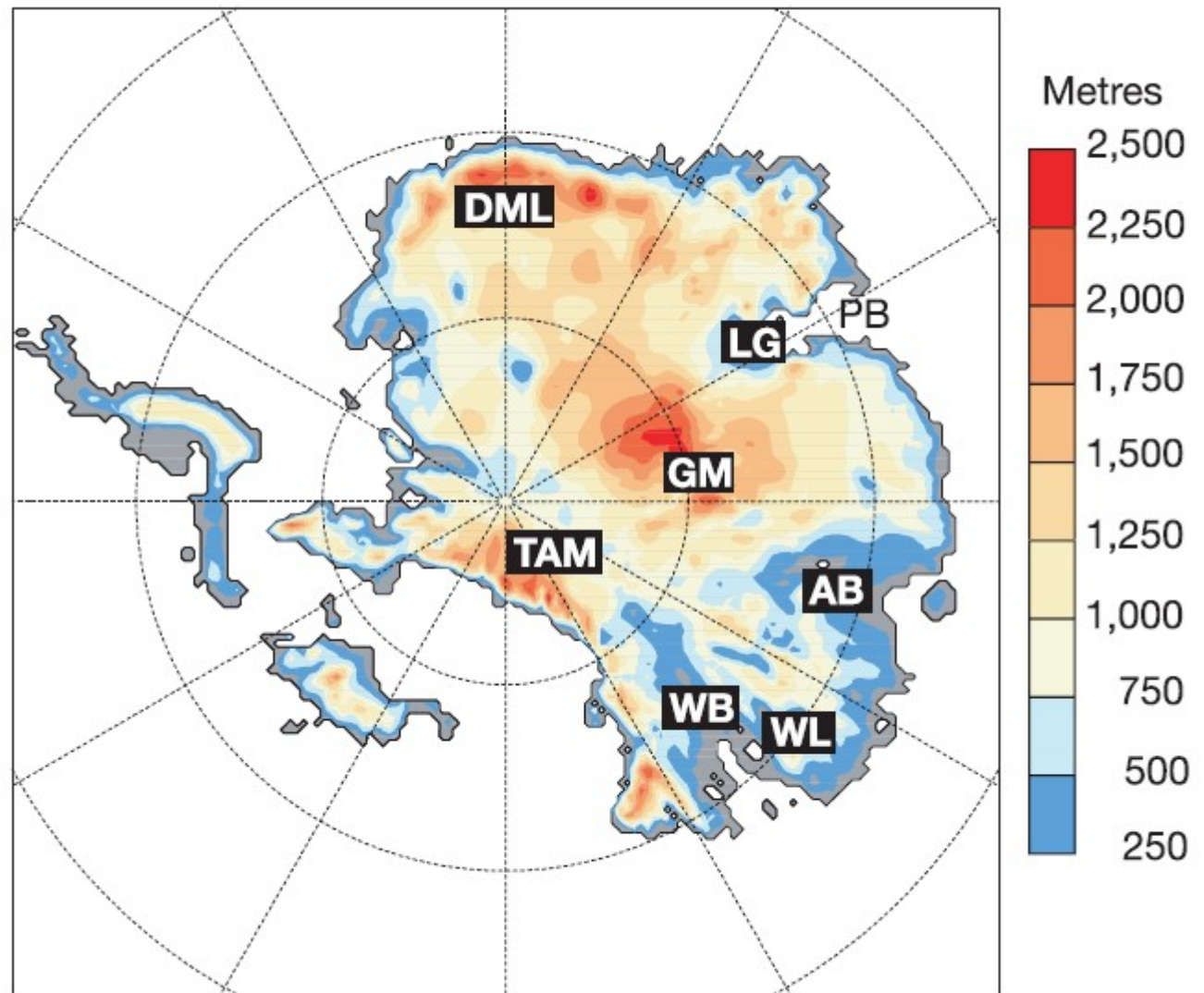
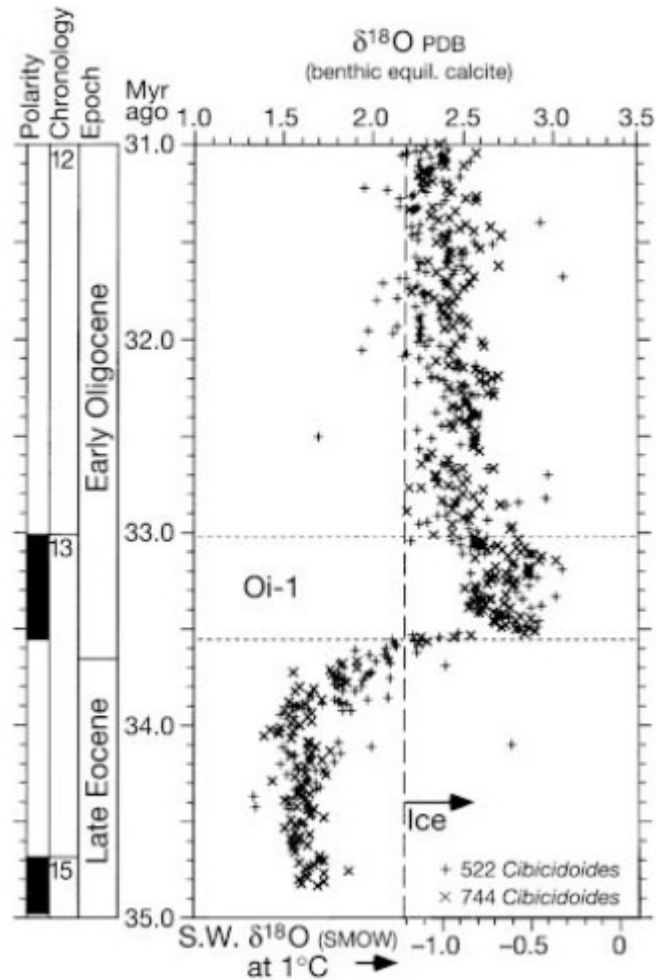
Wzmocnione wietrzenie przyczyną ubywania CO₂



Kenozoik: w drodze do epoki lodowej



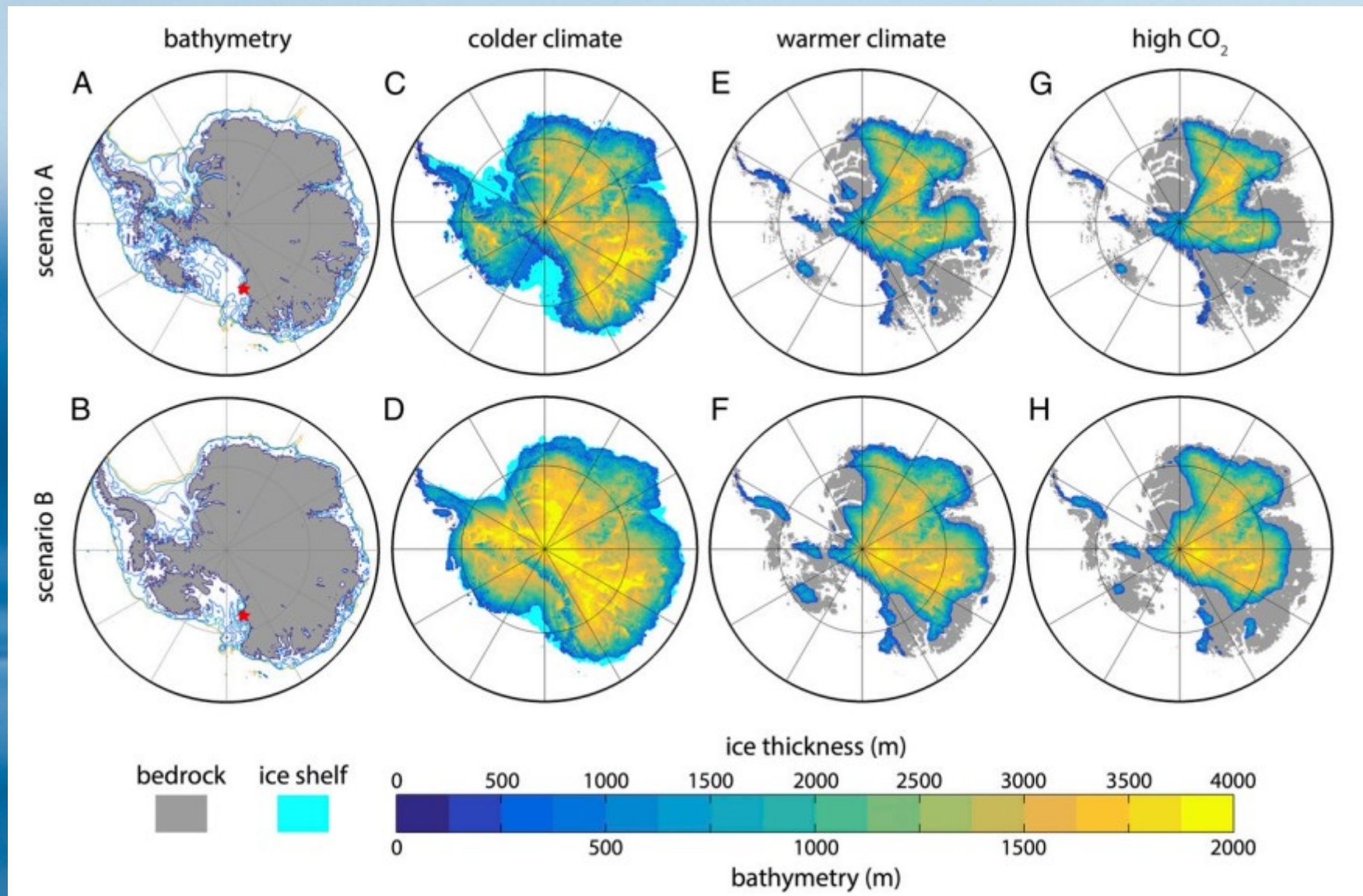
Antarktyda 34 mln lat temu: początek zlodowaceń



Izotopowy dowód na powstanie pokrywy lodowej i topografia
Antarktydy 34 Ma.

De Conto Pollard 2003 (Nature)

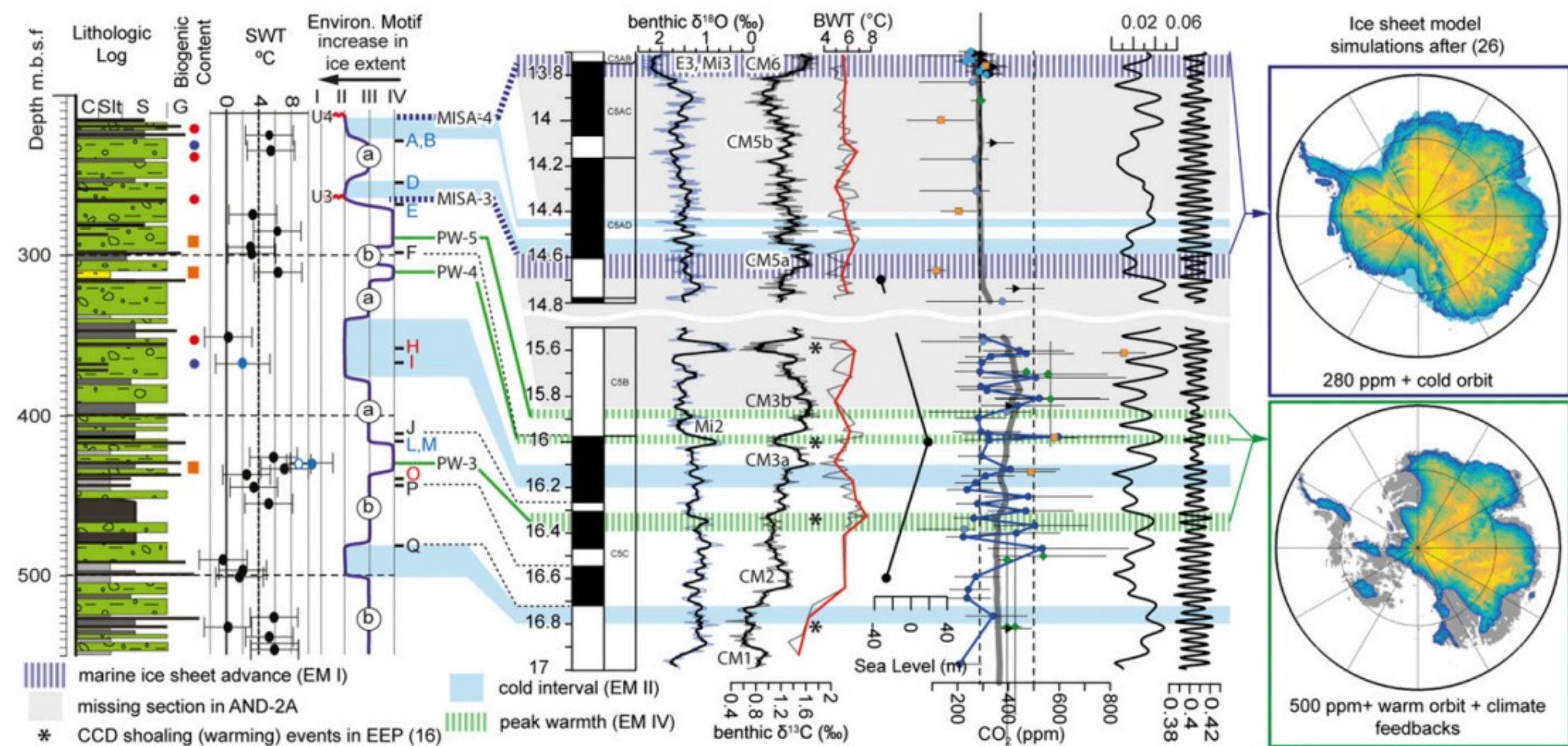
Antarktyda 34 mln lat temu: umiemy to modelować



Pokrycie lądolodem Antarktydy dla współczesnych (górnego) i miocenńskiej topografii i różnych stężeń CO₂.

Gasson et al 2016 (PNAS)

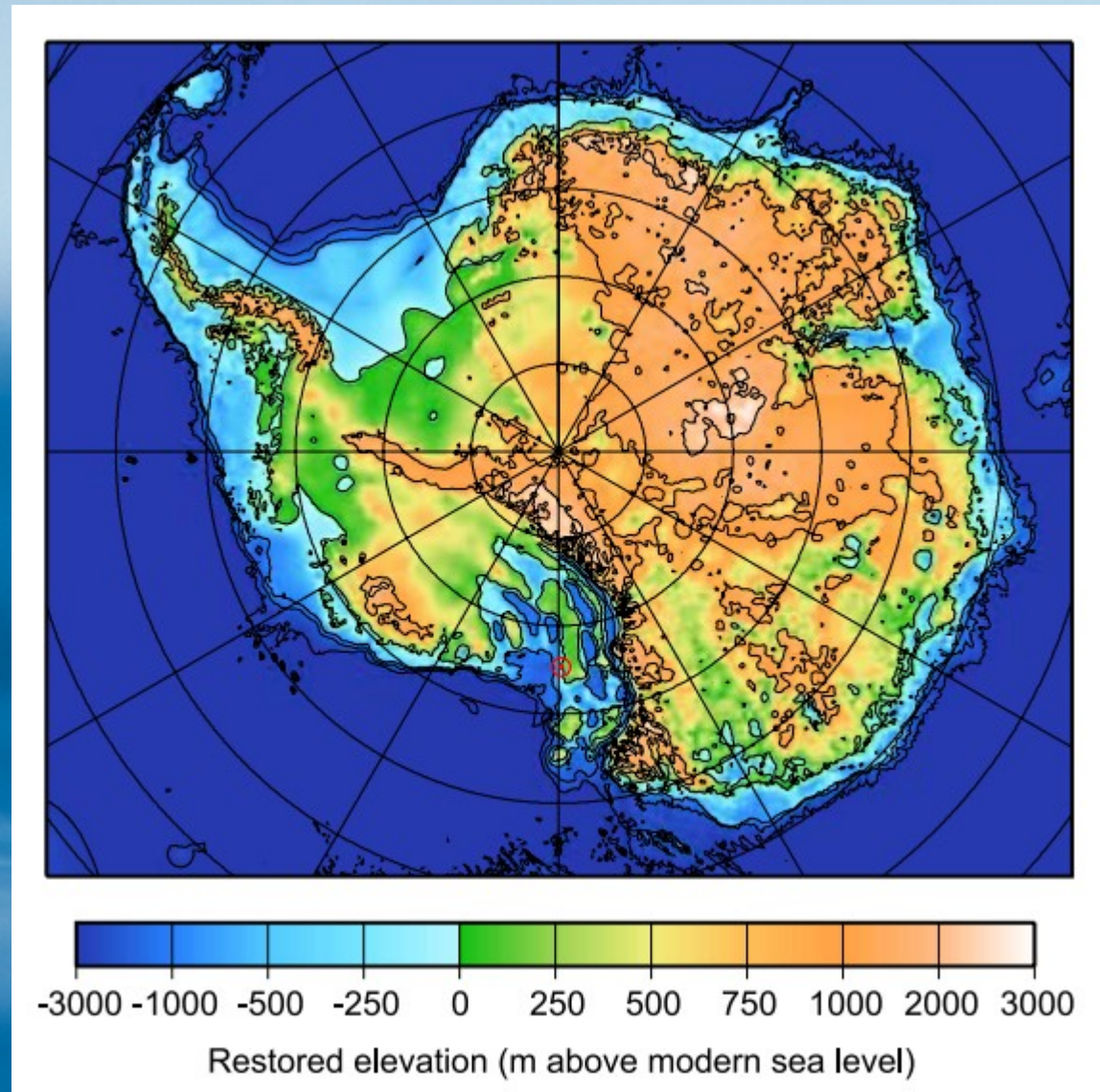
Antarktyda 17-13,8 mln lat temu: tak to wyglądało



Rdzeń osadów z dana Morza Rossa pokazuje przejście od Antarktydy częściowo pokrytej lądolodem do całkowicie. 'Motywy' oznaczają sytuację od przybrzeżnego morza wolnego od lodu (IV) do lodu wypełniającego cały szelf aż do dna (I).

Levy et al 2016 (PNAS)

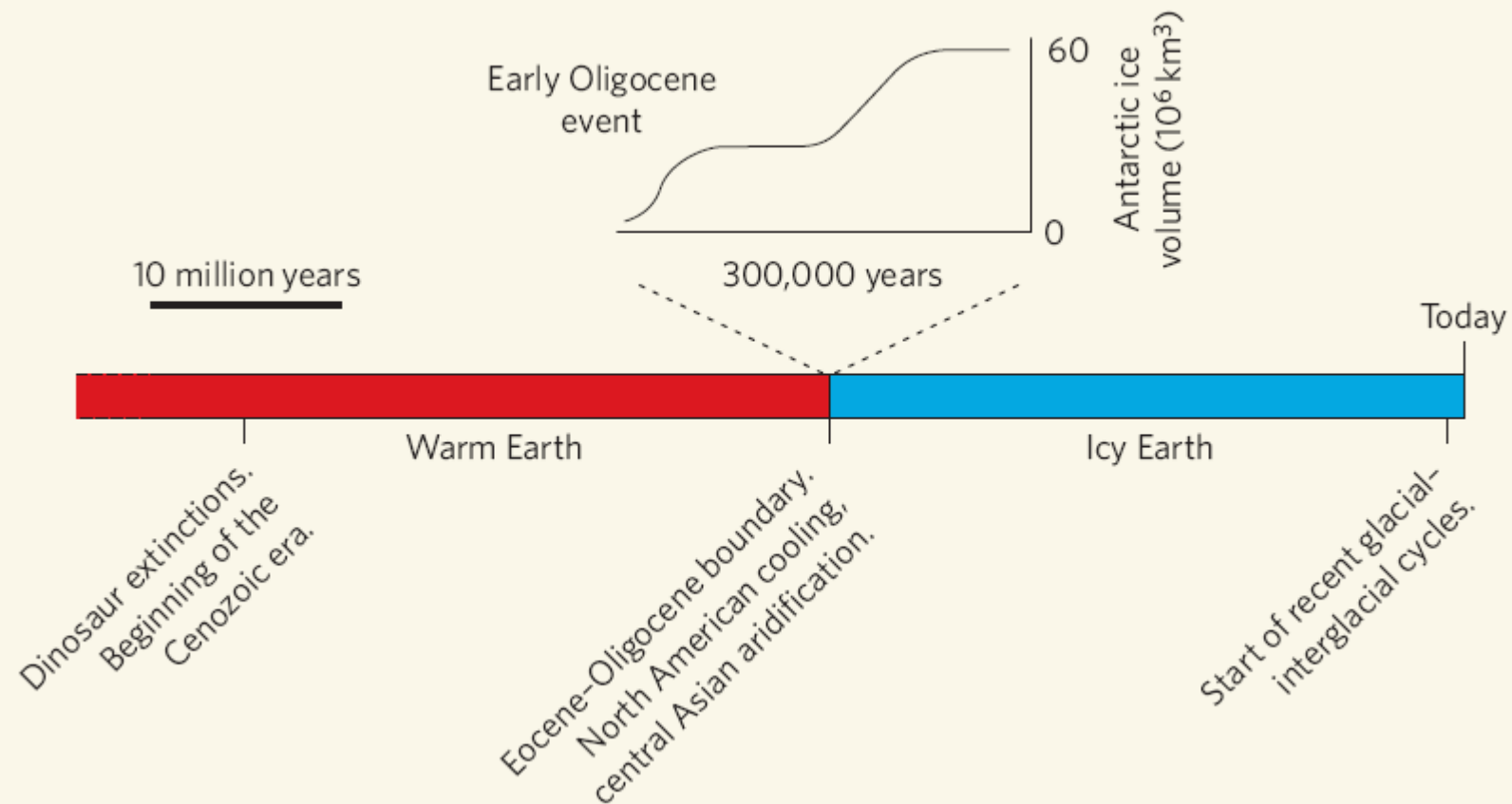
Uaktualnienie: Antarktyda 34 mln lat temu



Nowe rekonstrukcje wyglądu Antarktydy 34 Ma, uwzględniające erozję przewidują, że praktycznie cała Antarktyda była wówczas nad poziomem morza.

Wilson & Luyendyk 2009 (GRL)

Dlaczego tak nagle?



Nagłe oziębienie się klimatu na całej Ziemi wskazuje na spadek koncentracji CO₂ jako przyczynę początku zlodowacenia – termiczne odizolowanie Antarktydy przez Prąd Wokółantarktyczny (alternatywna propozycja) spowodowałoby ocieplenie reszty planety.

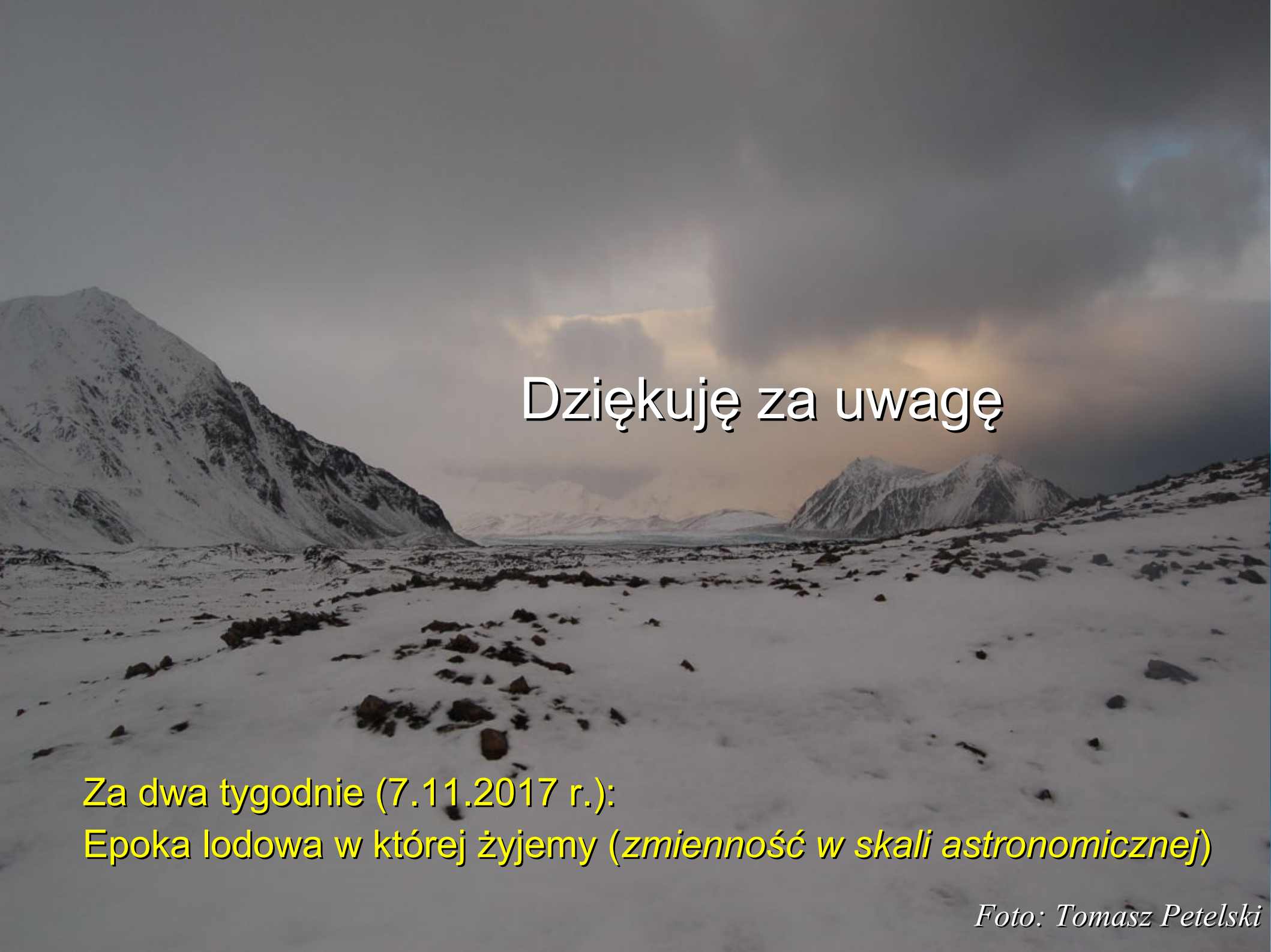
Bowen 2007 (Nature)

Podsumowanie 3/3

- W ciągu najnowszych 50 mln lat historii Ziemi jej klimat stawał się stopniowo coraz zimniejszy.
- Najbardziej prawdopodobną przyczyną jest ubywanie CO₂ w wyniku wzmożonego wietrzenia krzemianowych skał rosnących Himalajów i Tybetu.
- 34 mln lat temu rozpoczęła się współczesna epoka lodowa od zlodowacenia Wschodniej Antarktydy.
- Wydaje się, przyczyna było ubywanie CO₂, a nie otwarcie cieśnin między Antarktydą a Australią i Ameryką Południową (Cieśnina Drake'a), jak do niedawna sądzono.



Polarny krokodyl morski
z rodzaju *Champsosaurus*
(górną kreda)



Dziękuję za uwagę

Za dwa tygodnie (7.11.2017 r.):
Epoka lodowa w której żyjemy (*zmienność w skali astronomicznej*)

Foto: Tomasz Petelski