

MUNI
SCI

Klimatické změny a jejich odraz ve vývoji života na Zemi

Část 5.

Osídlování souše

Tomáš Kumpan

kumpan@sci.muni.cz

Ústav geologických věd PŘF MUNI

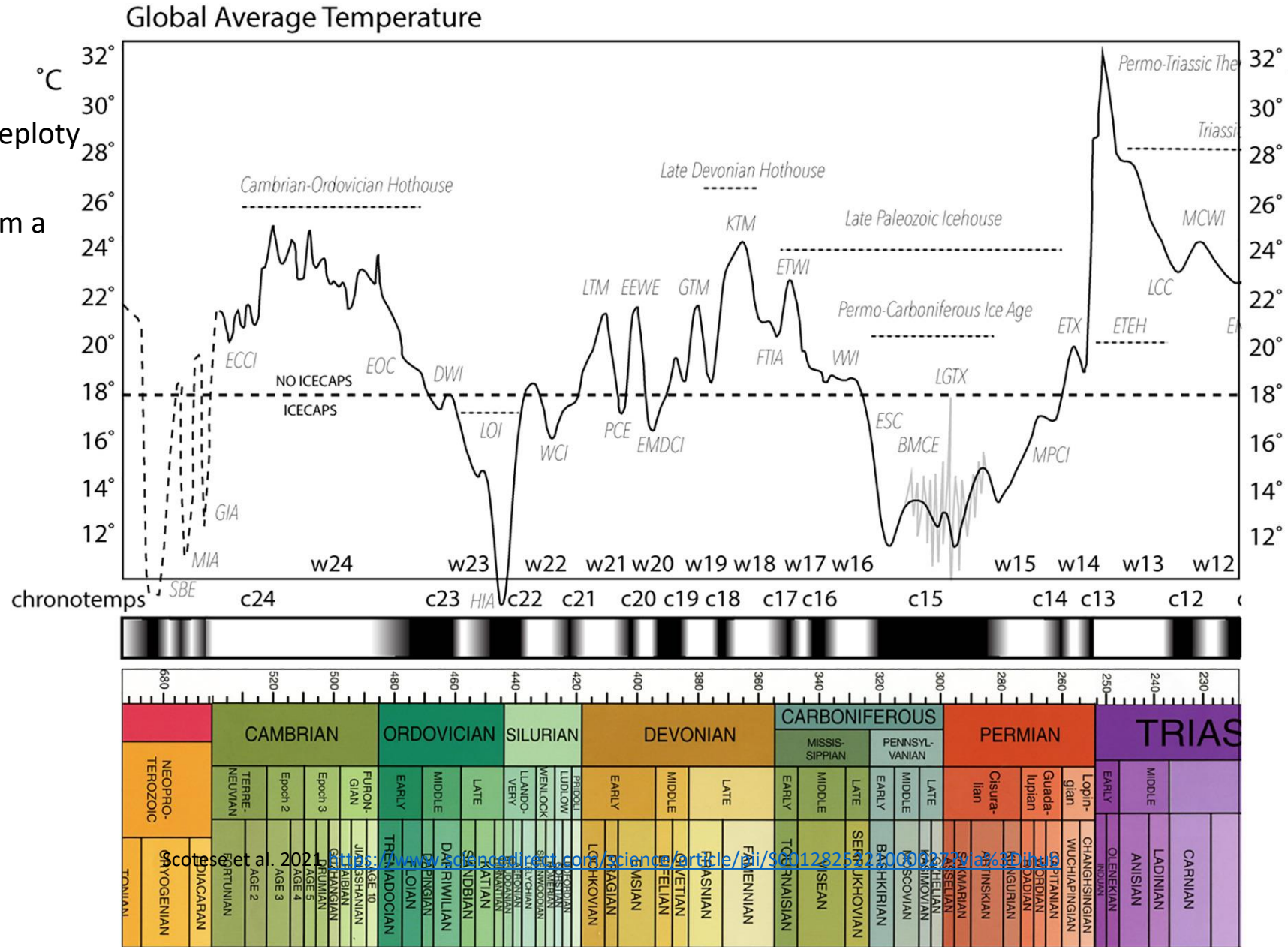
2024

Silur a devon – osidlování souše

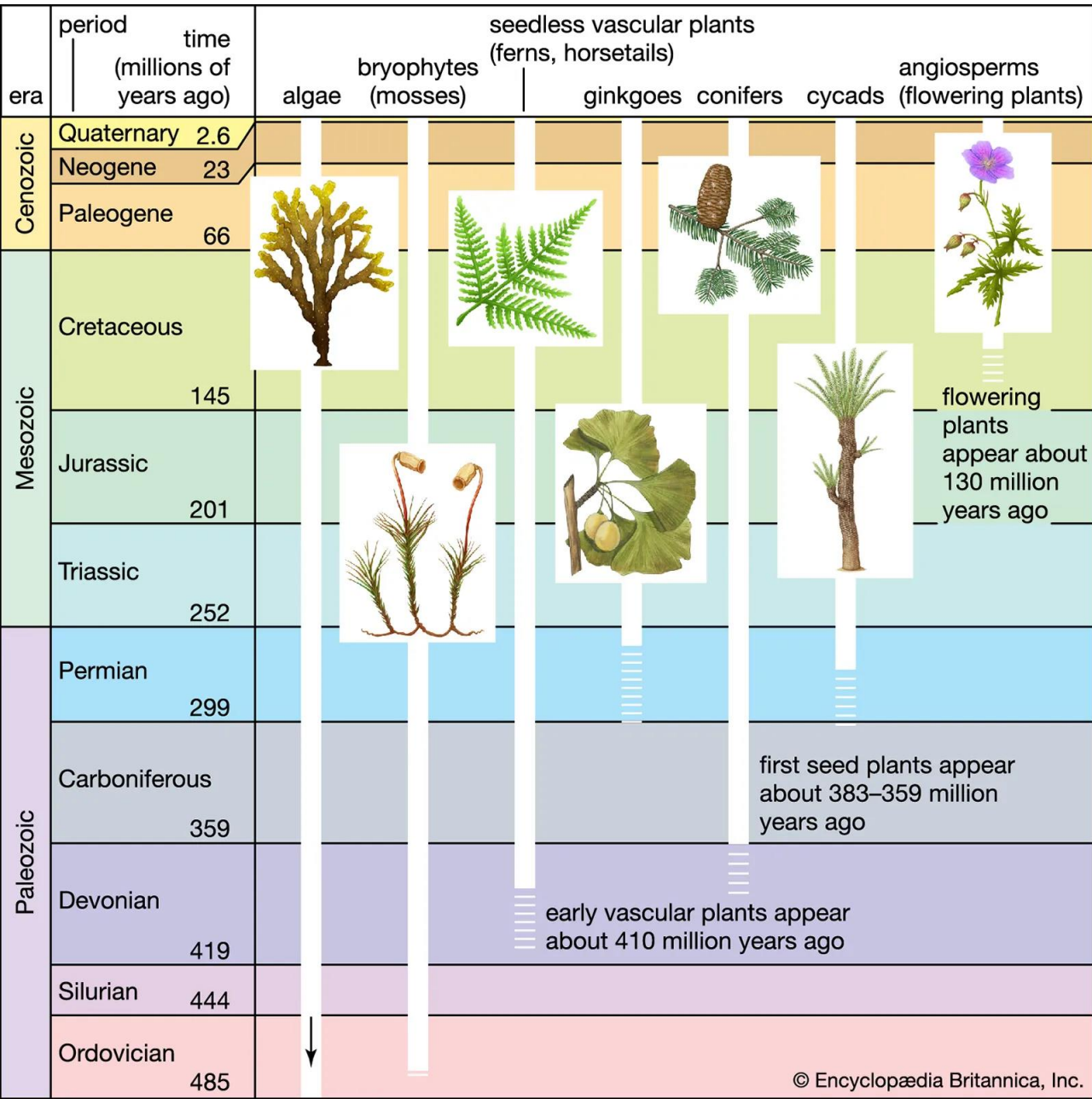
(podle keltského kmene Silurů a anglického hrabství Devon)

Silurské a devonské klima

- Od krátkodobé hirnantské glaciace globální teploty rostly
- Období extrémně teplého klimatu ve středním a pozdním devonu ukončily vlny ochlazení a krátkodobého zalednění jižního pólu (paleokontinent Gondwana)



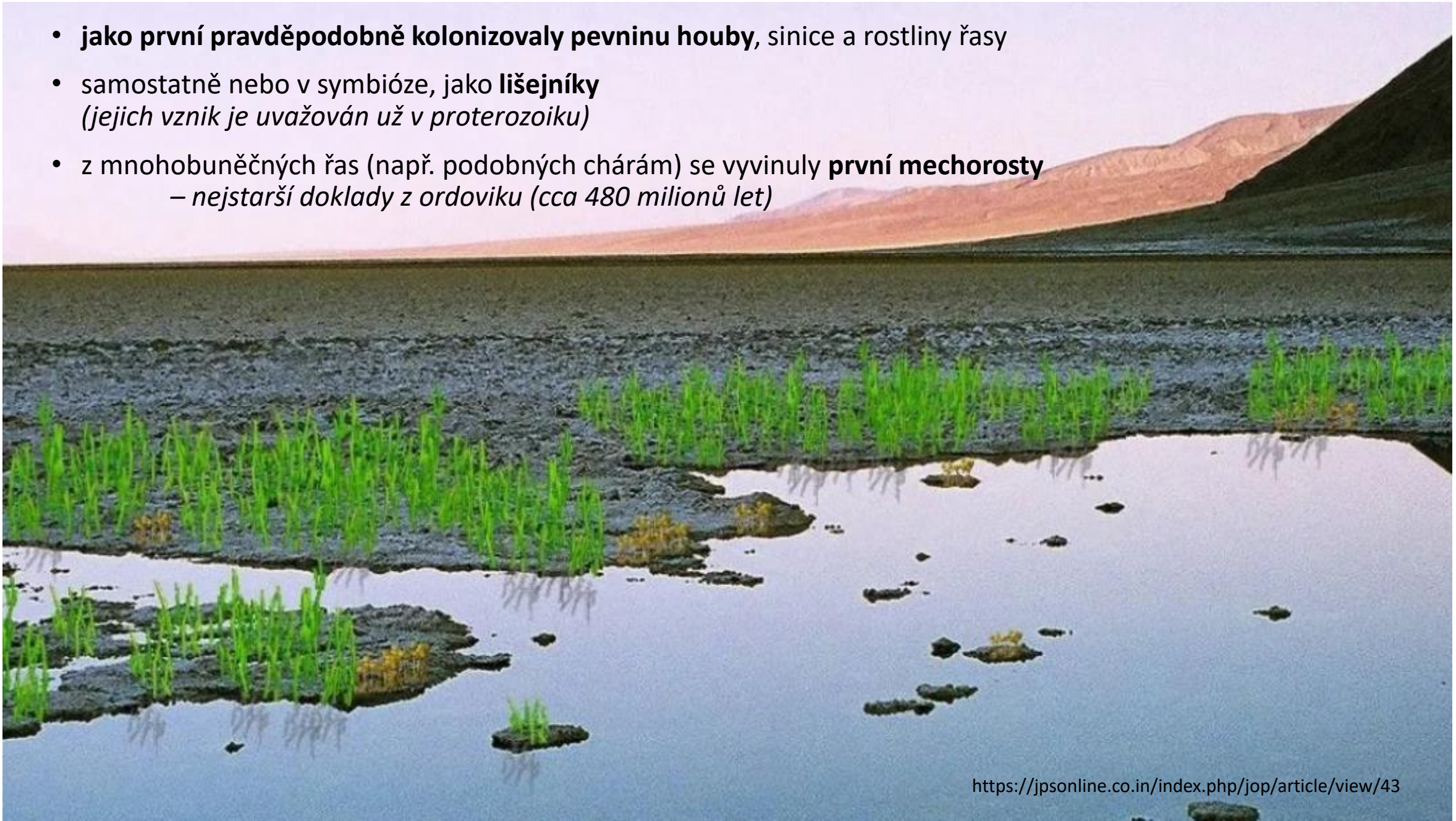
Vývoj rostlin



- Evoluční linie rostlin začala v proterozoickém moři, endosymbiózou prastarého eukaryotického organismu se sinicí
- další vývoj prodělaly rostliny v moři, kde byly zastoupené různými skupinami řas, nejprve jednobuněčnými, později mnohobuněčnými

Osídlování souše houbami a rostlinami

- jako první pravděpodobně kolonizovaly pevninu houby, sinice a rostliny řasy
- samostatně nebo v symbióze, jako **lišejníky** (*jejich vznik je uvažován už v proterozoiku*)
- z mnohobuněčných řas (např. podobných chárám) se vyvinuly **první mechorosty** – *nejstarší doklady z ordoviku (cca 480 milionů let)*

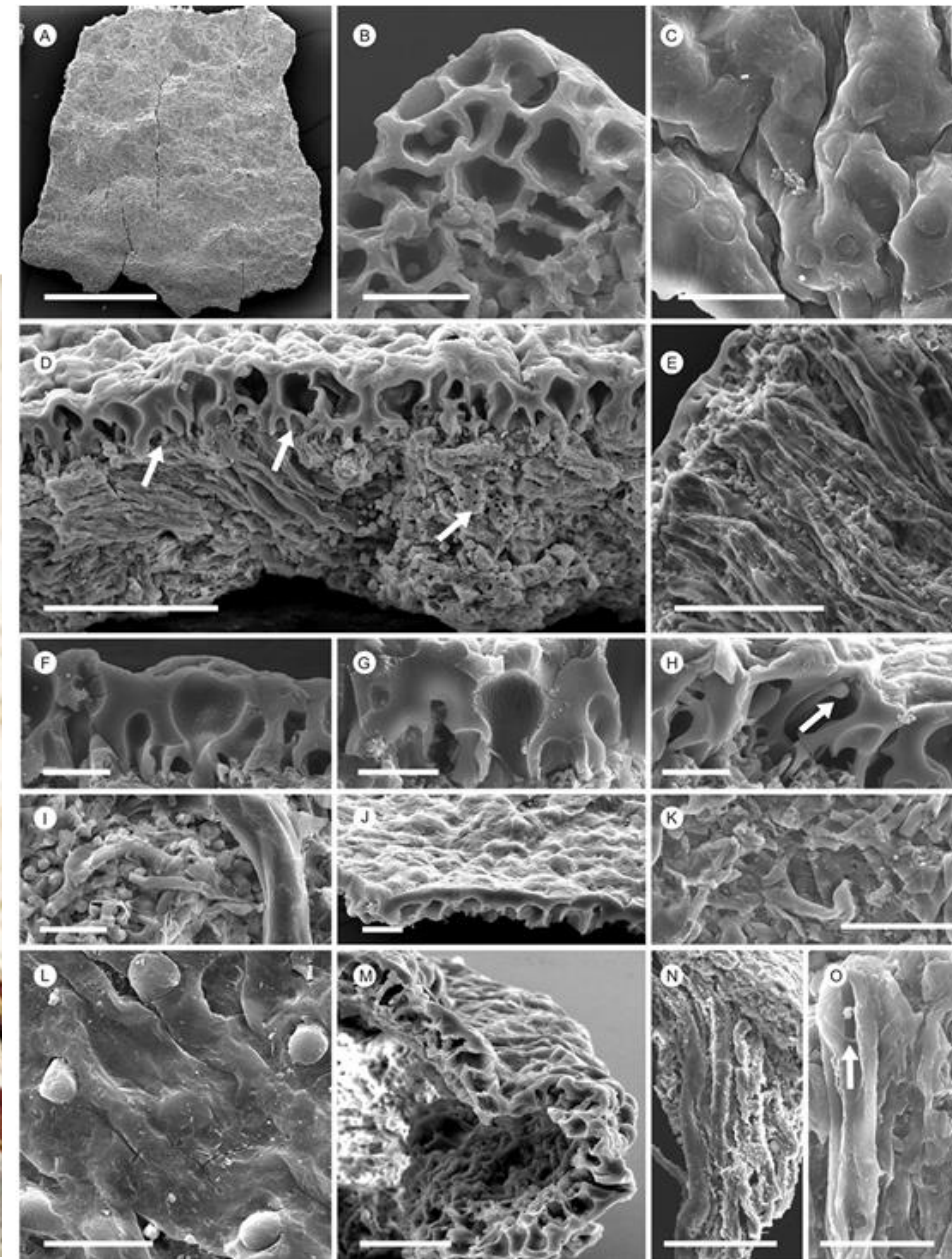


Nematofyty (ordovik-devon)

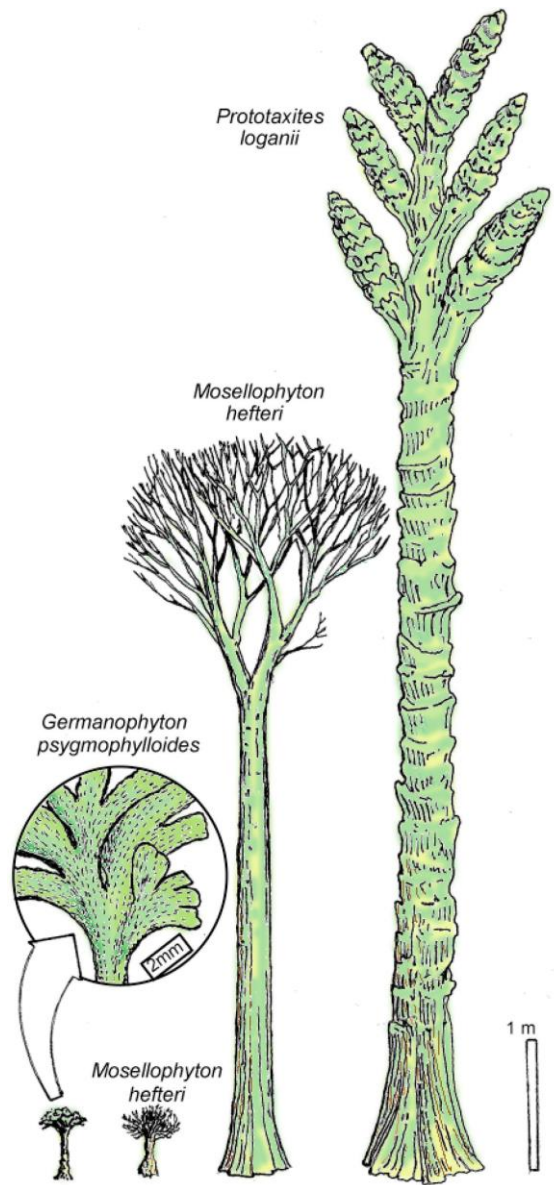
- velké lišejníky (zelená řasa + endomykorhizní houba)
- od siluru některé z nich gigantické
- první stromovité organizmy



A Prototaxites fossil in the desert of Saudi Arabia. Reprinted from Review of Paleobotany and Palynology, Vol. 116, "Rotted Wood-Alga-Fungus: The History and Life of Prototaxites Dawson 1959," by Francis Hueber, p. 146, Smithsonian Institution, Copyright 2001



D. Edwards, L. Axe, R. Honegger
Contributions to the diversity in cryptogamic covers in the mid-Palaeozoic: Nematothallus revisited
Bot. J. Linnean Soc., 173 (2013), pp. 505-534



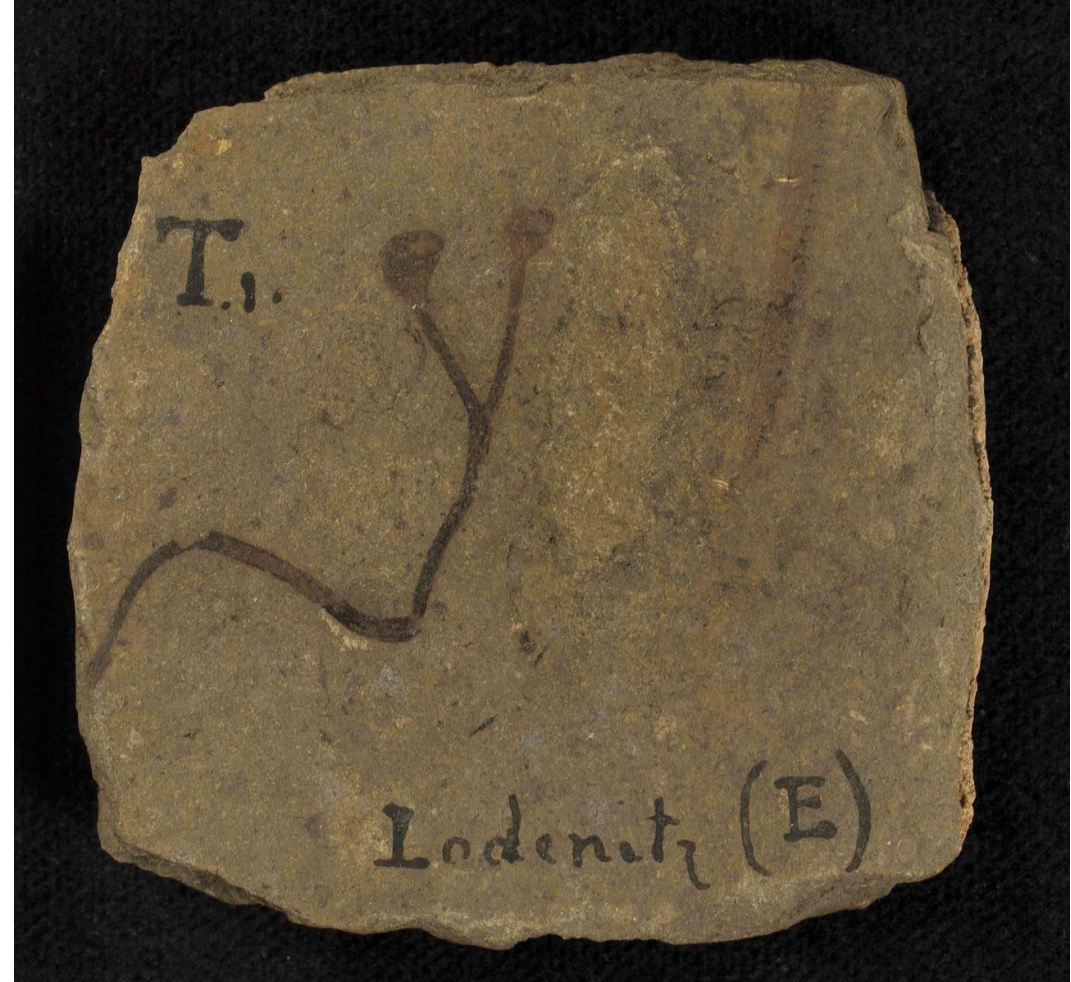
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X22000247>



- první cévnaté rostlin známe od siluru – velmi jednoduché výtrusné rostliny („psilofyta“/“rhyniofyta“), bez listů, kořenů
- nejstarší doklad pochází ze středních Čech (barrandienská oblast, Loděnice)
- *Cooksonia barrandei*



https://en.wikipedia.org/wiki/Cooksonia#/media/File:Cooksonia_sp._-_MUSE.jpg

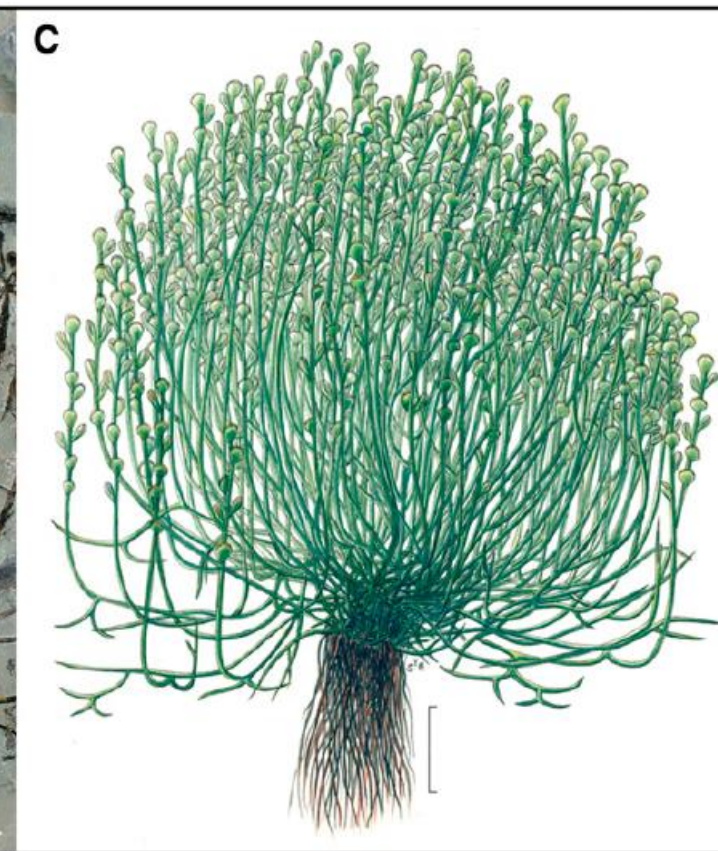
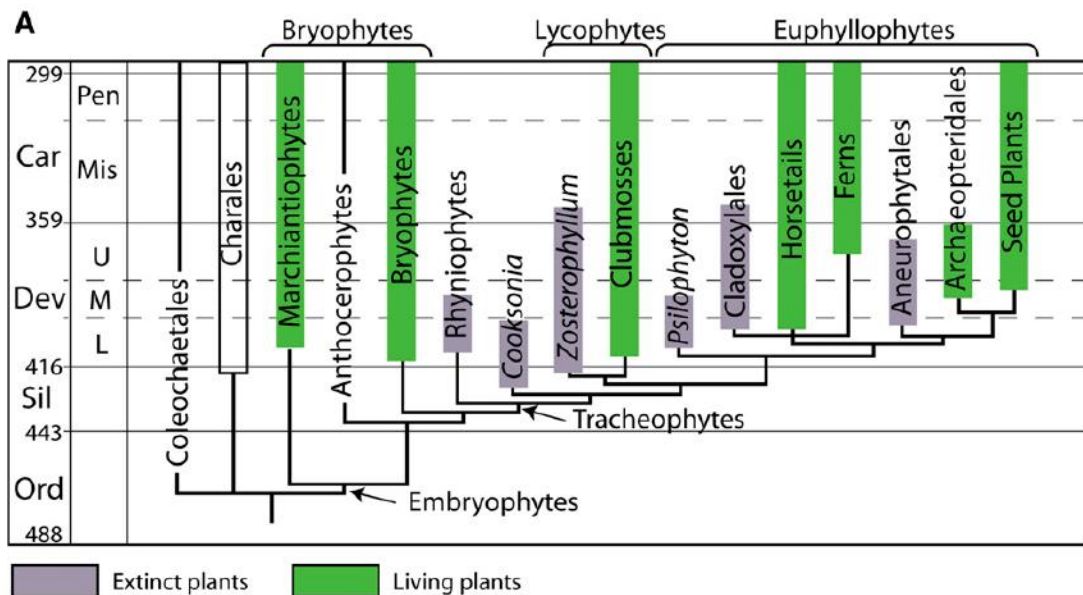


<https://www.nm.cz/en/about-us/science-and-research/the-earliest-vascular-terrestrial-plants-and-polymorphs-of-the-silurian-and-lower-devonian-periods-in-barrandien-czech-republic>

Vznik kořenů

- Kořeny vznikly u dvou evolučních větví rostlin nezávisle na sobě
 - 1) plavuňovité a 2) ostatní vyšší rostliny

- Vznik díky symbióze s mykorhizními houbami
- Kořeny umožnily rostlinám:
 - upevnění v substrátu (*na počátku vývoje vyšších rostlin nelze hovořit o půdě – rozvoj kořenů k ní ovšem vedl, viz dále*)
 - účinné získávání vody a živin

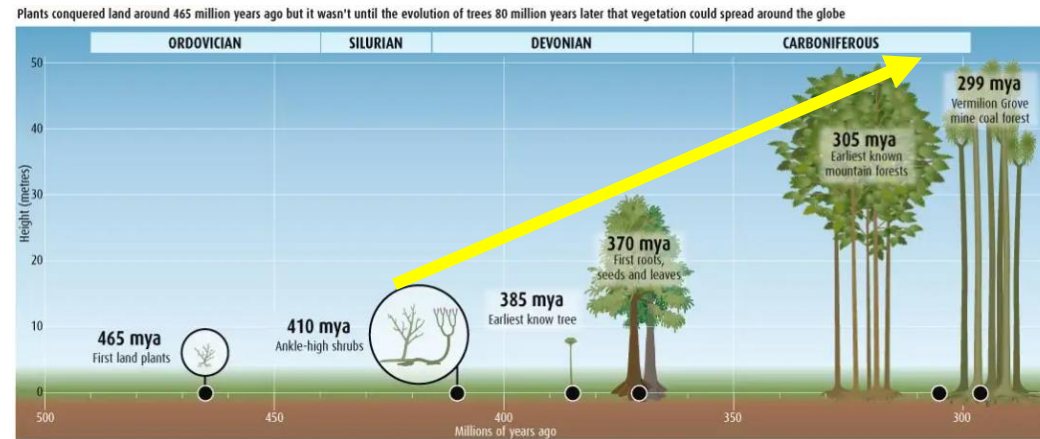


Zosterophyllum – raný devon (415 Ma) Čína; jedna z nejstarších rostlin s kořeny

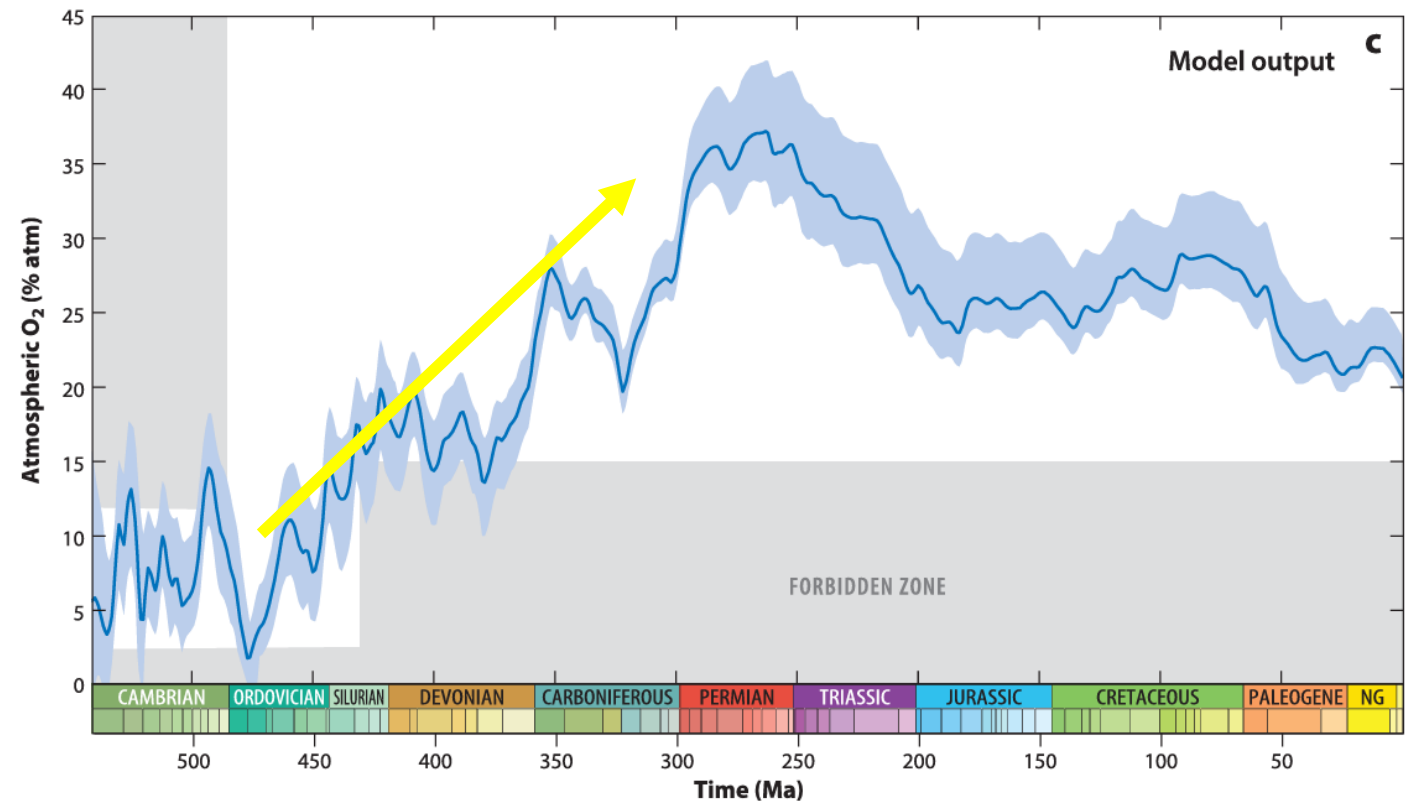
Vznik stromovitých forem rostlin

- Růst velikosti rostlin umožněn zvyšováním koncentrace O₂ v atmosféře
- Vznik prvních stromovitých výtrusných rostlin **plavuní**

*(smyčka pozitivní zpětné vazby – čím více rostlin, tím více O₂, tím více rostlin
... ačkoli hlavními producenty O₂ byly a jsou mořské řasy a sinice)*



<https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-earth-032320-095425?crawler=true&mimetype=application/pdf>



Vznik lesa

- vznik ekosystému lesa ve středním devonu – další zásadní milník globálních ekosystémů
 - zpevňování zvětralého povrchu Země kořenovými systémy a **vznik půd**



Calamophyton – strom nejstaršího lesa

<https://www.nhm.ac.uk/discover/news/2024/march/earliest-fossilised-forest-discovered-in-somerset.html>

<https://www.nature.com/articles/s43017-021-00249-6>

Počátek zalesňování ve středním devonu



Budování vlídné pevniny

- Lesní ekosystém buduje příznivé geomorfologické podmínky sám pro sebe (Biogeomorphic Ecosystem Engineering) podobně jako mořský organický útes
- Stromy zpevňují říční břehy a podporují tak vznik meandrujících řek tam, kde to další podmínky dovolují
- Meandrující řeky jsou klidné, díky klikatění stálých koryt zásobují krajinu vodou a uchovávají velké množství biomasy v záplavových plošinách a mrtvých ramenech - velké množství živin pro centrum biodiverzity na pevnině
- **Evoluce suchozemských rostlin, prvních cévnatých rostlin, prvních stromů a poté celých lesních ekosystémů měla dalekosáhlé důsledky pro dynamiku zemského povrchu – lesy vytvářejí podmínky pro vznik meandrujících řek**

Divočící řeka

- Časté překládání koryt, výrazná eroze, divoká řeka jako za povodně



<https://i0.wp.com/eos.org/wp-content/uploads/2021/04/braided-river-new-zealand.jpg?fit=820%2C615&ssl=1>

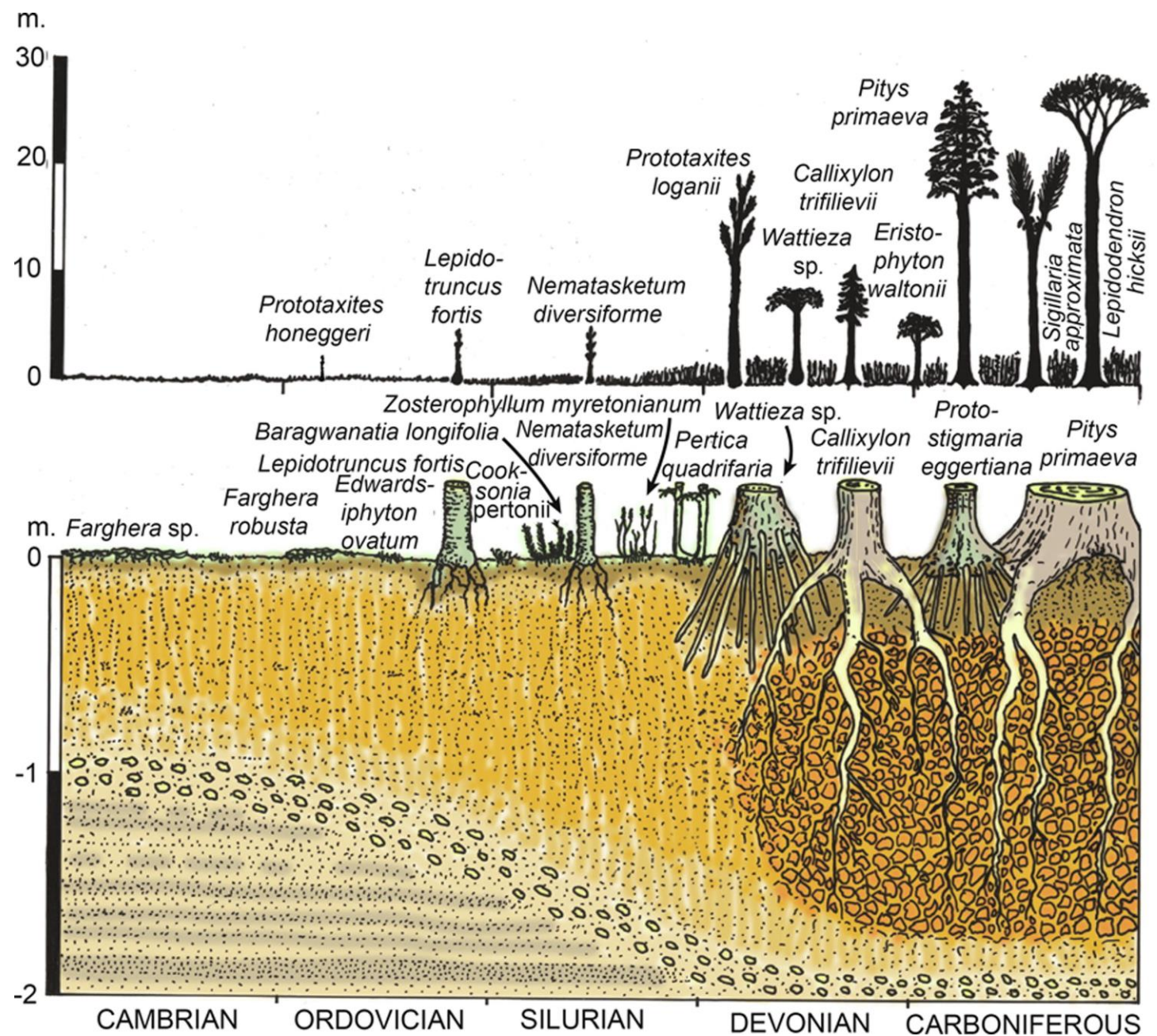
Meandrující řeka – vznik zákrut (meandrů), zpomalující tok vody



<https://facts.net/science/geography/18-astounding-facts-about-river-meanders/>

- vliv hluboce zakořeněných cévnatých rostlin,
zejména stromů na :

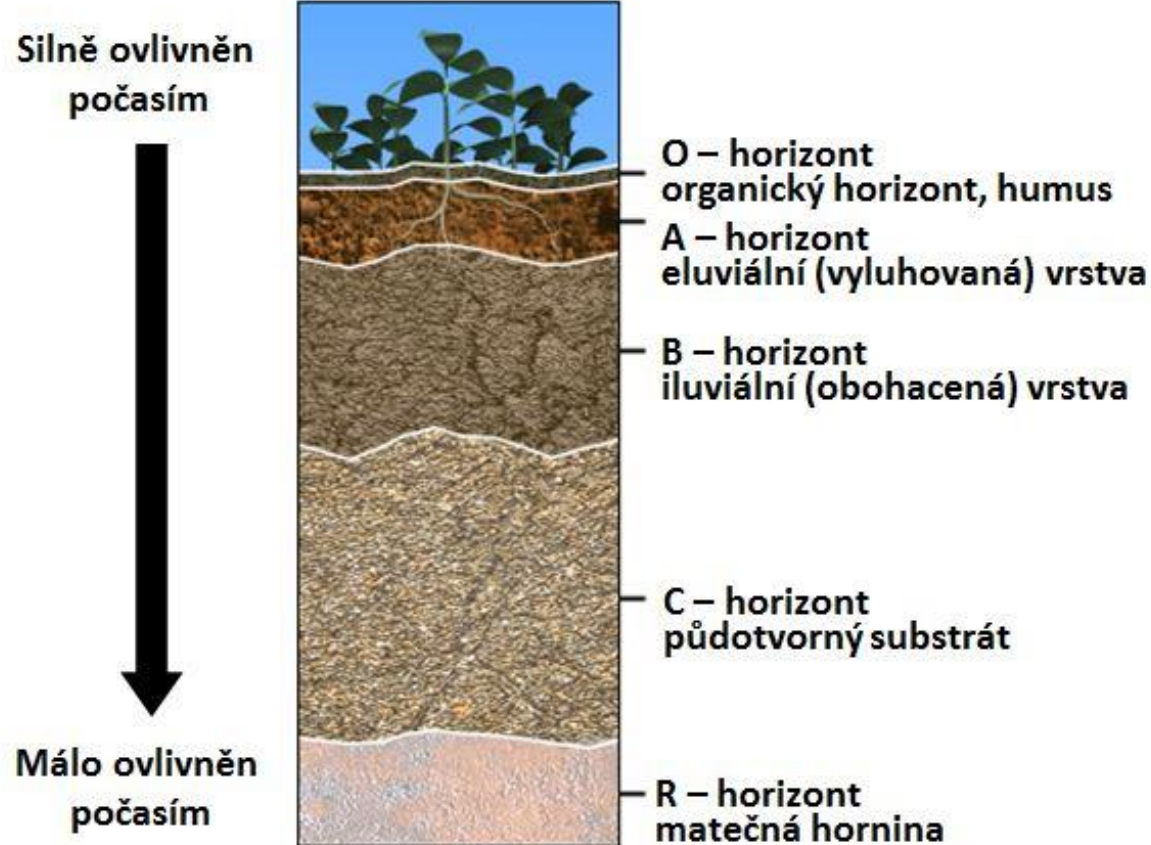
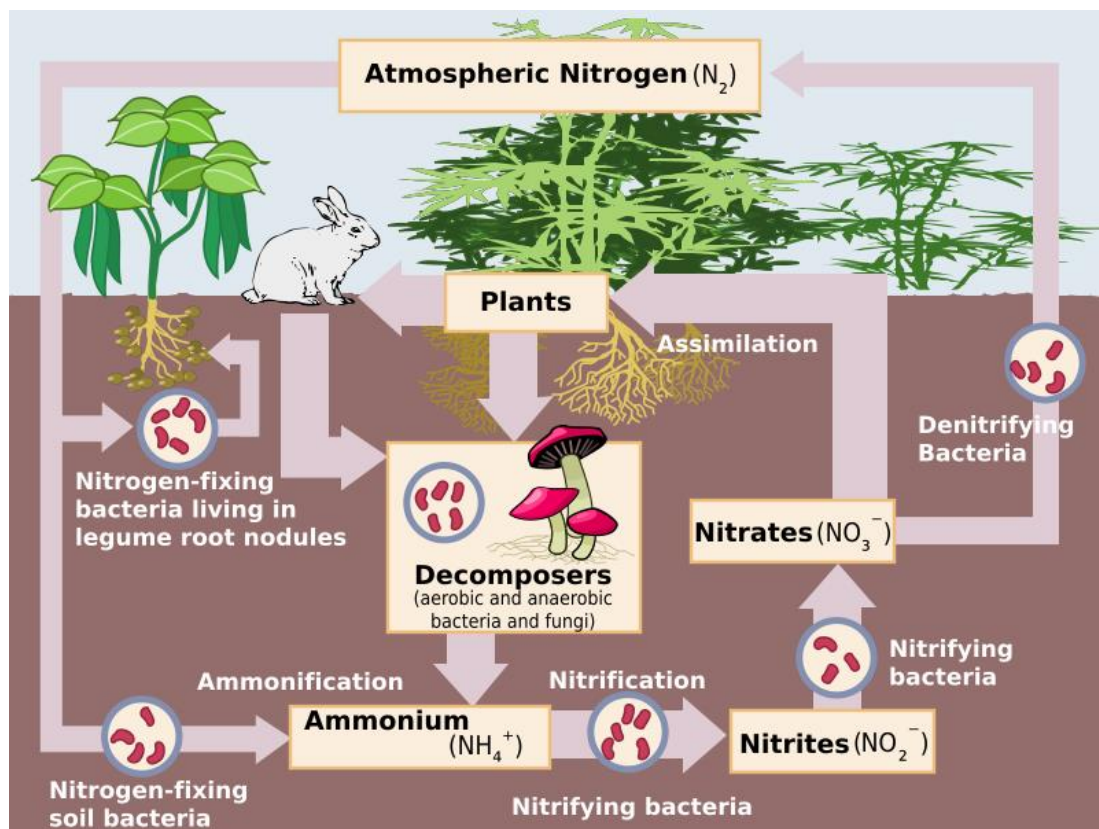
- zpevňování břehů
- zvětrávání
- pedogenezi
- transport živin
- koloběh CO₂, ukládání uhlíku



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X22000247>

Vznik půdy

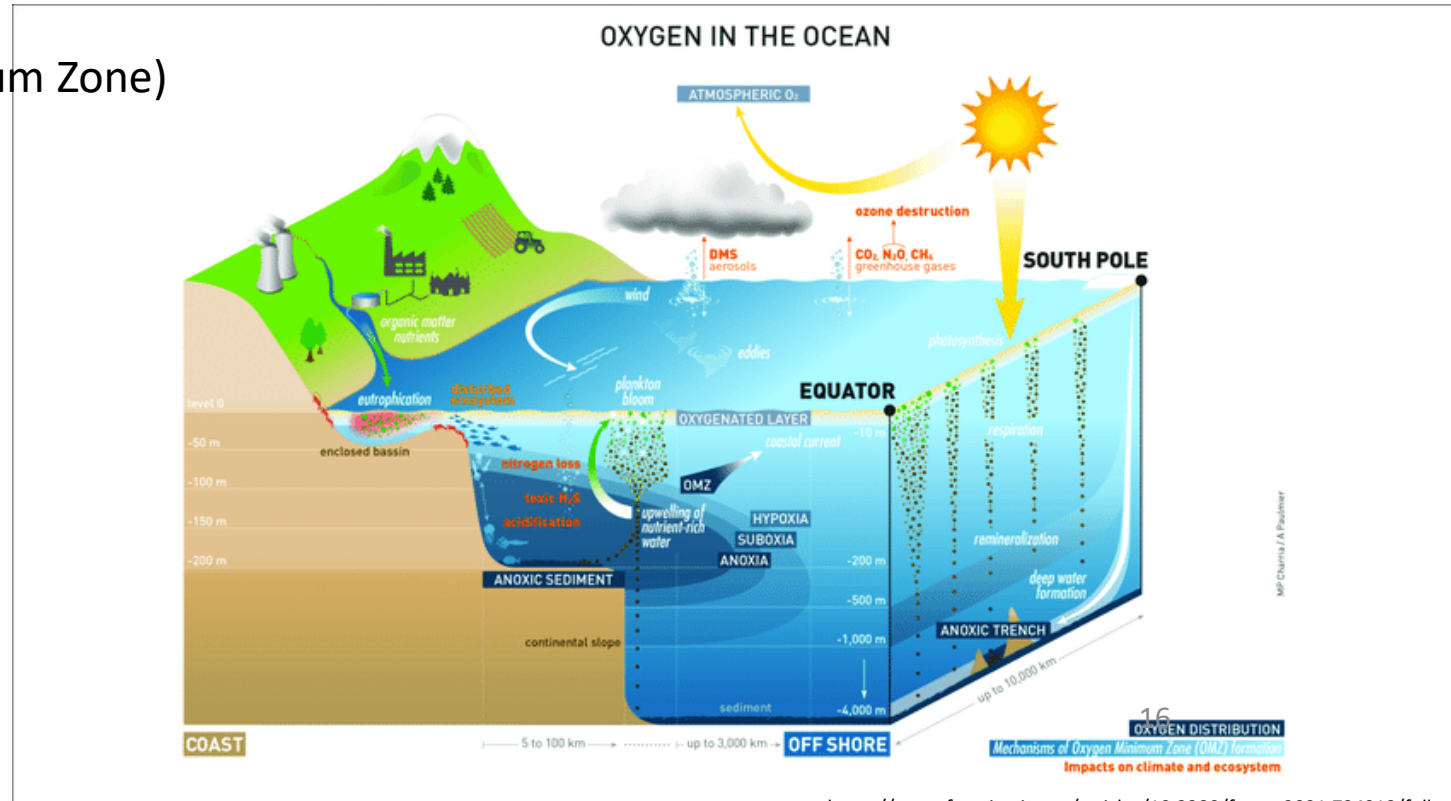
- do rozvoje kořenových systémů nebyl nejvyšší sedimentární pokryv tvořen půdami, ale pouze **zvětralinovým pláštěm** (svrchní vrstva „rozpadlých kusů hornin“)
 - ve spolupráci s prokaryoty, houbami i živočichy rostliny s jejich kořenovými systémy velmi intenzivně změnily zvětralinový obal Země na **půdu** procesy **pedogeneze**
 - „druhá zemědělská revoluce“
- Stejně jako během kambrické zemědělské revoluce došlo k zásadním změnám stylu „v hospodaření“ látkových cyklů (hlavně uhlík, dusík, fosfor, síra) a chemického složení oceánů i atmosféry



Devonské ekologické katastrofy způsobené vznikem lesa?

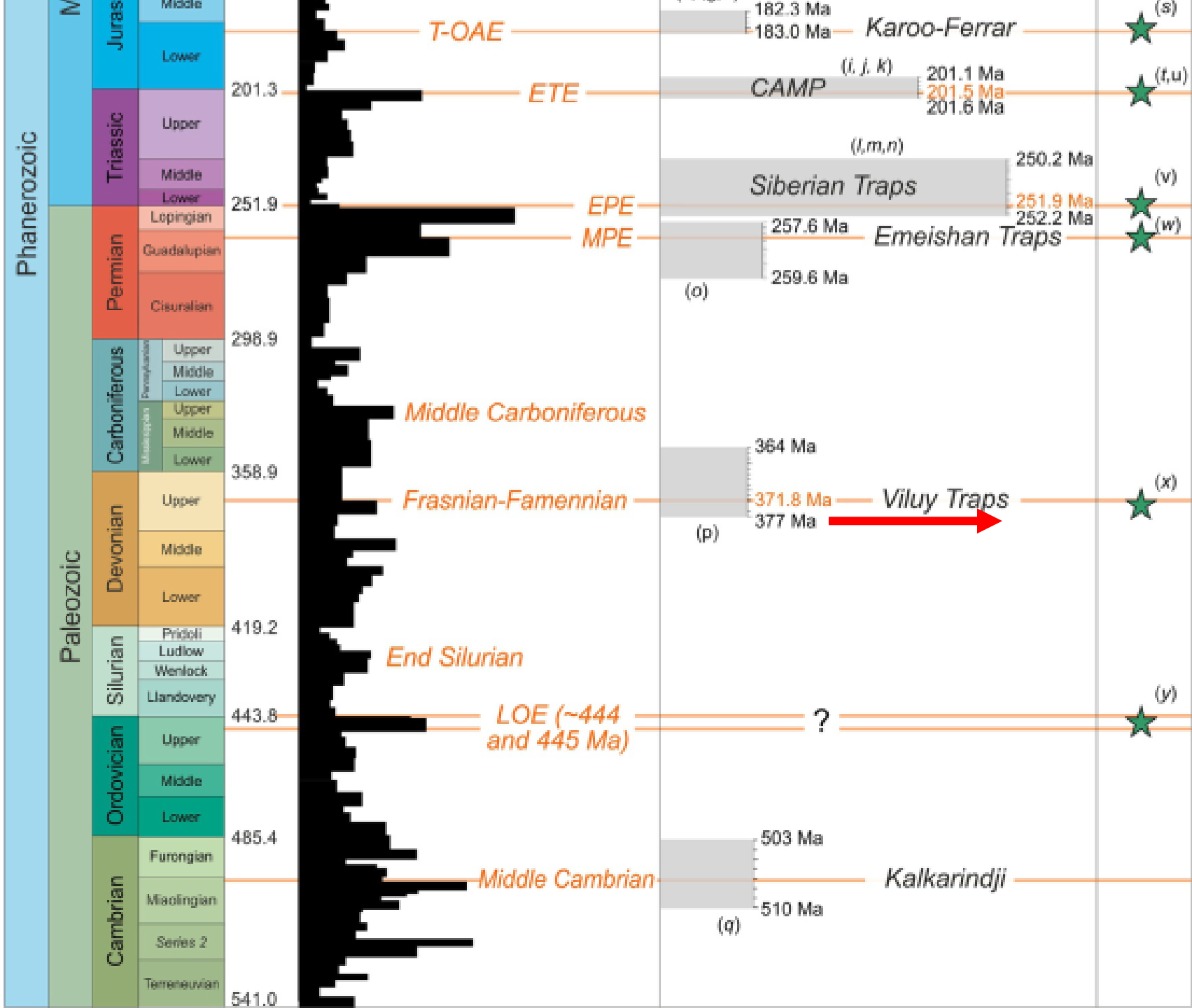
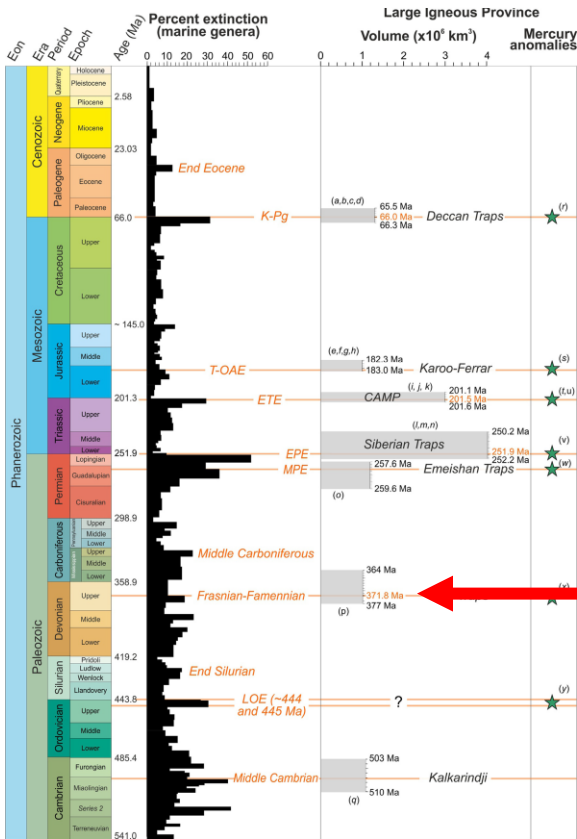
- Ve stejné době, kdy se rozvíjely pevninské ekosystémy, docházelo poměrně často ke globálním poklesům prokysličením oceánů (**anoxické události, globální anoxické eventy**)
- Značná část živin, které vznikaly díky pedogenezi, byla splachována do oceánu řekami při povodňových stavech
- Drastický „injektažní“ růst živin v oceánech vedl k eutrofizaci („překrmení“) oceánů a přemnožení sinic („vodní květ“)
- **odumřelá biomasa v oxických podmínkách rozkládána metanogenními bakteriemi oxidačně-redukční disproportionací uhlíku**
- **Spotřeba kyslíku a vznik CO₂** - při vysoké produktivitě biomasy jsou vody ochuzené o kyslík (anoxie) a velmi kyselé (mnoho CO₂)
- Poklesu kyslíku ve vodě (mrtvé zóny, Oxygen Minimum Zone)
- **Anoxické události byly ve středním a mladším devonu poměrně časté**

(podobně časté budou ještě v dalším období hothouse klimatu – v křídě)



Hlavním spouštěčem apokalyptických změn prostředí na konci devonu byla pravděpodobně aktivita ve **viluyské velké magmatické provincii** („supervulkán“; východní Sibiř)

- Toxikace prostředí + ochlazení + oteplení + nárůst přínosu prvkových makronutrient (Fe, Zn, Cu atd.)



Vznik vrstev černých břidlic

- Nárůst živin z většího biochemogenního zvětrávání kontinentů s přispěním živin z vulkanizmu došlo opakovaně k eutrofizaci oceánů a vyvolání globálních oceánských anoxických událostí
- Vznikly organikou bohaté břidlice (z nich získáváme břidličný plyn anebo vznikla ropa) – **černé břidlice** – které pokryly mnoho mořských pánví

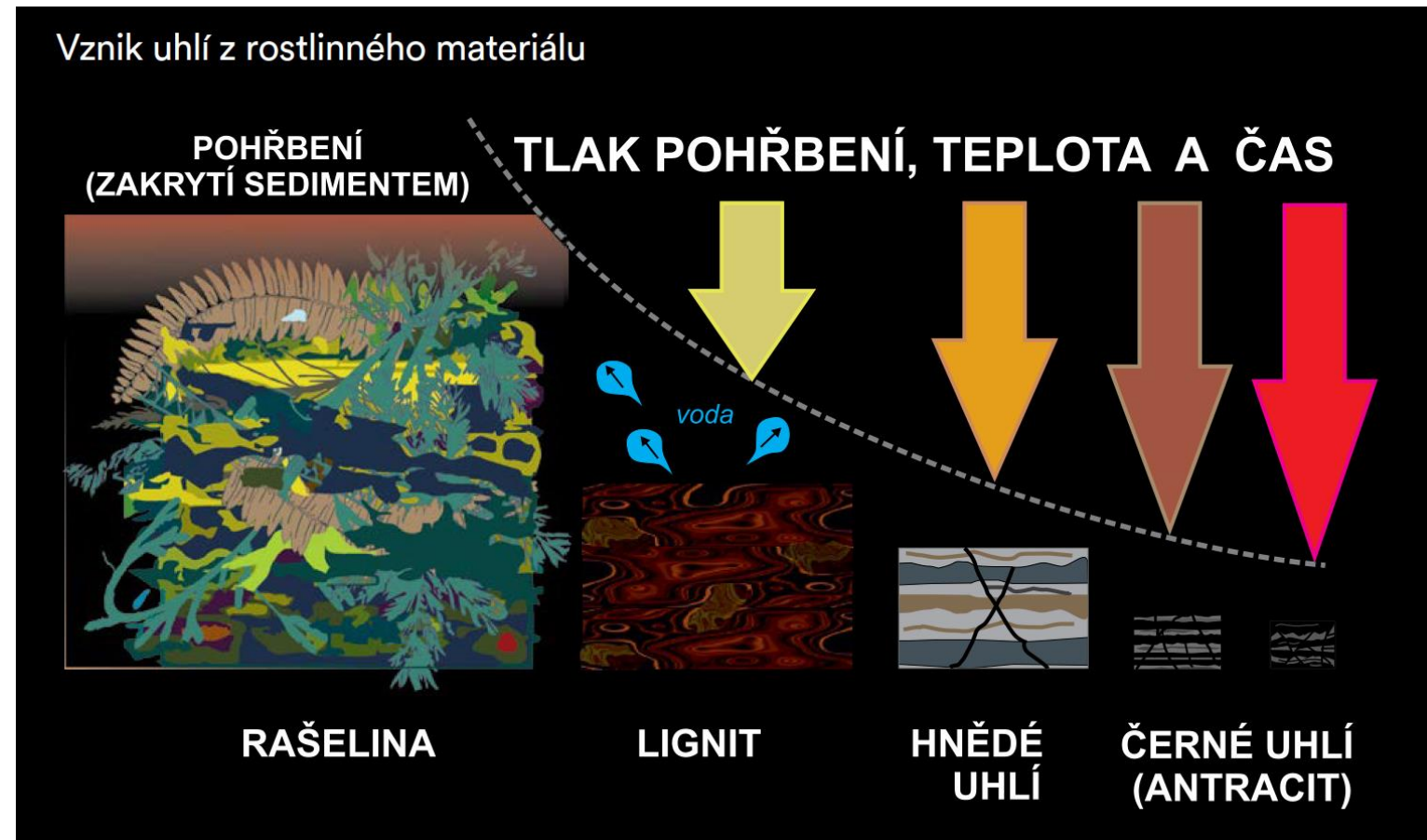


- Z atmosféry mizí CO₂ (**C do sedimentu**) což vedlo k rychlému ochlazení
- Ochlazení vede k růstu ledovců, poklesu hladiny oceánů, obnažování hornin ke zvětrávání (**odjímání CO₂**) a většímu snosu zvětralin do oceánů (opět přínos živin) - zvýšení produktivity, větší pohřbívání organické hmoty – **odjímání CO₂**)



Doba ledová vyvolaná nástupem lesů?

- **uhlík nebyl ukládán jen do černých břidlic** (jak tomu bylo už od prekambria)
- Lesy **neovlivňovaly** zvyšování ukládání C do sedimentu pouze změnou intenzity zvětrávání
- **Počátek tvorby mocných vrstev rašeliny a uhlí** – vznik nového rezervoáru uhlíku v rychlém (biologickém, povrchovém) cyklu uhlíku
- CO₂, které rostliny využijí při fotosyntéze je použito pro stavbu organických molekul rostlinných pletiv atd.
- především lignin se může hromadit v močálech (jezerní pánve bez přístupu kyslíku) ve velkém objemu
- z atmosféry tak mizí CO₂ a narůstá koncentrace O₂



Rozvoj černouhelných deštných pralesů

- Nejobtížnější ložiska uhlí vznikla v mladším paleozoiku – v karbonu – „kamenouhelném období“
- enormní tvorba uhlí v karbonu vysvětlována až pokarbonským vznikem/rozvojem dřevokazných hub (schopných rozkládat lignin)



<https://www.woodwildpark.org/fungi/2010/p8270540m.jpg>

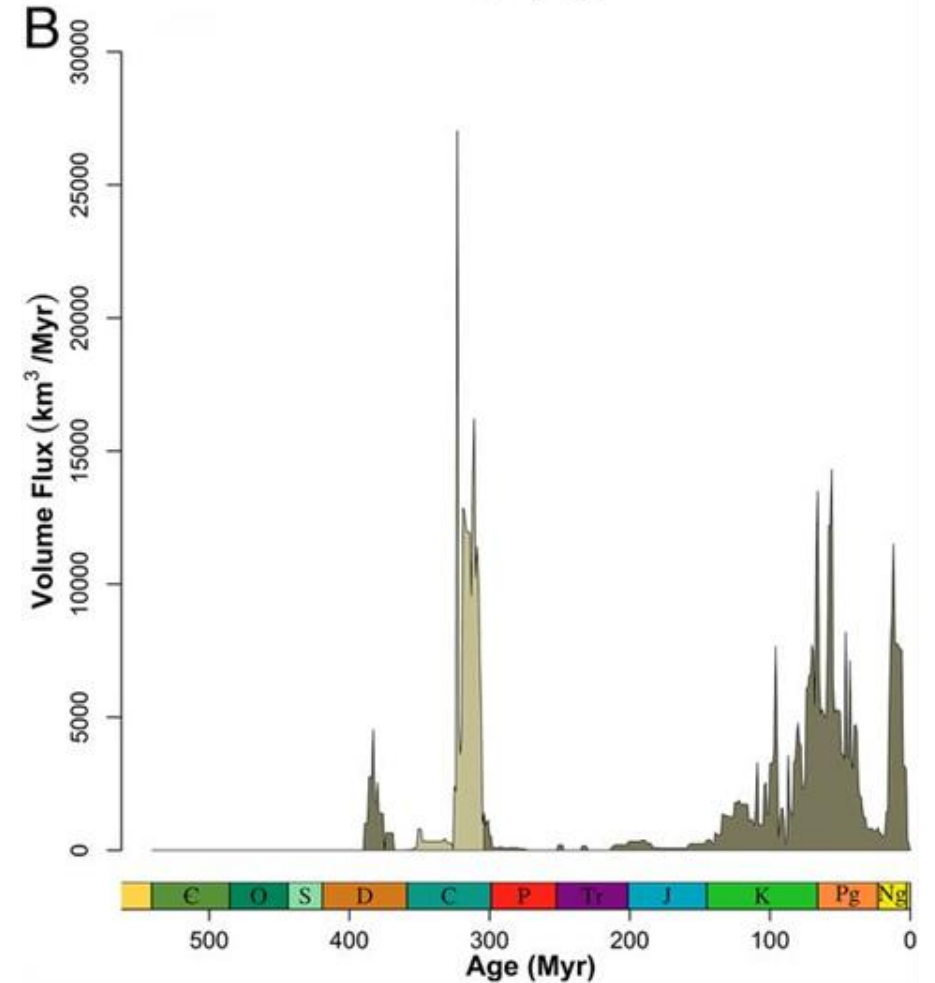
- Rozpory teorie:

- 1) pokud by karbonská vegetace dosahoval jen 25 % rozsahu současné, uhlík ligninu (a další biomasy) by se hromadil rychlostí asi tří gigatun za rok
 - Za tisíc let by se tak nahromadil takový objem uhlí, který vznikl za celé fanerozoikum
 - Uhlík by se pak mohl hromadit ještě milion let, než by atmosférický CO₂ klesl na nulu a skleníkový efekt by nebyl účinný

2) nálezy devonských rostlin s rozkladem srovnatelným s projevy působení dřevokazných hub



Současný rozklad pletiva dřevokaznými houbami



<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1517943113>

Míra akumulace severoamerických organických sedimentů (uhlí, rašelina, lignit, antracit a dehet) v průběhu času.

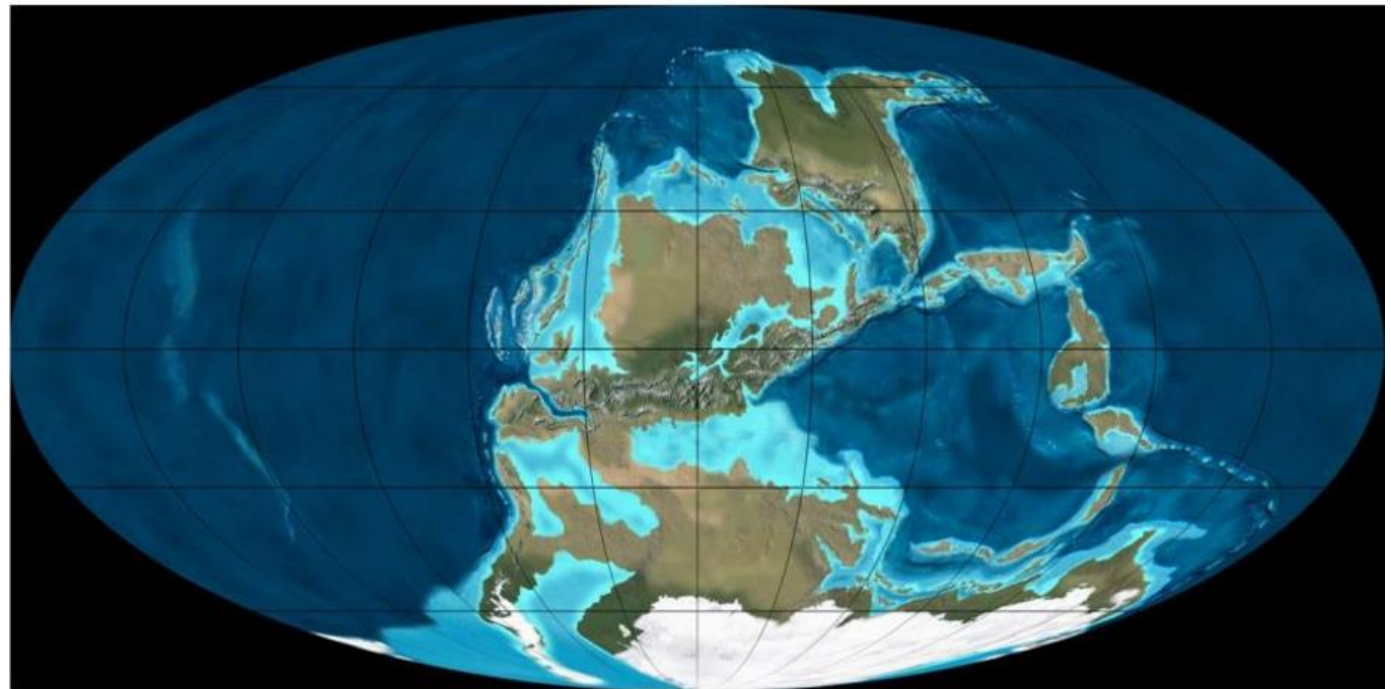
Rozklad pletiva ze svrchního devonu, zachovalé hyfy hub

<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1517943113>

Pro vznik uhlí je potřeba :

- 1) Vznik uhelné biomasy (lignin atd. = velké množství stromů)
- 2) Bažinatá prostředí s vodou bez kyslíku, kde se může hromadit ve velkém rašelina
- 3) Rychlé prohlubování a vyplňování pánve stále novými sedimenty a jejich pohřbení do značných hloubek s patřičnou teplotou a tlakem, při které dojde k přeměně rašeliny na uhlí

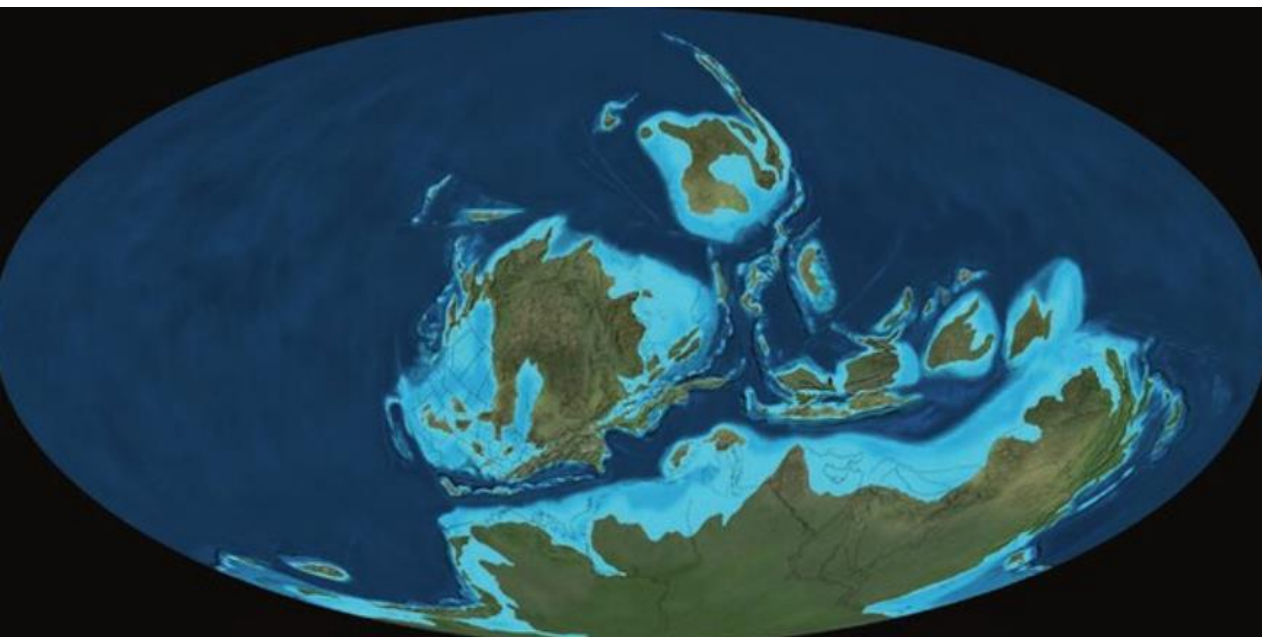
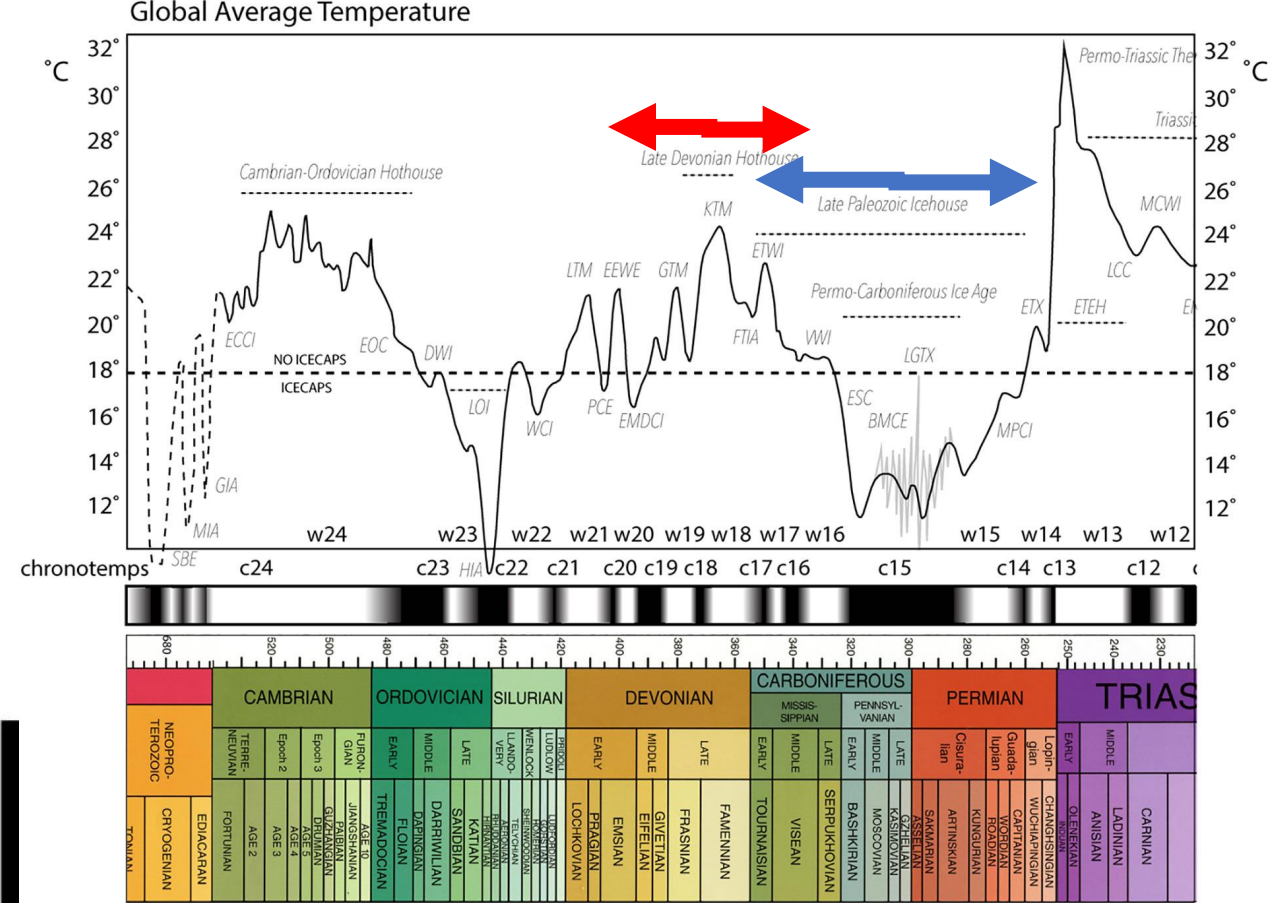
- během karbonu došlo ke **srážce kontinentů a vzniku superkontinentu Pangea**
- v tropickém vlhkém pásu bylo vyvrásněno pohoří (Apalače, evropské variscidy = část tvoří Český masiv)
- **vznik poklesávajících pánví na obou stranách pohoří podél rovníku**
- z hor byl dopravován sediment, který byl společně s rašelinou pohřbíván do hlubokých pánví



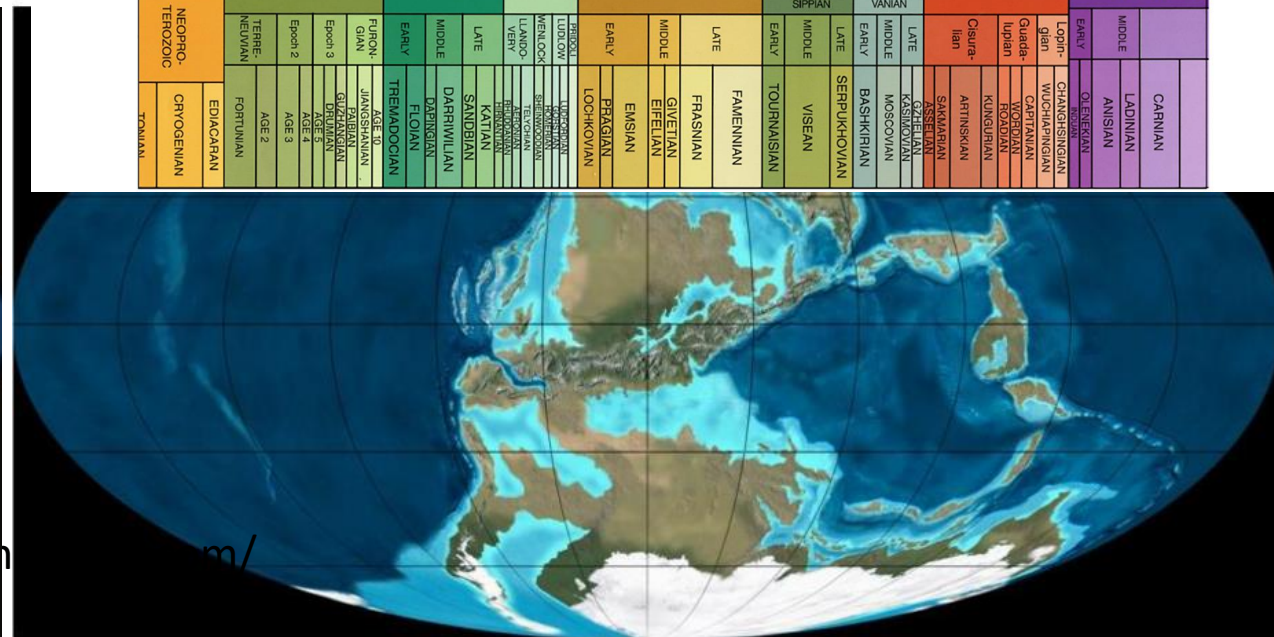
Pennsylvanian - 300 Ma

- Rozšiřování lesních ekosystémů přispívalo k odeběrání CO₂ z atmosféry a vedlo k nástupům dob ledových
- Devonské klima bylo velmi teplé (**greenhouse klimatický režim** – bez ledovců na pólech) – ekosystémy uvyklé na teplo vymíraly
- **V karbonu pak nástup nejdelšího zalednění fanerozoika - pozdně paleozoický ice-house klimatický režim (pozdně paleozoická doba ledová)**

Glaciace Gondwany (jižní Indie, Austrálie, Antarktida, severovýchodní Sibiř)



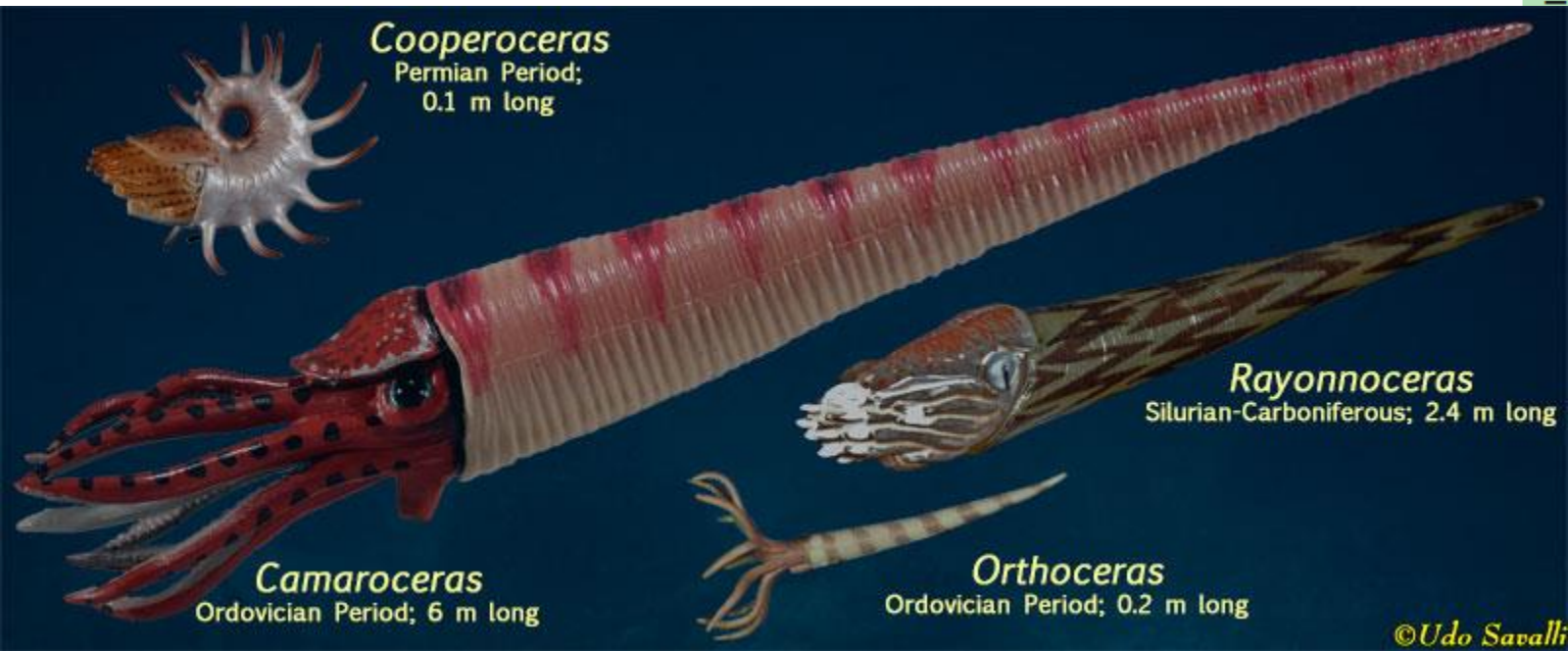
Pozdní devon (370 mil. let)



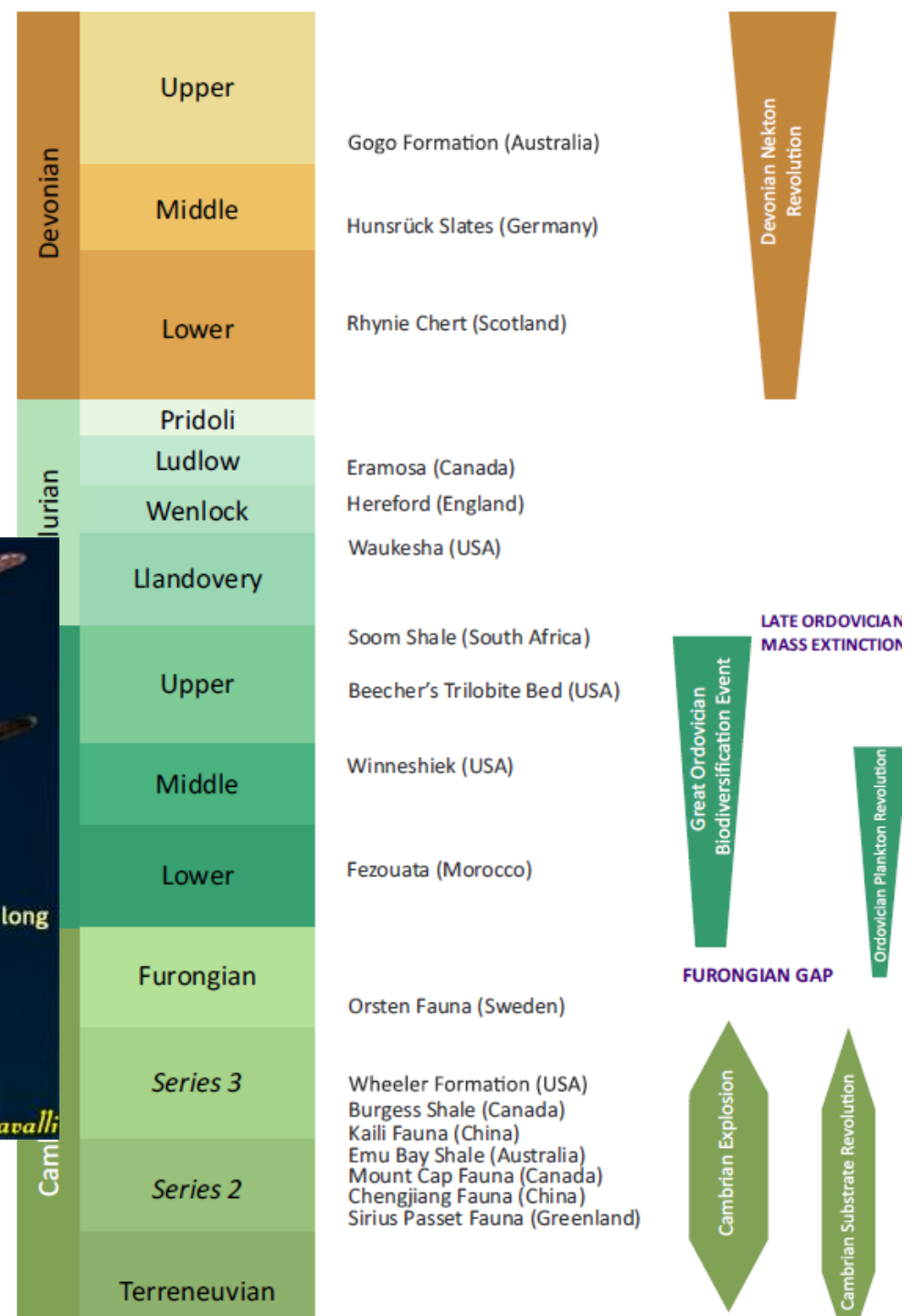
Pozdní karbon (300 mil. let)

Revoluce nektonu

- Mořské planktonické a bentické ekosystémy byly komplexně rozvinuté od siluru
- V devonu probíhá **revoluce nektonu** - rozvoj volně a aktivně plovoucích organismů
- Rozvoj loděnkovitých hlavonožců už od ordoviku - ordovik-silur na vrcholu potravního řetězce
- V devonu nástup a významný rozvoj hlavonožců amonoidů



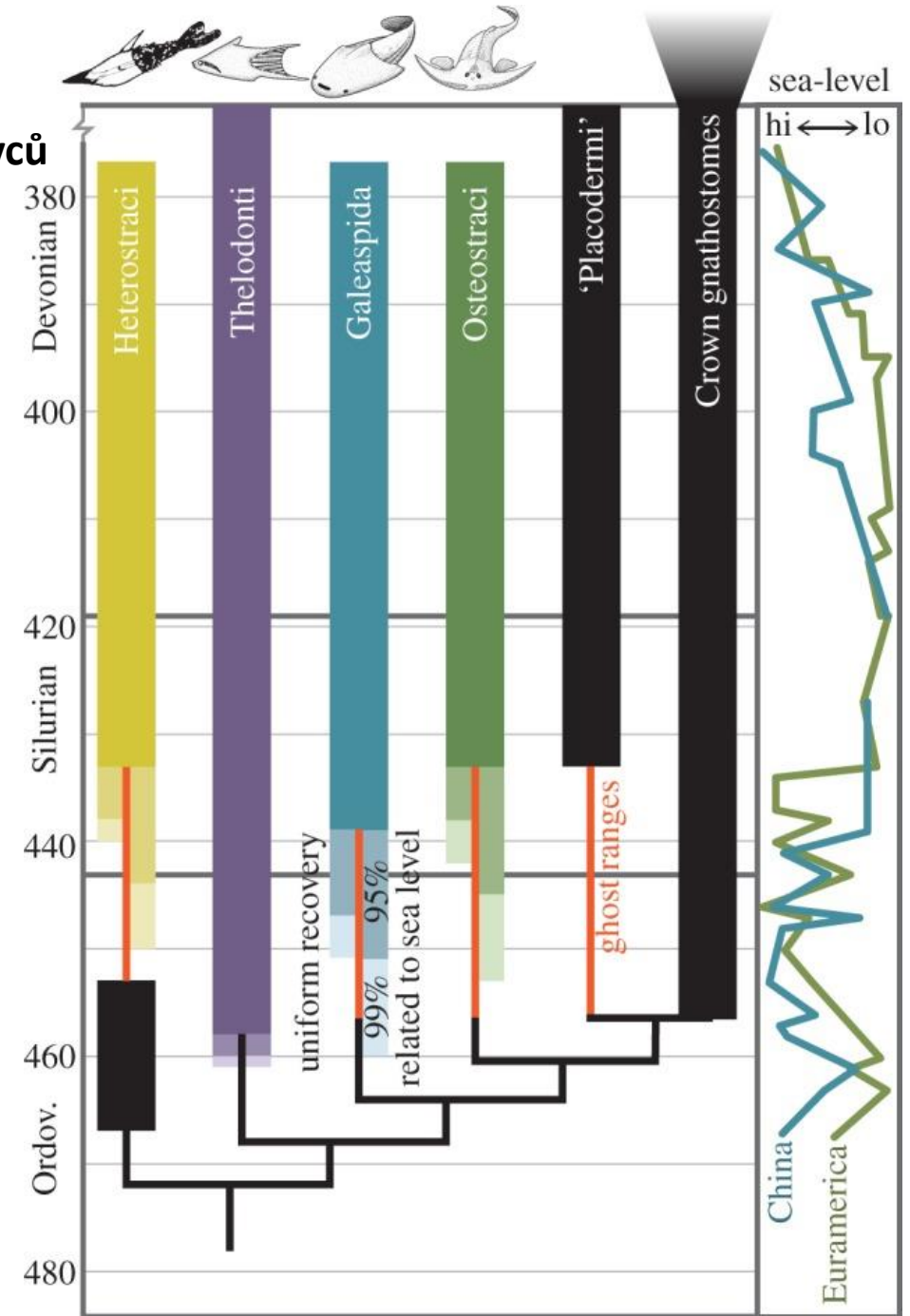
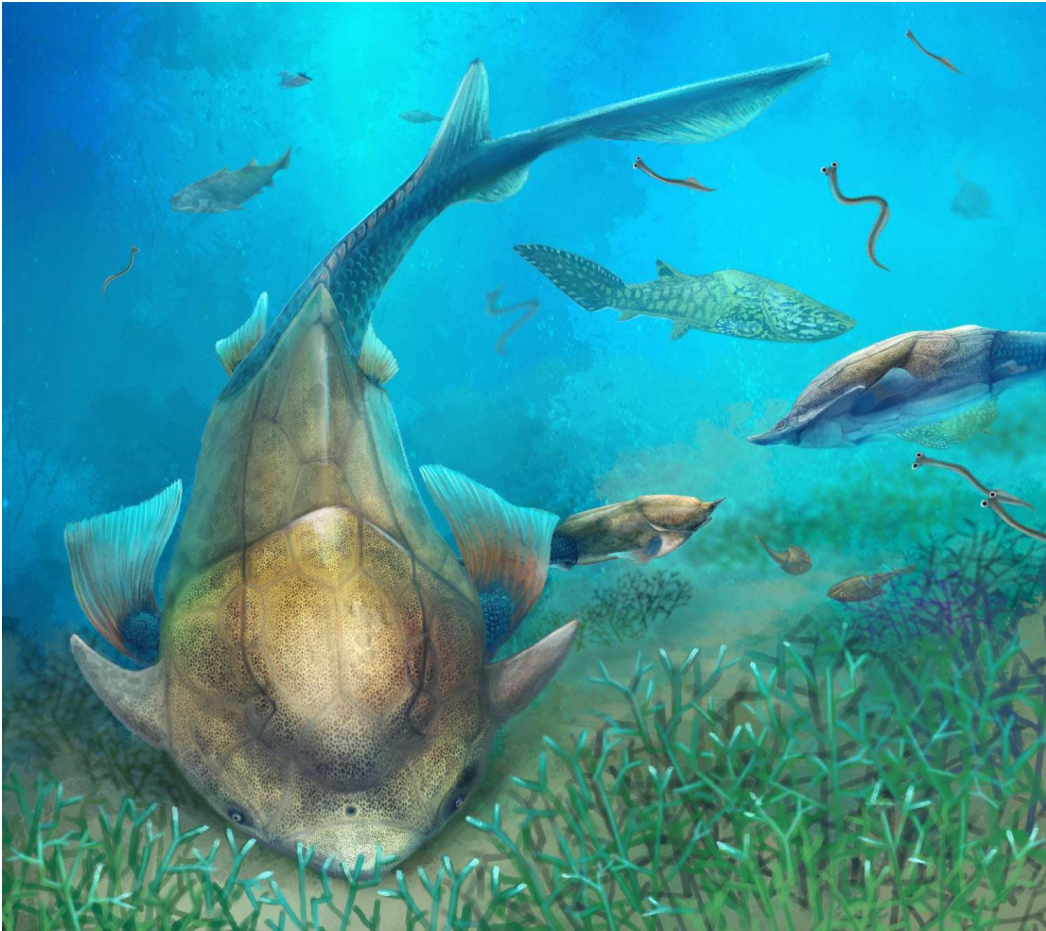
<https://www.savalli.us/BIO385/Diversity/10.Cephalopoda.html>



Revoluce nektonu a obratlovců

- Revoluce nektonu je především spjata s diverzifikací **rybovitých obratlovců**
- První strunatci a bezčelistnatci v kambriu
- Diverzifikace bezčelistnatých ryb od ordoviku a především pak v siluru
- Čelistnatci (evoluční větev směřující k člověku) taktéž od ordoviku

<https://www.sci.news/paleontology/qilinyu-rostrata-silurian-fish-china-jaw-evolution-04297.html>



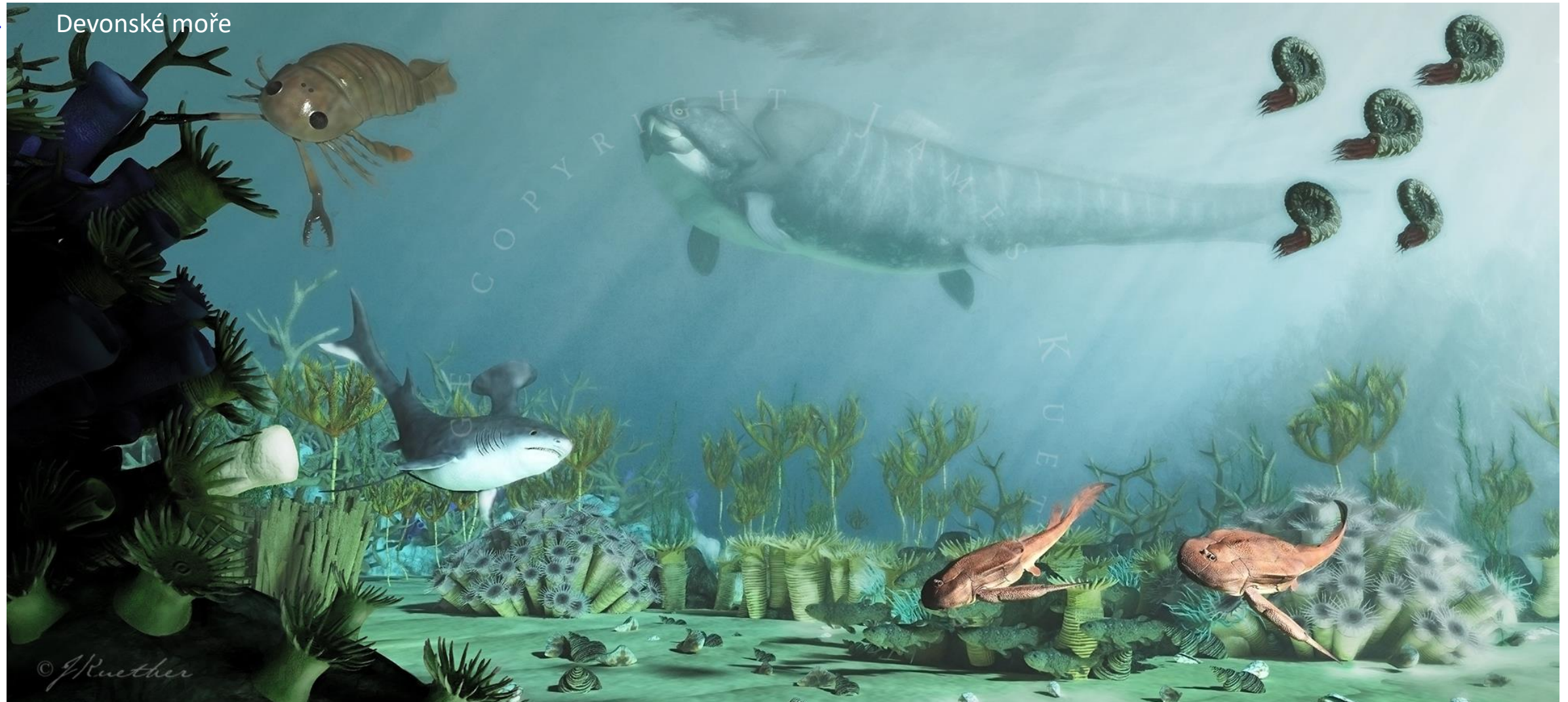


Moravský kras



- Značný konkurenční tlak v mělkých mořích
- Cesta do hlubších částí oceánů (v první fázi v ordoviku - revoluce planktonu; později v devonu **revoluce nektonu**)
- Dalším expanze fauny vedla na pevninu, počátky v ordoviku, od siluru významně
- **osidlování pevniny vrcholilo v devonu**

<https://www.deviantart.com/paleoguy/art/Devonian-Reef-728369201>



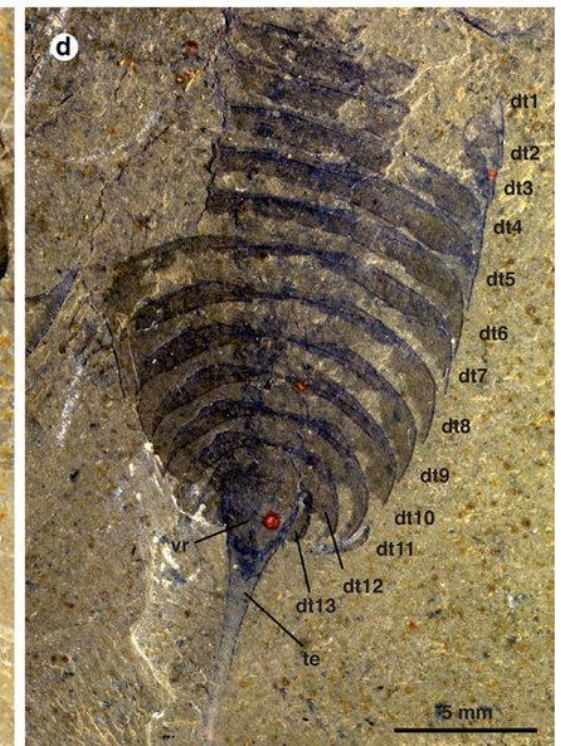
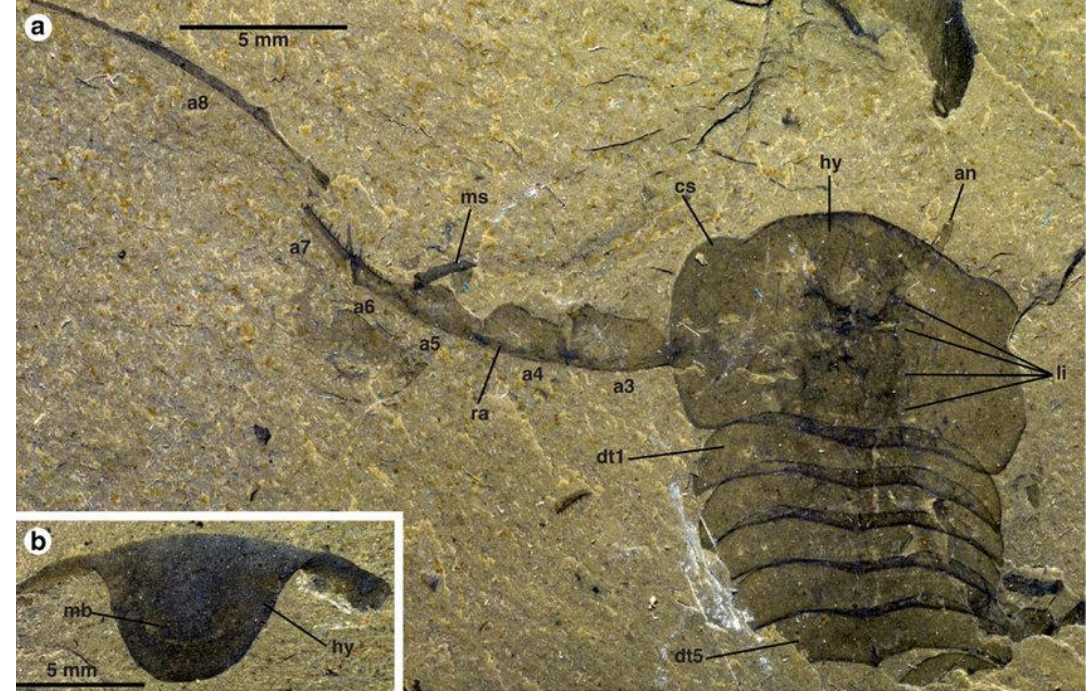
Přechod z moří do sladkých vod

- Jedny z nejstarších nálezů nemořských živočichů (brakické vody?) pocházejí ze spodního kambria středočeských Brd
- Merostomátní členovci (*Kodymirus* a *Kockorus*) a členovci korýši (*Vladicaris*), řasy, akrytarchy

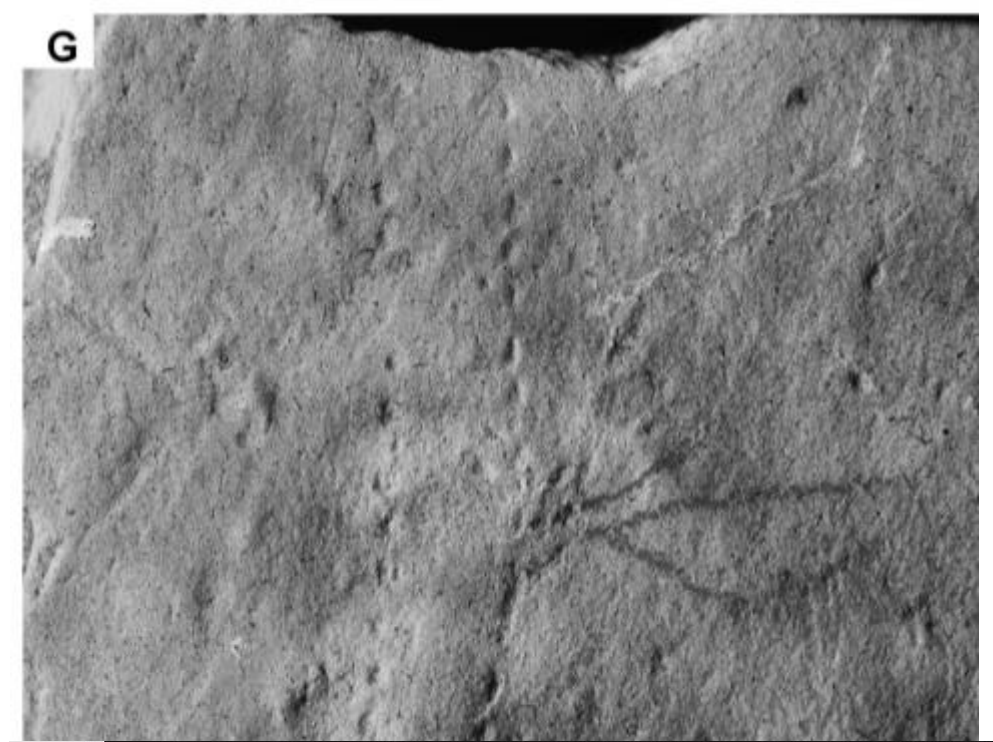
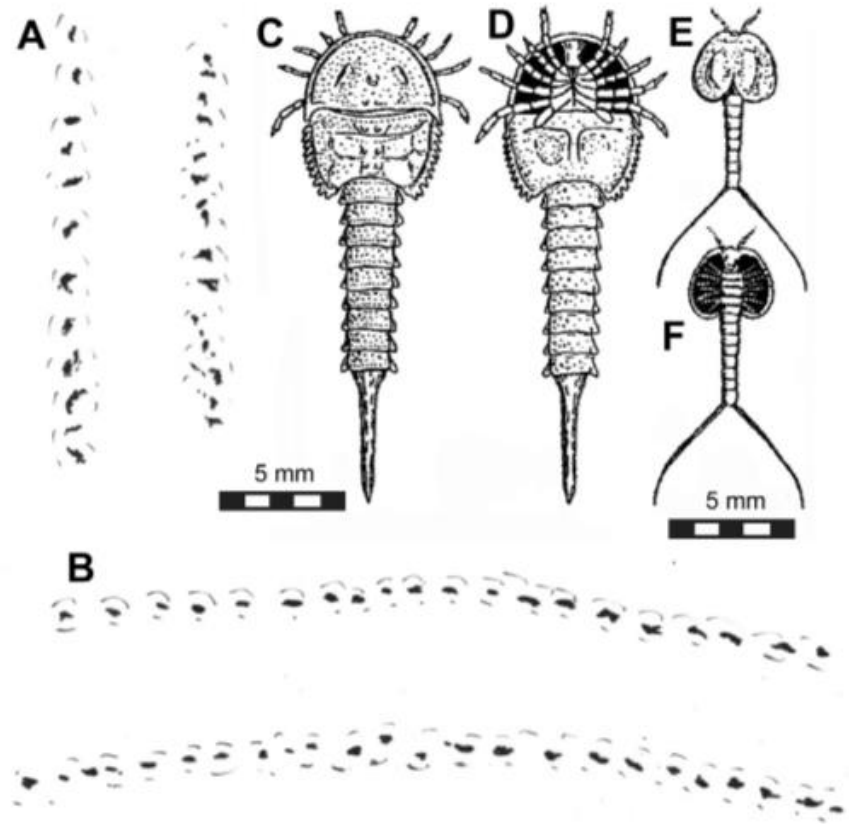


<https://en.wikipedia.org/wiki/Kodymirus>

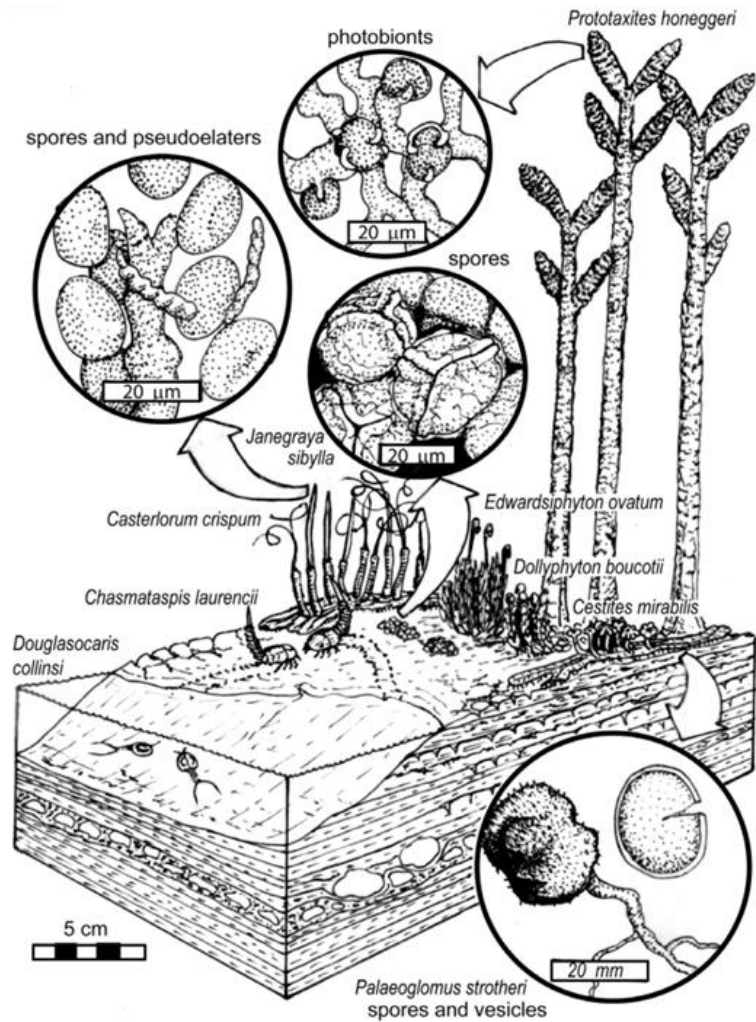
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00114-013-1081-y>



- Nejstarší doklady výskytu sladkovodních/břežních ekosystémů ze středního ordoviku, USA, Tennessee
- korýš nebo klepítkatec, spóry mechorostů, nematofyty



<https://jpsonline.co.in/index.php/jop/article/view/43/42>



<https://jpsonline.co.in/index.php/jop/article/view/43>

Fig. 15—Reconstruction of land plants and animals of the Middle Ordovician (Darrivilian) Douglas Dam Member, Tennessee.

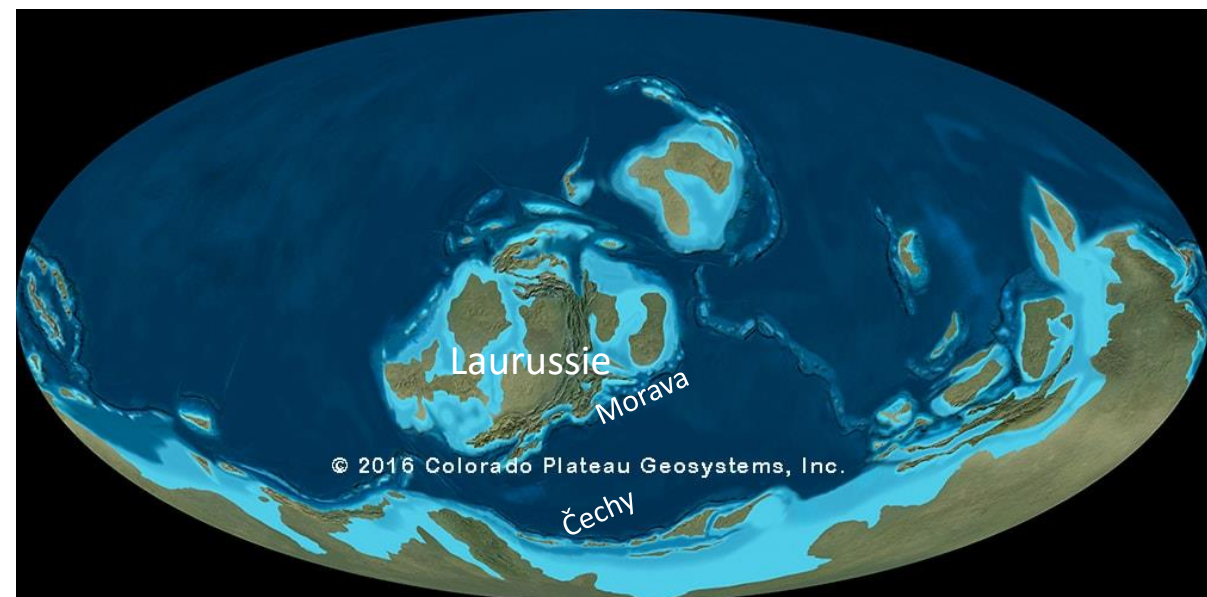
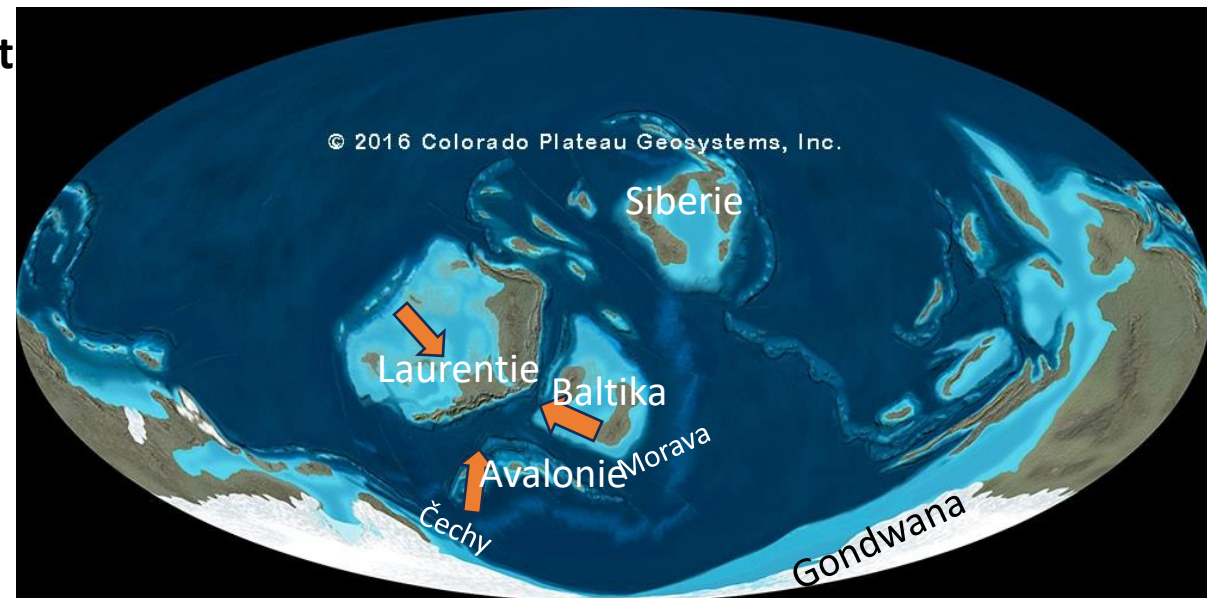
- Od ordoviku do devonu docházelo k postupné srážce paleokontinentů Laurentie, Avalonie a Baltiky (kaledonské vrásnění)
- **Vznik paleokontinentu Laurussie v tropických oblastech**
– rozsáhlá mezihorská údolí a široké předpolní **pánve s velkým množstvím říčních toků a jezer** v devonu
- **Od středního devonu růst koncentrací O₂ do nebývalých hodnot díky rozvoji lesů i mořských řas a sinic**
- **Ideální konstelace pro expanzi do sladkých vod a na pevninu**



Grónsko a Svalbard jsou proslulé výchozy devonských pevninských sedimentárních hornin

<https://astrobiology.com/2023/01/evolution-of-tree-roots-may-have-driven-mass-extinctions.html>,

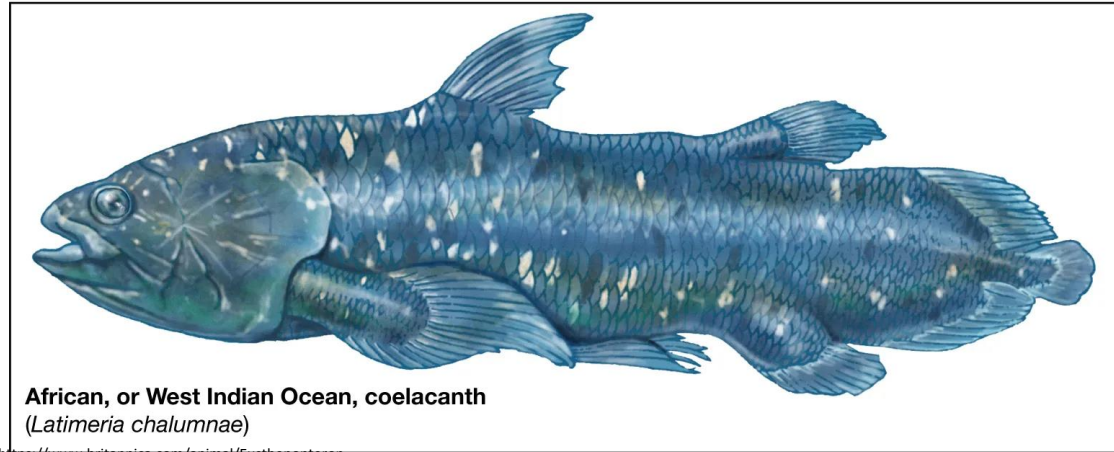
<https://deeptimemaps.com/map-lists-thumbnails/global-paleogeography-and-tectonics-in-deep-time/>



- Rychlý rozvoj sladkovodních ryb
- nozdraté kostnaté ryby – přizpůsobení některých zástupců této skupiny k životu v občas vysychajících vodních nádržích
 - dvojdyšné ryby
 - **tetrapodi (čtvernožci)**



Devonian rhipidistian
(*Eusthenopteron foordi*)



African, or West Indian Ocean, coelacanth
(*Latimeria chalumnae*)

<https://www.britannica.com/animal/Eusthenopteron>

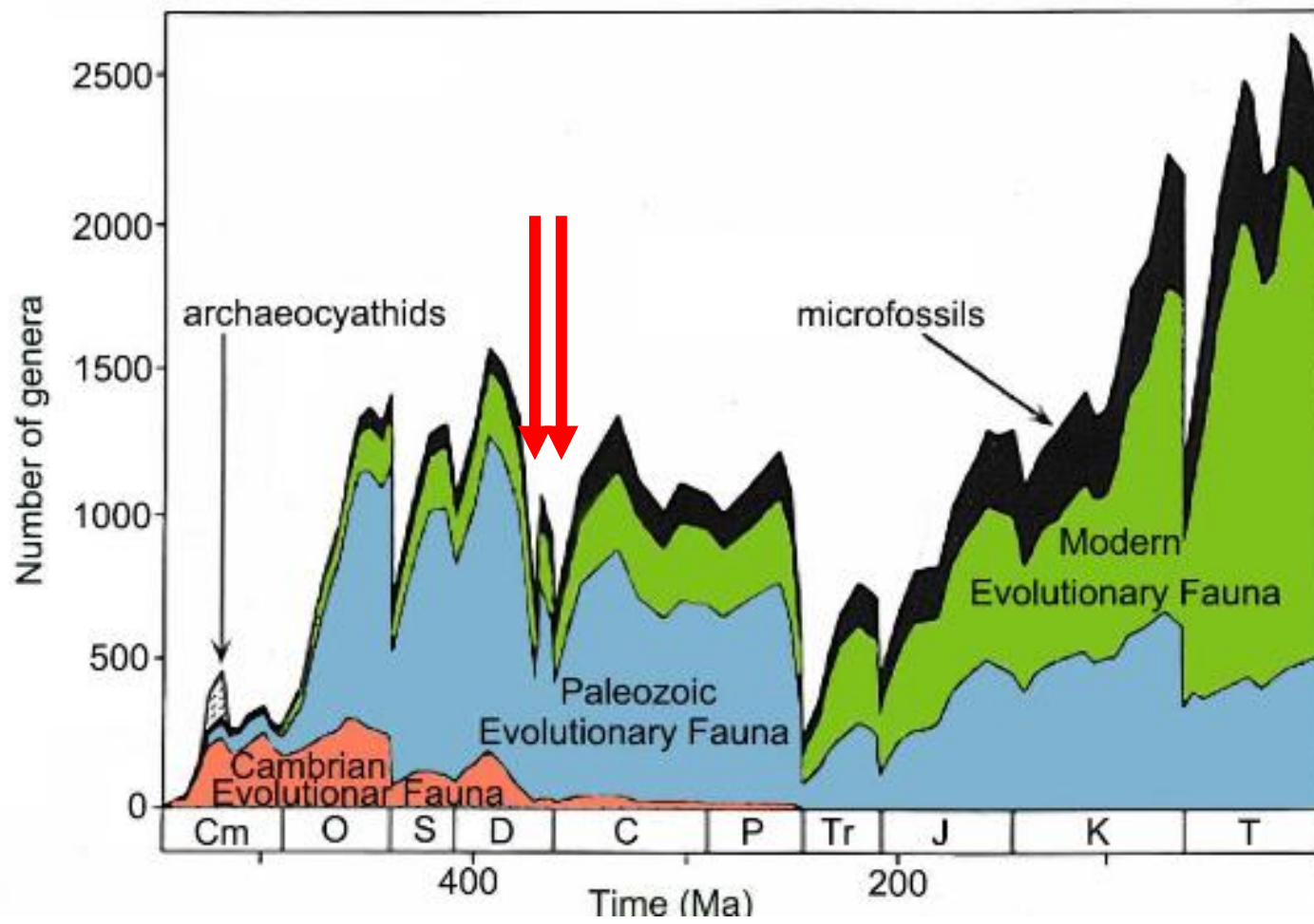
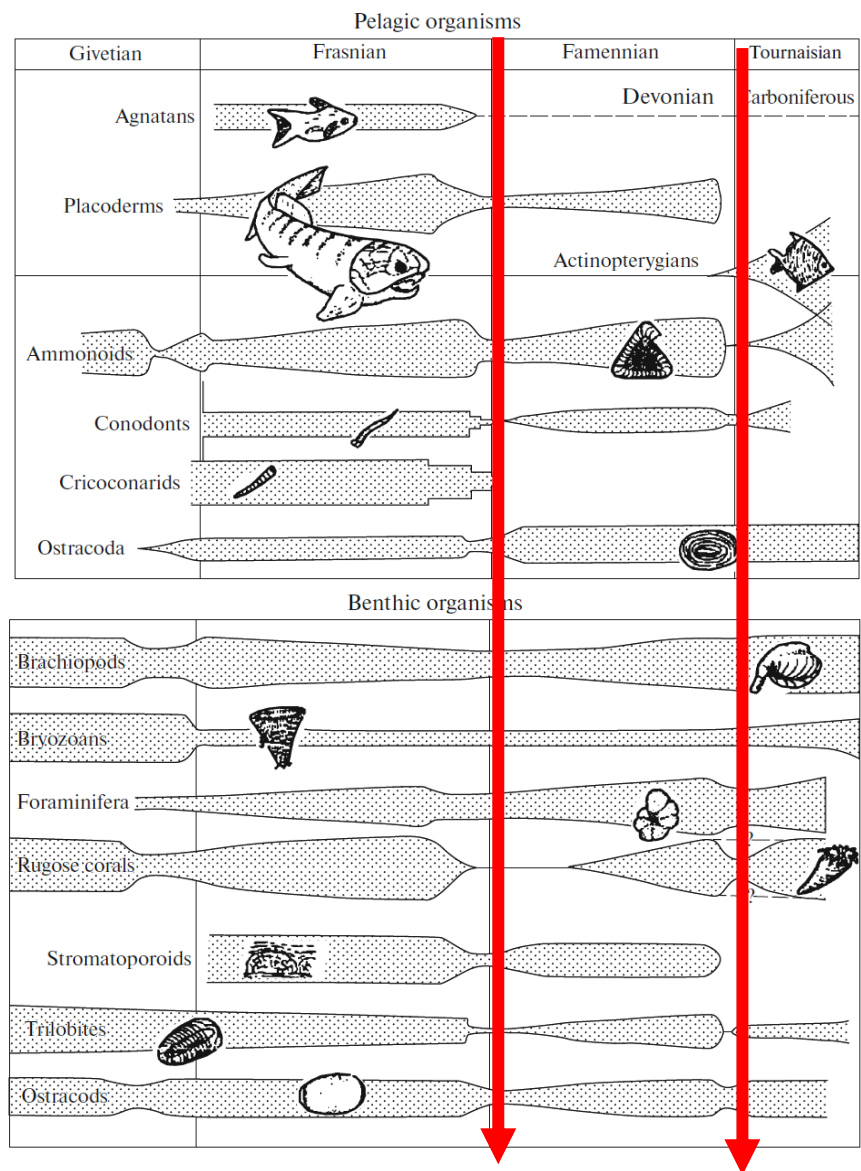
© Encyclopædia Britannica, Inc.



shutterstock.com · 2311899785



Vymírání na konci devonu



Sepkoski, J.J., 1997. Biodiversity: past, present, and future. *Journal of Paleontology*, 71(4), p.533-539.

- *Karbon - Carboniferous (lat. carbō – uhlí; ferō – nesoucí)*
- *Perm - město v Rusku*

Karbon a perm (mladší paleozoikum)



| Eoném / eon | | Eramém / éra | | Úhvar / perioda | | GSSP | | absolutní stáří (Ma) |
|--------------|------------|-------------------|-------------|-----------------|---------------|-----------------|-------------|----------------------|
| | | Oddělení / epocha | | Stupeň / věk | | | | souzčasnost |
| fanerozoikum | kvartér | holocén | meghalajen | svrchní | tithon | 0,0042 | ~145,0 | |
| | | | neolithigis | | kimmeridge | 0,0082 | 152,1 ± 0,9 | |
| | | | greenland | | oxford | 0,0117 | 157,3 ± 1,0 | |
| | | | svrchní | | callovian | 0,129 | 163,5 ± 1,0 | |
| | pleistocén | chiban | | oxford | | 166,1 ± 1,2 | | |
| | | | gelas | | bathon | 168,3 ± 1,3 | | |
| | | | piacenz | | bajok | 170,3 ± 1,4 | | |
| | | | zanci | | aalen | 174,1 ± 1,0 | | |
| | neogén | messin | | toark | | 182,7 ± 0,7 | | |
| | | torton | | piensbach | | 190,8 ± 1,0 | | |
| | | serravall | | sinemur | | 199,3 ± 0,3 | | |
| | | miocén | langh | | hettang | 201,3 ± 0,2 | | |
| | paleogén | burdigal | | rhét | | ~ 208,5 | | |
| | | akvitán | | svrchní | norik | ~ 227 | | |
| | | oligocén | chatt | | karn | ~ 237 | | |
| | | | rupel | | ladin | ~ 242 | | |
| | | | priabon | | anis | 247,2 | | |
| | | | barton | | olenek | 251,2 | | |
| | | | lutet | | ind | 251,902 ± 0,024 | | |
| | | | ypres | | changhsing | 254,14 ± 0,07 | | |
| | | thanet | | wuchiaping | 259,51 ± 0,21 | | | |
| | | seland | | capitan | 264,28 ± 0,16 | | | |
| mesozoikum | křída | maastricht | | word | 266,9 ± 0,4 | | | |
| | | kampán | | road | 273,01 ± 0,14 | | | |
| | svrchní | santon | | kungur | 283,5 ± 0,6 | | | |
| | | coniak | | artinsk | 290,1 ± 0,28 | | | |
| | | turon | | sakmar | 293,52 ± 0,17 | | | |
| | | cenoman | | assel | 296,9 ± 0,15 | | | |
| | karbon | alib | | gžel | 303,7 ± 0,1 | | | |
| | | apt | | kasimov | 307,0 ± 0,1 | | | |
| | | barrem | | svrchní | baškir | 315,2 ± 0,2 | | |
| | | hauteriv | | svrchní | serpuchov | 323,2 ± 0,4 | | |
| valangin | | | střední | visé | 330,9 ± 0,2 | | | |
| berrias | | | střední | tournai | 346,7 ± 0,4 | | | |
| | | | spodní | | 358,9 ± 0,4 | | | |
| | | | | | | | | |

| Eoném / eon | | Eramém / éra | | Úhvar / perioda | | GSSP | | absolutní stáří (Ma) |
|--------------|------------|-------------------|-------------|-----------------|-------------|------|--|----------------------|
| | | Oddělení / epocha | | Stupeň / věk | | | | souzčasnost |
| fanerozoikum | mesozoikum | jura | svrchní | tithon | 152,1 ± 0,9 | | | |
| | | | | kimmeridge | 157,3 ± 1,0 | | | |
| | | | | oxford | 163,5 ± 1,0 | | | |
| | | | | callovian | 166,1 ± 1,2 | | | |
| | | střední | bathon | 168,3 ± 1,3 | | | | |
| | | | bajok | 170,3 ± 1,4 | | | | |
| | | | aalen | 174,1 ± 1,0 | | | | |
| | | | toark | 182,7 ± 0,7 | | | | |
| | | | piensbach | 190,8 ± 1,0 | | | | |
| | | | sinemur | 199,3 ± 0,3 | | | | |
| | triás | hettang | 201,3 ± 0,2 | | | | | |
| | | rhét | ~ 208,5 | | | | | |
| | | svrchní | norik | ~ 227 | | | | |
| | | | karn | ~ 237 | | | | |
| | | střední | ladin | ~ 242 | | | | |
| | | spodní | anis | 247,2 | | | | |
| | | | olenek | 251,2 | | | | |
| | | | ind | 251,902 ± 0,024 | | | | |
| | | | changhsing | 254,14 ± 0,07 | | | | |
| | | | wuchiaping | 259,51 ± 0,21 | | | | |
| paleozoikum | perm | loping | | 264,28 ± 0,16 | | | | |
| | | guadalup | | 266,9 ± 0,4 | | | | |
| | | road | | 273,01 ± 0,14 | | | | |
| | | kungur | | 283,5 ± 0,6 | | | | |
| | cisural | artinsk | | 290,1 ± 0,28 | | | | |
| | | sakmar | | 293,52 ± 0,17 | | | | |
| | | assel | | 296,9 ± 0,15 | | | | |
| | | gžel | | 303,7 ± 0,1 | | | | |
| | | kasimov | | 307,0 ± 0,1 | | | | |
| | | baškir | | 315,2 ± 0,2 | | | | |
| karbon | serpuchov | | 323,2 ± 0,4 | | | | | |
| | visé | | 330,9 ± 0,2 | | | | | |
| | tournai | | 346,7 ± 0,4 | | | | | |
| | | | 358,9 ± 0,4 | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| Eoném / eon | | Eramém / éra | | Úhvar / perioda | | GSSP | | absolutní stáří (Ma) |
|--------------|-------------|-------------------|---------------|-----------------|-------------|------|--|----------------------|
| | | Oddělení / epocha | | Stupeň / věk | | | | souzčasnost |
| fanerozoikum | paleozoikum | devon | svrchní | famen | 372,2 ± 1,6 | | | |
| | | | | frasn | 382,7 ± 1,6 | | | |
| | | | | givet | 387,7 ± 0,8 | | | |
| | | | | eifel | 393,3 ± 1,2 | | | |
| | | střední | ems | | 407,6 ± 2,6 | | | |
| | | | prag | | 410,8 ± 2,8 | | | |
| | | | lochkov | | 419,2 ± 3,2 | | | |
| | | | přídolí | | 423,0 ± 2,3 | | | |
| | | | ludlow | | 425,6 ± 0,9 | | | |
| | | | gorst | | 427,4 ± 0,5 | | | |
| | silur | wenlock | | 430,5 ± 0,7 | | | | |
| | | sheinwood | | 433,4 ± 0,8 | | | | |
| | | telych | | 438,5 ± 1,1 | | | | |
| | | aeron | | 440,8 ± 1,2 | | | | |
| | | rhuddan | | 443,8 ± 1,5 | | | | |
| | | himant | | 445,2 ± 1,4 | | | | |
| | ordovik | svrchní | katian | 453,0 ± 0,7 | | | | |
| | | | sandbian | 458,4 ± 0,9 | | | | |
| | | střední | darriwil | 467,3 ± 1,1 | | | | |
| | | | daping | 470,0 ± 1,4 | | | | |
| spodní | | floian | 477,7 ± 1,4 | | | | | |
| | | tremadok | 485,4 ± 1,9 | | | | | |
| kambrium | furong | | ~ 489,5 | | | | | |
| | jiangshan | | ~ 494 | | | | | |
| | paibian | | ~ 497 | | | | | |
| | guzhang | | ~ 500,5 | | | | | |
| | drum | | ~ 504,5 | | | | | |
| | wuluan | | ~ 509 | | | | | |
| terreneuv | stupeň 4 | | ~ 514 | | | | | |
| | stupeň 3 | | ~ 521 | | | | | |
| | stupeň 2 | | ~ 529 | | | | | |
| | stupeň 1 | | ~ 538 | | | | | |
| | stupeň 0 | | ~ 541,0 ± 1,0 | | | | | |
| | fortun | | ~ 541,0 ± 1,0 | | | | | |

| Eoném / eon | | Eramém / éra | | Úhvar / perioda | | GSSP | | absolutní stáří (Ma) |
|-------------|---------------------|-------------------|------|-----------------|--|------|--|----------------------|
| | | Oddělení / epocha | | Stupeň / věk | | | | souzčasnost |
| prekambrium | proterozoikum | ediakar | | ~ 635 | | | | |
| | | kryogen | | ~ 720 | | | | |
| | | ton | | 1000 | | | | |
| | | sten | | 1200 | | | | |
| | meso-proterozoikum | ectas | | 1400 | | | | |
| | | calymm | | 1600 | | | | |
| | | stather | | 1800 | | | | |
| | | orosir | | 2050 | | | | |
| | paleo-proterozoikum | rhyak | | 2300 | | | | |
| | | sider | | 2500 | | | | |
| archaikum | neo-archaikum | | 2800 | | | | | |
| | meso-archaikum | | 3200 | | | | | |
| | paleo-archaikum | | 3600 | | | | | |
| | eo-archaikum | | 4000 | | | | | |
| hadaikum | | ~ 4600 | | | | | | |

Postupně se pracuje na tom, aby všechny jednotky byly datovány svými spodními hranicemi na globálních stratotypoch (GSSP - Global Boundary Stratotype Section and Point). To platí i pro jednotky archaika a proterozoa, obzvláště definované globálním standardním stratigrafickým stářím (GSSA - Global Standard Stratigraphic Age). Neformální jednotky a jednotky doposud nepojmenované jsou psány kurzívou. Další verze tabulky a detailní informace o ratifikovaných GSSP jsou dostupné na webu <http://www.stratigraphy.org>. URL této tabulky je uveden níže.

Absolutní stáří jsou průběžně revidována a nedefinují jednotky ve fanerozoiku a ediakaru, kde jsou rozhodující pouze GSSP. Pro absolutní stáří hranic fanerozoických jednotek bez ratifikovaného GSSP nebo bez přesného absolutního datování je použit symbol (-).

Číslo schválených pododdělení/podepoch jsou v tabulce zkrácena na spřita (spodní/stáří), st (střední) a svr (svrchní/mladší). Absolutní stáří jednotek jsou převzata z Gradstein et al. (2012) 'A Geologic Time Scale 2012', s výjimkou kvartéru, svrchního paleogénu, křída, triasu, permu a prekambria, pro něž byla data poskytnuta příslušnými ICS subkomisemi.

Barvy jednotek převzaty podle Komise pro geologickou mapu světa [Commission for the Geological Map of the World; www.cgmw.org].



Návrh originální tabulky v angličtině: K.M. Cohen, D.A.T. Harper, P.L. Gibbard, N. Car (c) Mezinárodní stratigrafická komise, říjen 2021

Způsob citace původní tabulky: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013), updated) The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36:199-204

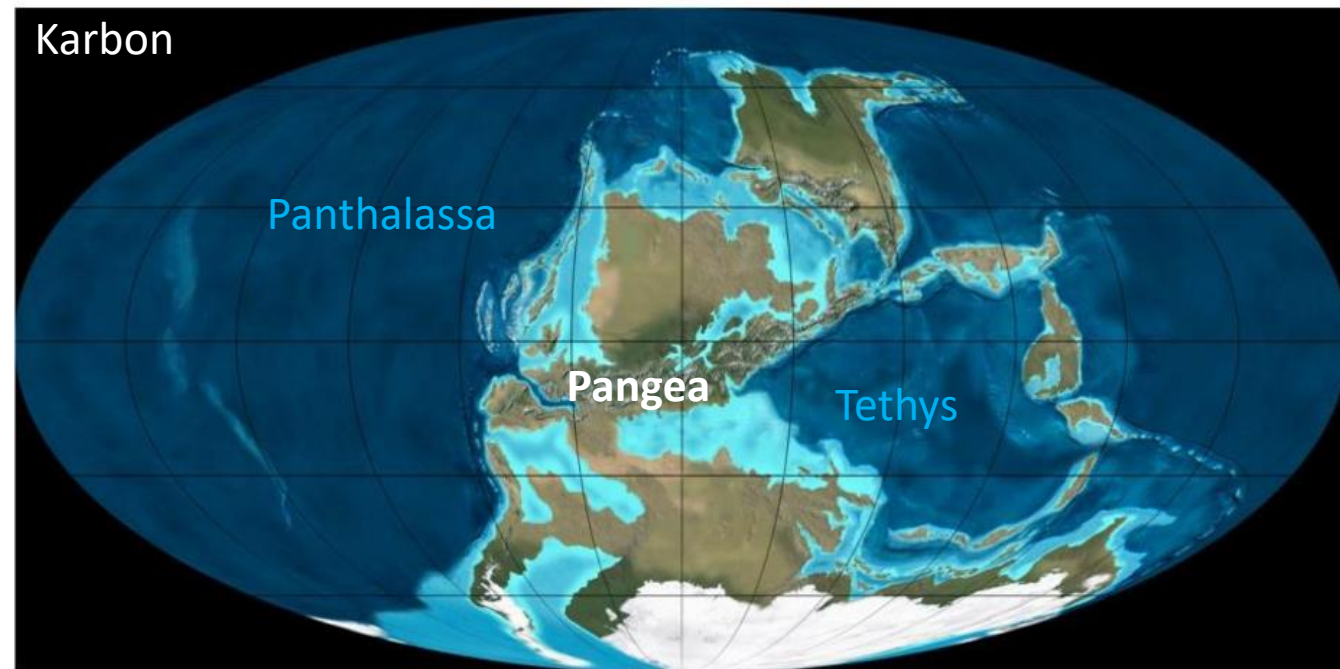
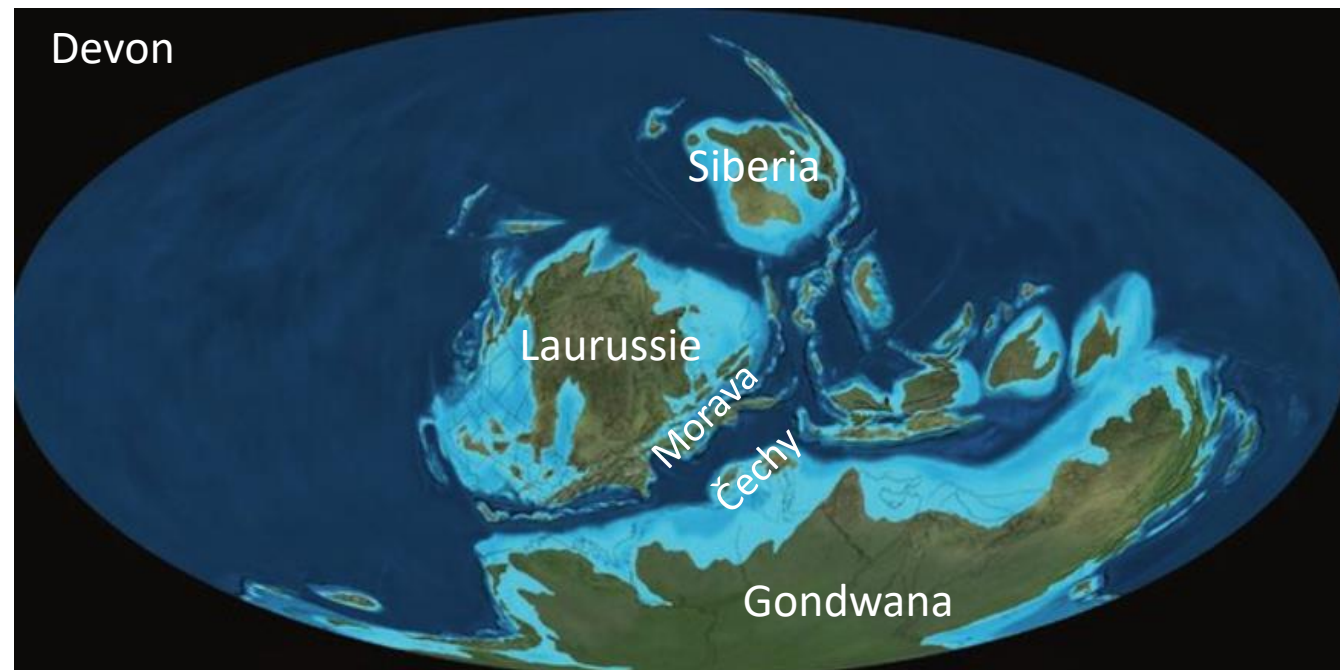
URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2021-10Czech.pdf>

Český překlad byl vyhotoven a schválen Českou stratigrafickou komisí, která je složena z pracovníků České geologické služby, Geologického ústavu Akademie věd ČR, Masarykovy univerzity, Univerzity Karlovy, Univerzity Palackého a Vysoké školy báňské. <https://stratigraphy.geology.cz>



Pangea

- srážka mnoha kontinentů do jednoho superkontinentu od devonu do závěru paleozoika (permu)
- srážkou Laurussie, Gondwany, Siberie, Kazachstanie, čínských kontinentů a dalších menších vznikla **Pangea**
- Tu omýval vnitřní oceán Tethys a vnější Panthalassa

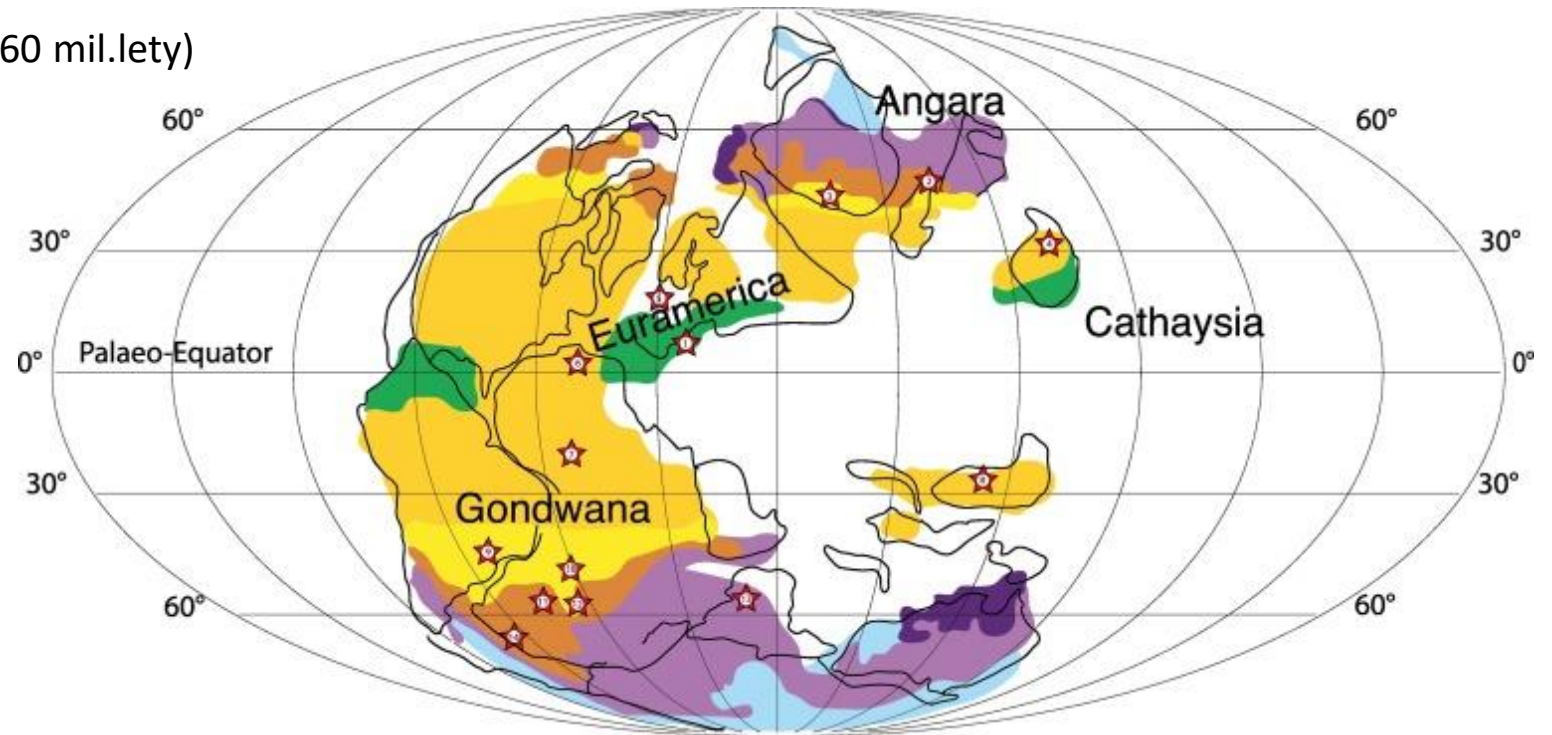


Pennsylvanian - 300 Ma

Vznik rozpálené Pangey

- kvůli značné rozloze pevniny (dominující kontinentální klima – výrazné sezónní rozdíly, málo srážek)
 - + procházejícím přes rovník (intenzivní ohřev)
 - + pohořím na okrajích kontinentů (srážkové stíny)
 - + vázání vody v ledovcích (nedostatek srážek v nižších šířkách)
 - + atmosférickému a oceánskému proudění
- **Pangea velmi rychle vysychala** a pozdně karbonské, a především pak **permské a triasové klima bylo velmi aridní**

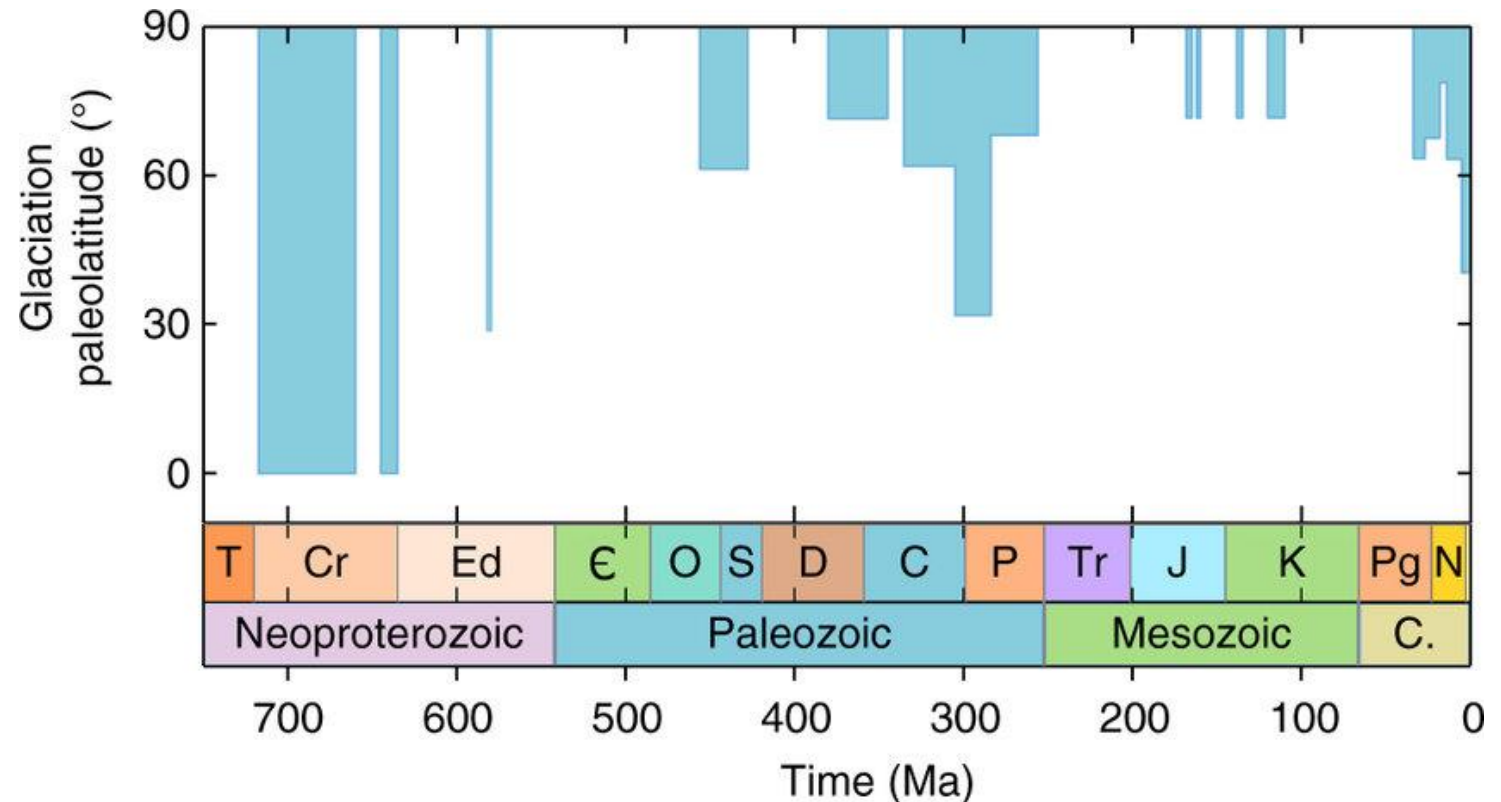
Rozložení kontinentů v permu (před 260 mil.lety)



- 36
- ★ Late Permian terrestrial ecosystems
- | | | | | | | |
|------------|------------|--------------|----------|--------------|------------|-----------|
| 1. S-Alps | 3. S-Urals | 5. Zechstein | 7. Niger | 9. Brazil | 11. Malawi | 13. India |
| 2. Junggar | 4. Ordos | 6. Morocco | 8. Laos | 10. Tanzania | 12. Zambia | 14. Karoo |

Karbonské a permské klima

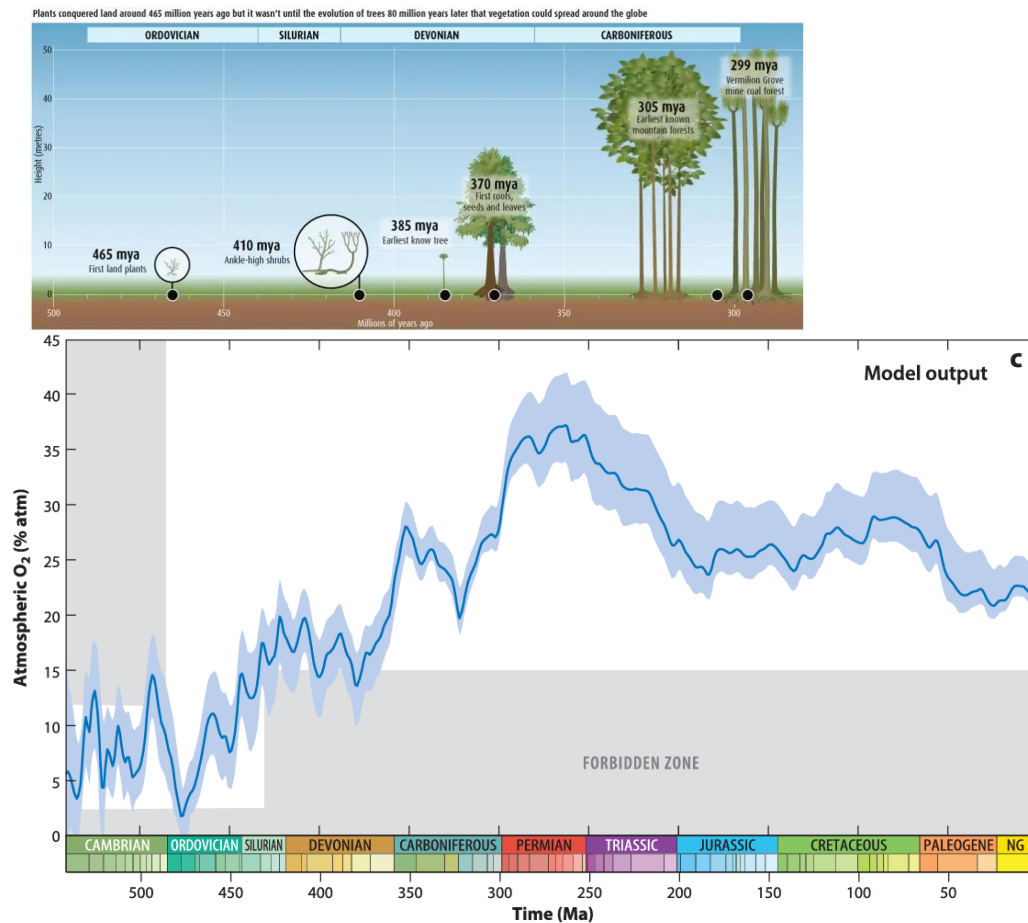
- Období mladšího paleozoika – karbon a perm – je charakterizováno převažujícím chladným klimatem – **ice-house klimatický režim**
- Nejdelší **fanerozoická doba ledová** (resp. série událostí střídání dob ledových a meziledových)
- Extrémně nízké koncentrace CO₂ a vysoké koncentrace O₂



https://www.researchgate.net/publication/320593500_Elevated_CO2_degassing_rates_prevented_the_return_of_Snowball_Earth_during_the_Phanerozoic/figures?lo=1

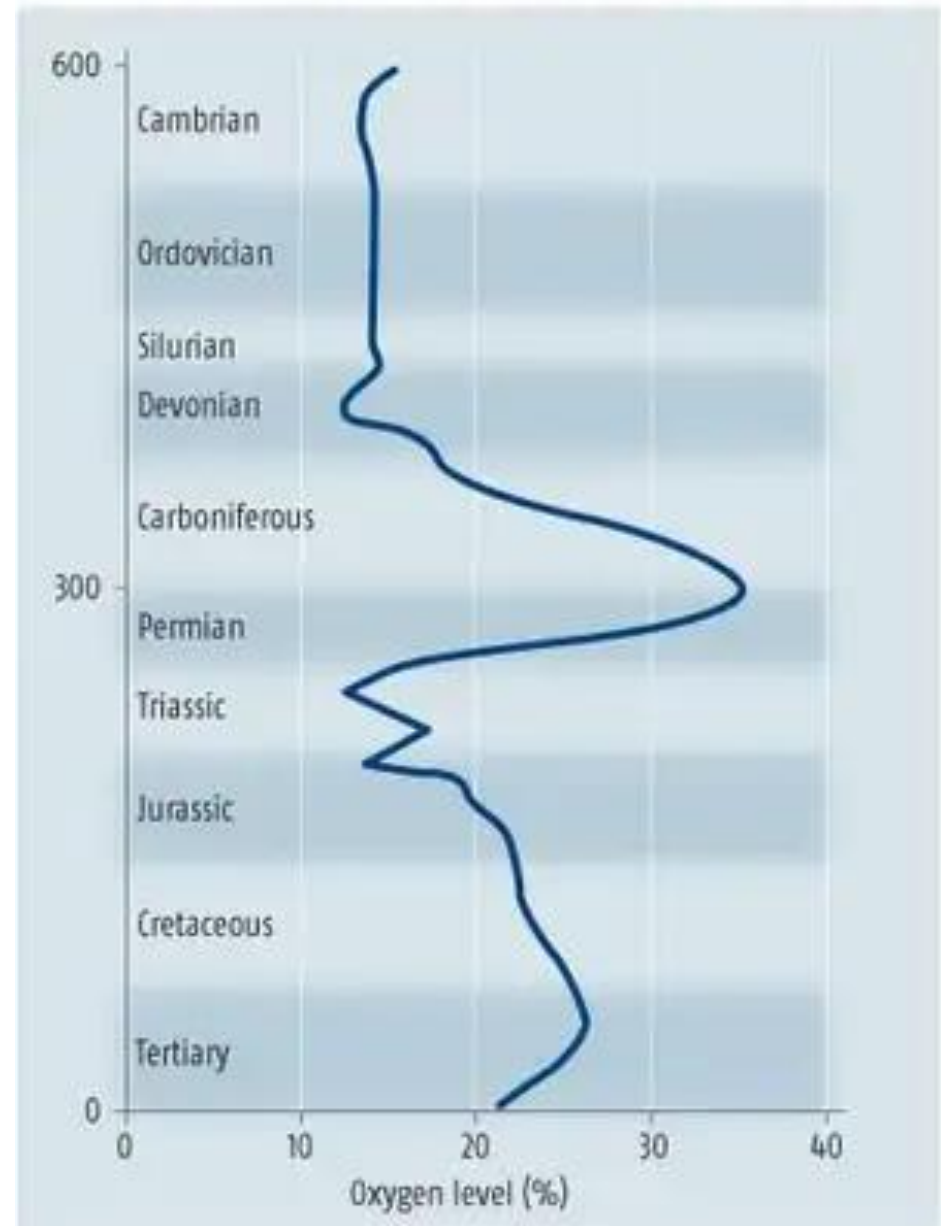
Složení atmosféry mladšího paleozoika

- Nárůst kyslíku v atmosféře dosáhl vrcholu během karbonu (O₂ tvořil až na 35 % vzduchu, dnes 21 % O₂)
- vysoká dostupnost kyslíku umožnila růst velikosti rostlin i živočichů



EARTH'S CHANGING AIR

Variation in oxygen levels in the atmosphere (millions of years ago)



Flóra karbonských deštných pralesů

- Karbonská flóra s převládajícími výtrusnými rostlinami (stromovité kapradiny, plavuně, přesličky)

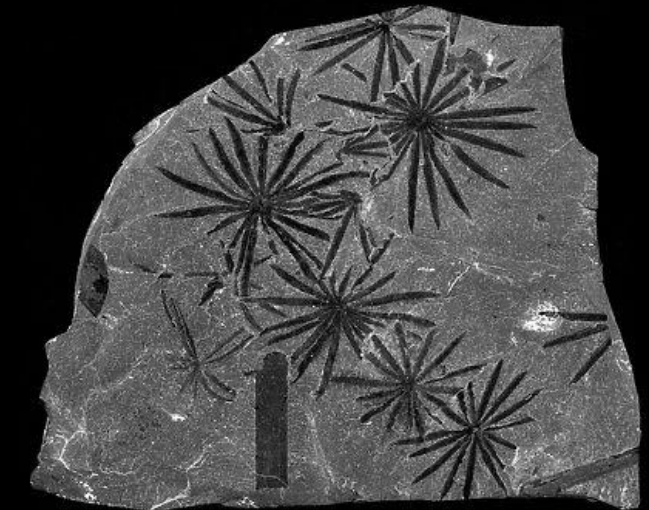
Floristická společenstva vázaná na vlhké prostředí



kapradiny



přesličky



5cm



Současná jediná stromovitá přeslička
Equisetum giganteum

<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjb-2013-0312>

- + „prajehličnany“ koradaity



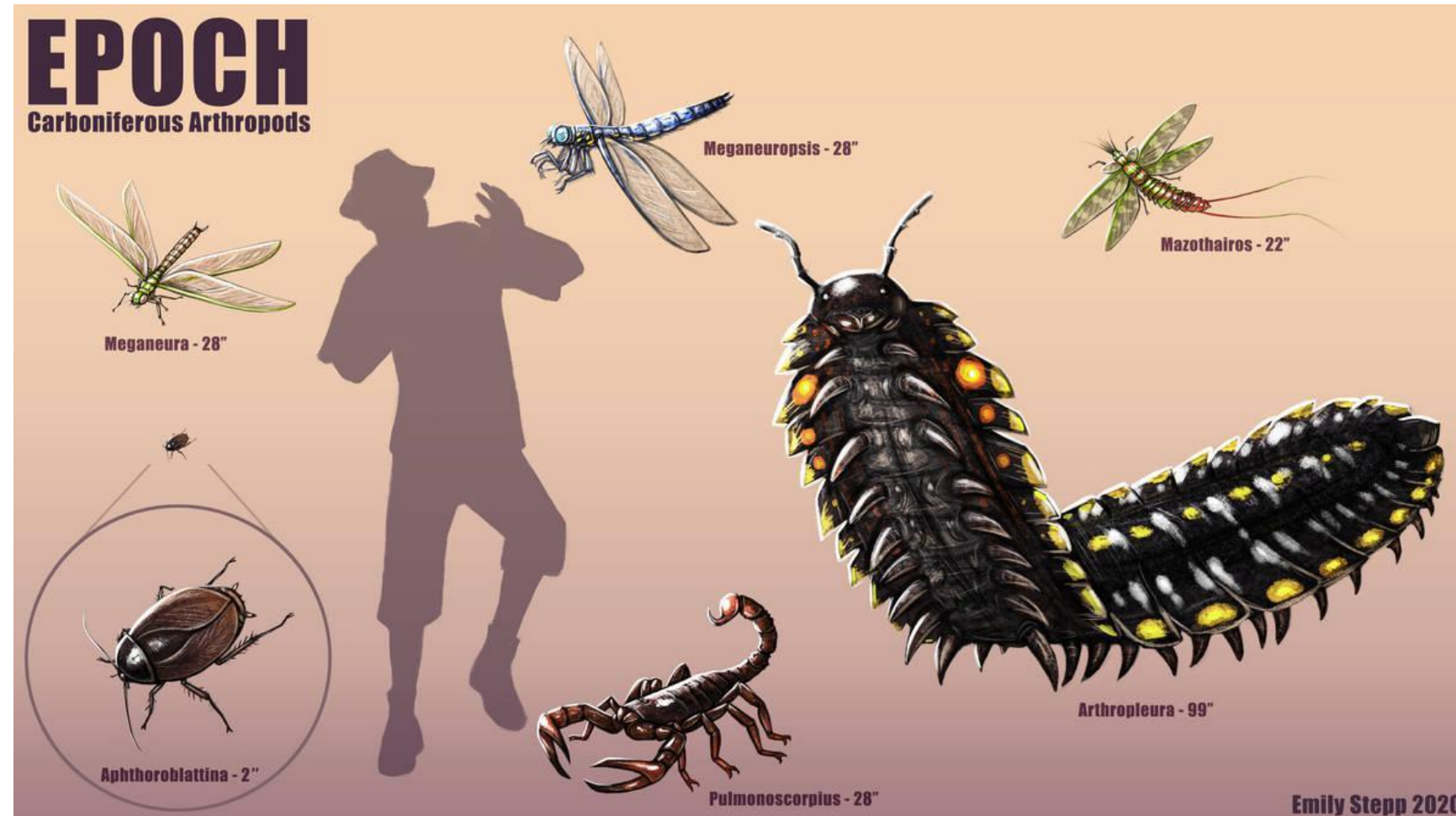
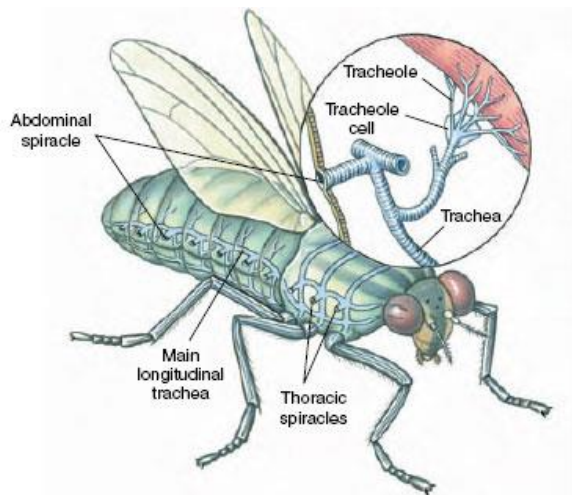
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cordaites_foliatus_Commentry.jpg



<https://www.renderosity.com/marketplace/products/94666/cordaites-set-dr>

Obří karbonických pralesů

- členovci dosáhli během pozdního karbonu gigantických rozměrů
- respirace členovců přes vzdušnice - vysoká dostupnost a tak snadný příjem O₂ – možnost růstu do stále větších rozměrů a přitom udržet energetickou bilanci metabolismu atd.
- Dalším vysvětlením je **vyšší odolnost větších larev před negativními dopady vysokých koncentrací O₂** (kdy působí toxicky) – větší larvy = větší dospělci





Tiko

Obojživelníci

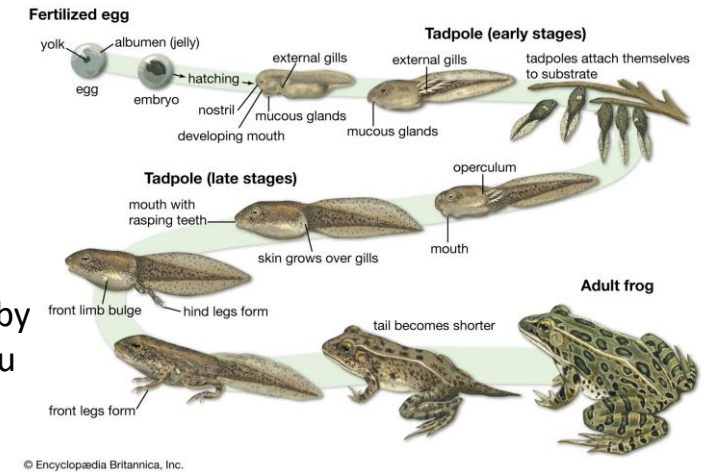
Vznik v devonu z rybovitých obratlovců
Reprodukce obojživelníků vázaná na vodu.



ERYOPS

ORDER: TEMNOSPONDYLI
TEMPORAL RANGE: LATE CARBONIFEROUS - EARLY PERMIAN
ESTIMATED BODY LENGTH: 1.5-3.0 M (4.9-9.8 FT)

<https://www.deviantart.com/prehistorybyliam/art/Eryops-782971758>



Ilustrační obrázek - žáby
vznikají až v mesozoiku

© Encyclopaedia Britannica, Inc.

<https://www.britannica.com/animal/amphibian/General-features>



<https://newdinosaurs.com/diplocaulus/>

Nezávislost na vodě jako evoluční výhoda

- Zvyšování aridity Pangey v pozdním karbonu a v permu
 - Permská flóra s převládajícími nahosemennými rostlinami (jehličnany, cykasy benetity), rozšiřující se s postupnou aridizací klimatu



<https://medium.com/@exploringdeeptime/an-in-depth-look-at-the-mesozoic-era-f33aef2116af>



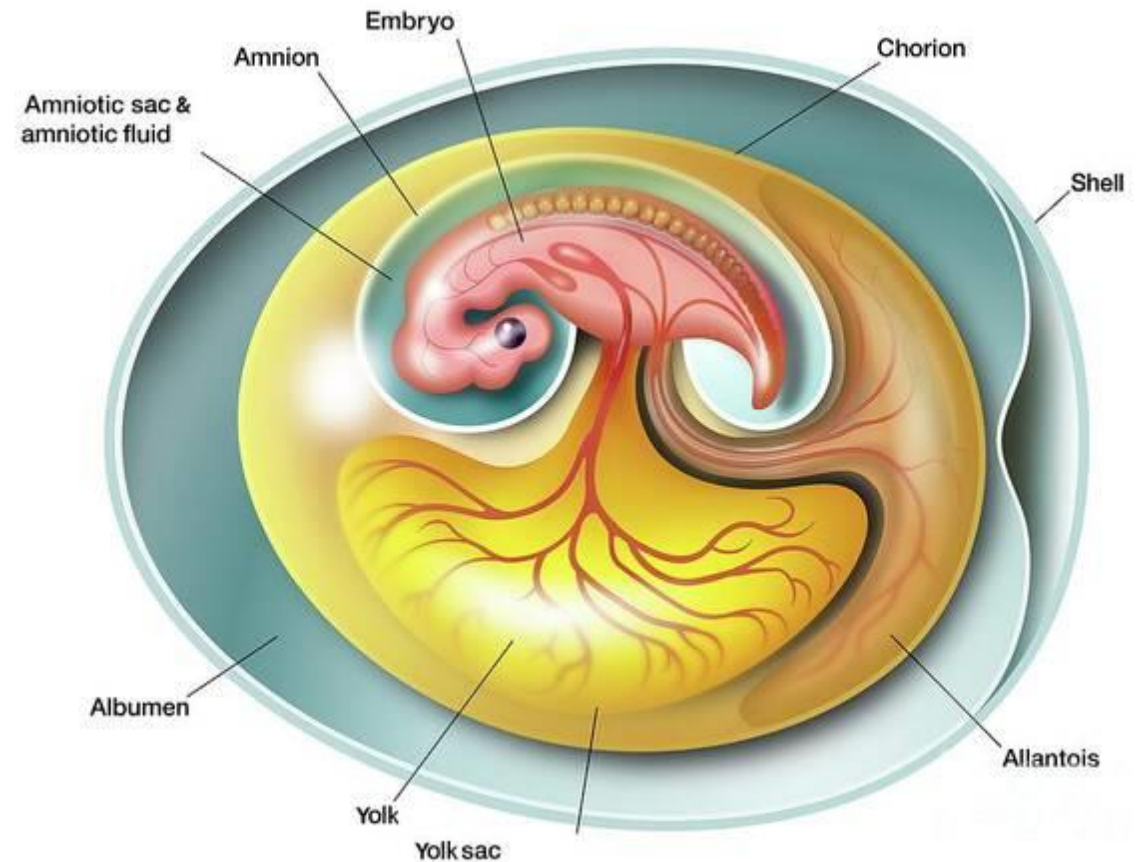
<https://www.manuelcohen.com/image/10000NFedWdmDfE>

Nezávislost na vodě jako evoluční výhoda

- Obojživelníci vázaní na vodu (především rozmnožování)
- V suchém světě na závěru karbonu a v permu evoluční nevýhoda
- Vznik vejce s amnionovým vakem v pozdním karbonu – **odštěpení skupiny amniota** (blanatí)

Amnionový vak

- vnitřní zárodečný obal, uvnitř něhož se nachází vodní prostředí, ve kterém se zárodek vyvíjí.



<https://sciencephotogallery.com/featured/amniote-embryo-anatomy-jose-antonio-penascience-photo-library.html?product=art-print>

Plazi

První výskyty od pozdního karbonu, kdy dochází k jejich prudkému rozvoji

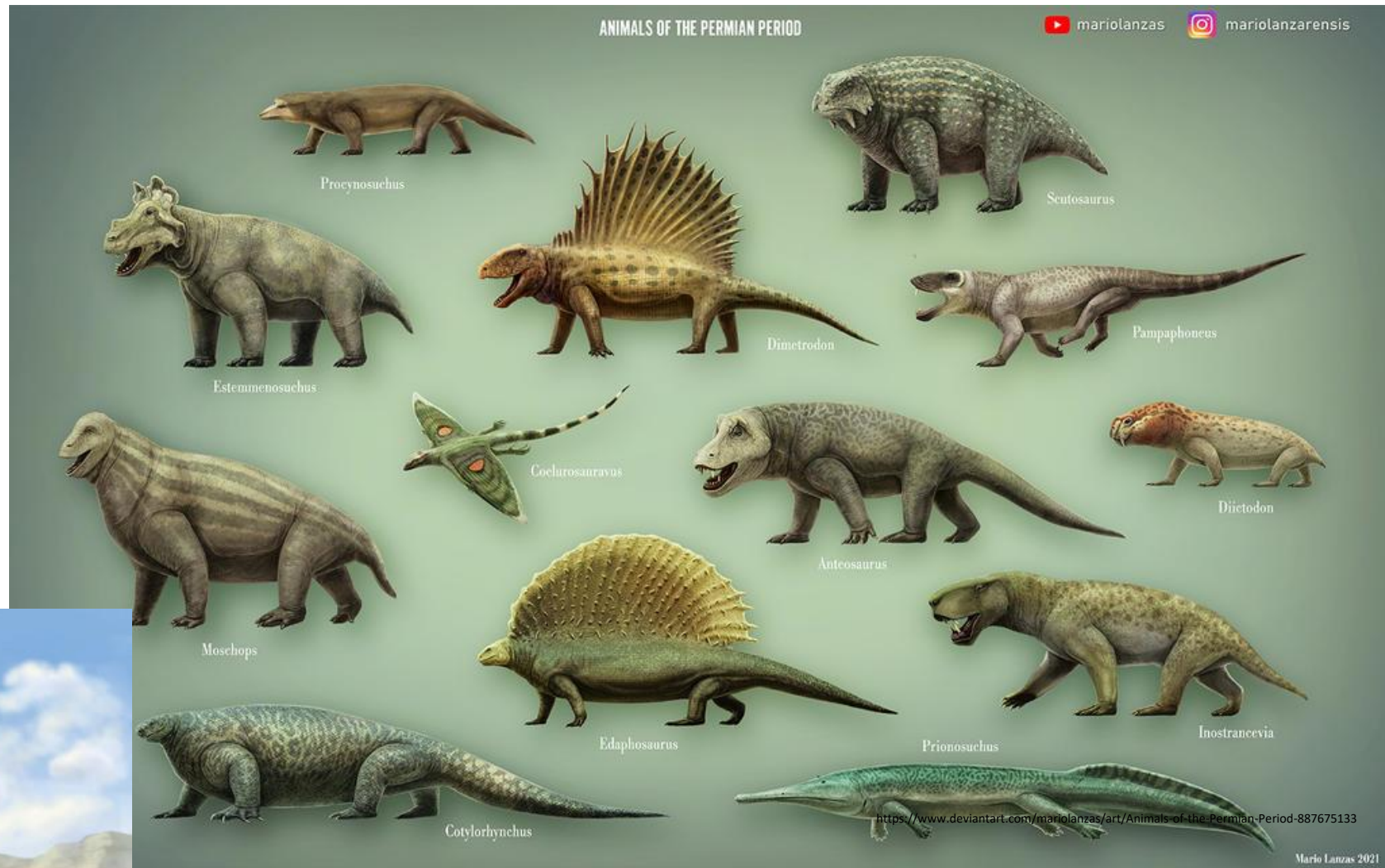
Reprodukce nezávislá na vodě bude během závěru karbonu a na počátku permu tou zásadní evoluční výhodou, díky které se stane linie plazů (a tím pádem naše linie) nejúspěšnější z obratlovců



<https://www.earth.com/news/did-the-reptile-or-the-egg-come-first-scientists-have-changed-their-minds/>

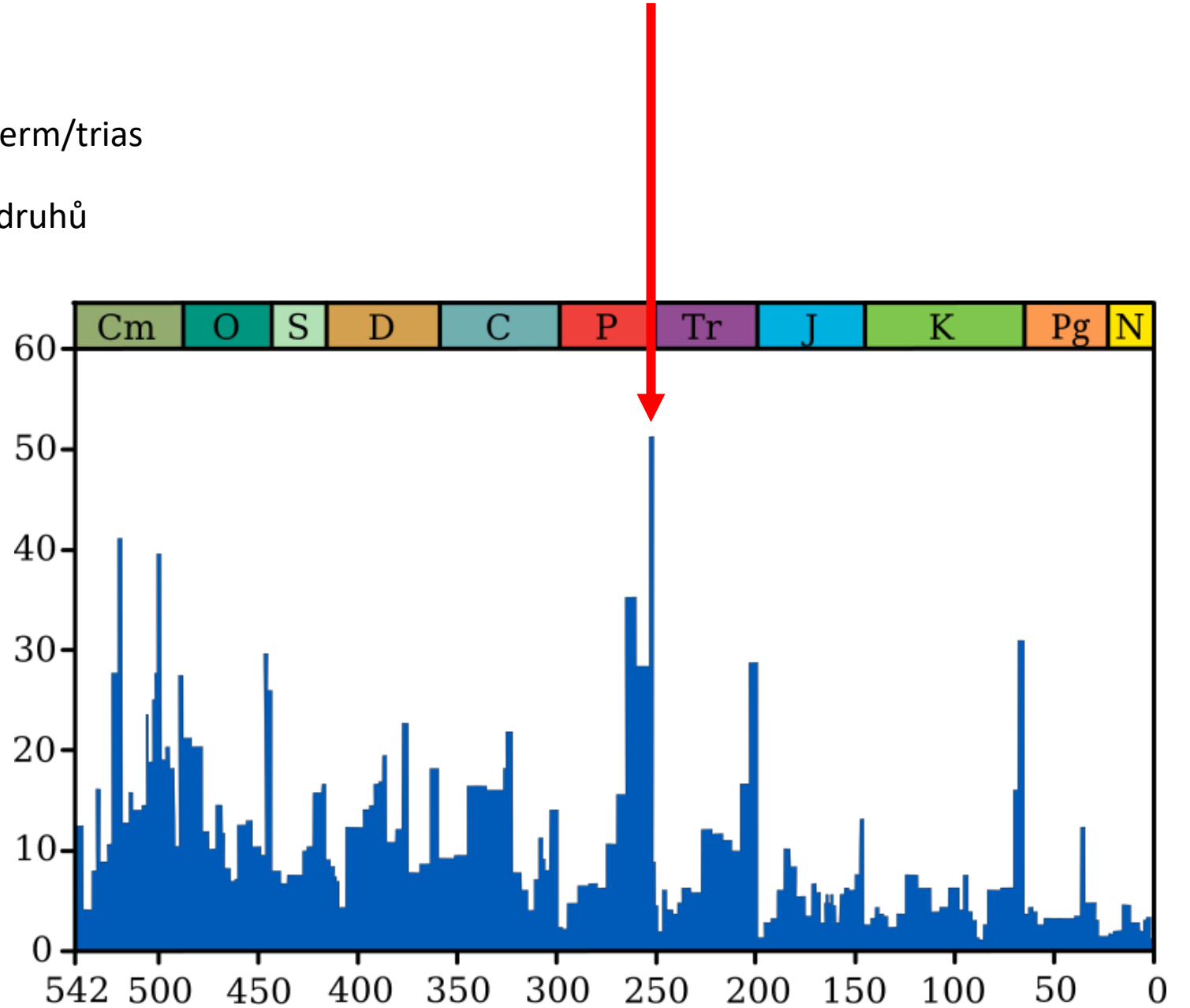
Permští plazi

Therapsidi - savcoví plazi – mnoho rysů ze „savčí morfologie“, osrstění, ?teplokrevnost



Vymírání na konci permu

- Nejsilnější vymírání fanerozoika
- Z fosilního záznamu mizí na hranici perm/trias
 - 57% čeledí
 - 80 až 85 % rodů a druhů mořských druhů



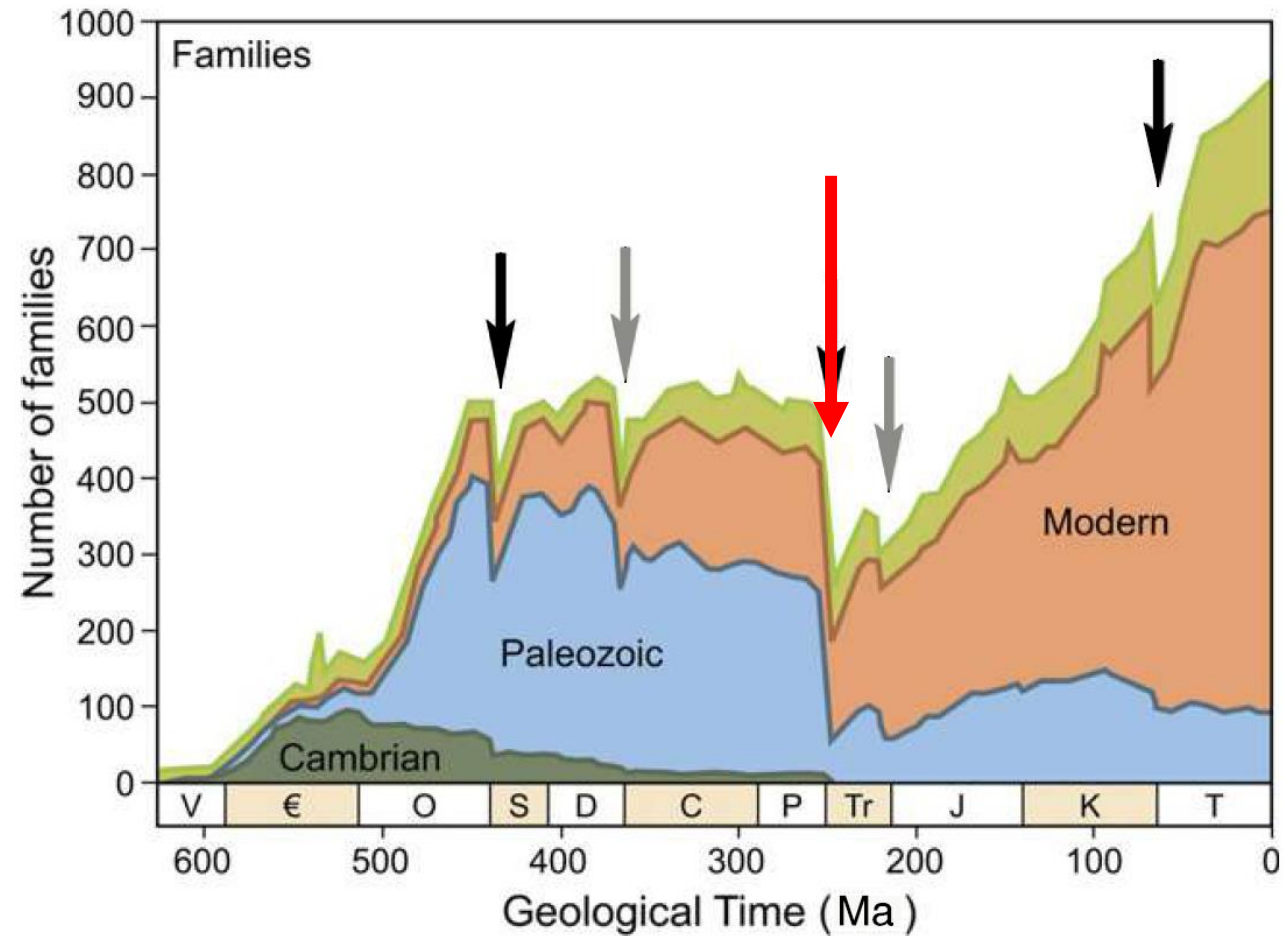
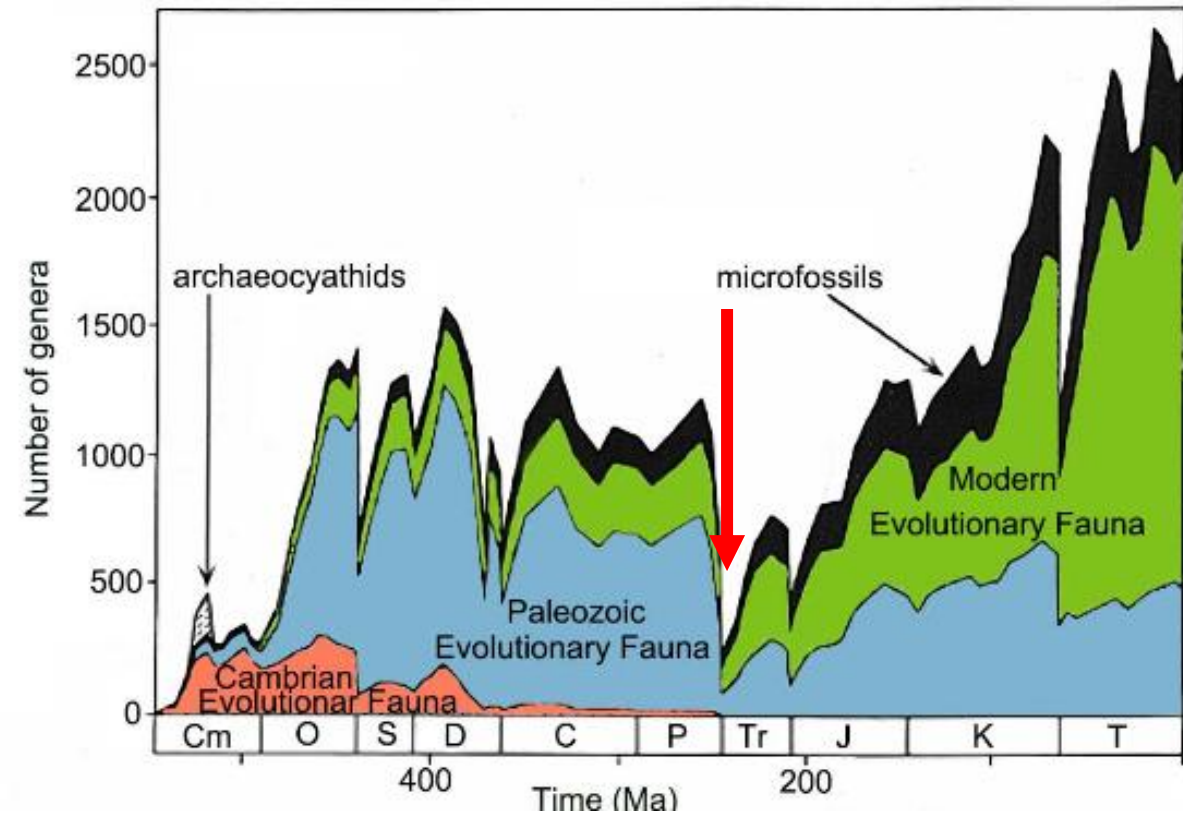
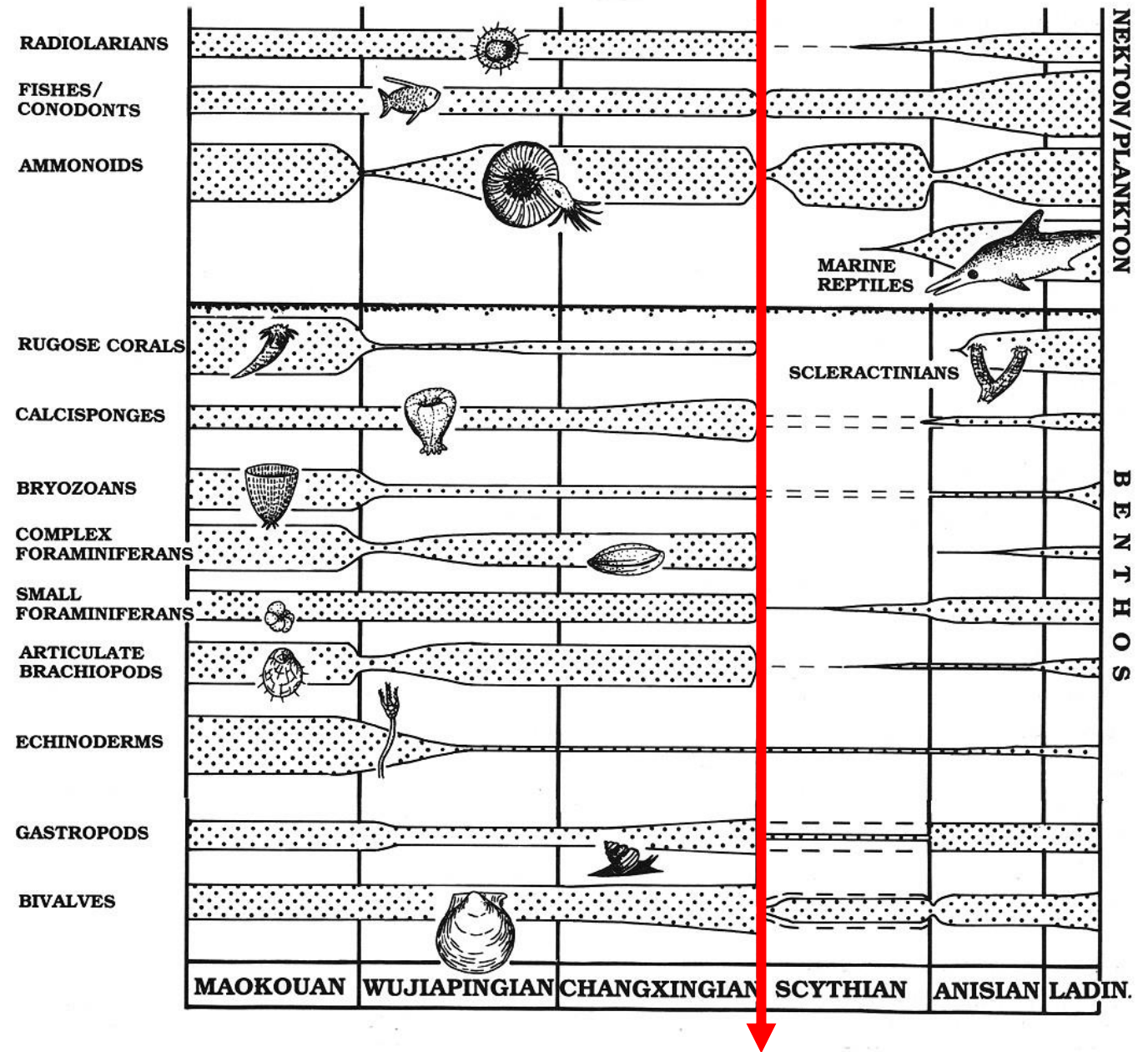


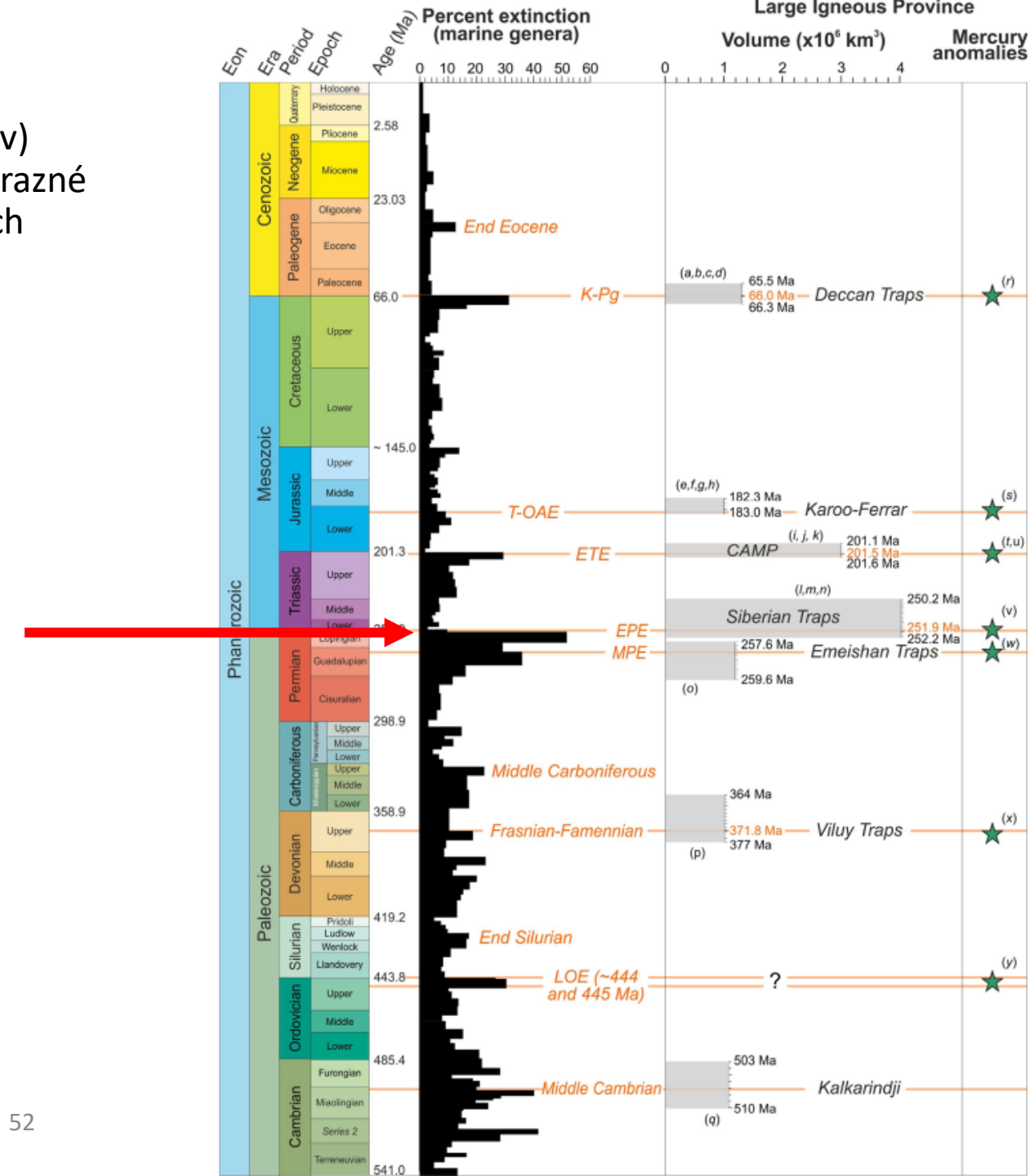
Fig. 1. Family diversity of marine animals through the Phanerozoic indicating the three evolutionary faunas (Cambrian [Cm], Paleozoic [Pz] and Modern [Md]) and the major extinction events (end Ordovician, late Devonian, end Permian, end Triassic and end Cretaceous). (After Sepkoski, 1981).

- Nejvíce postiženy mořské ekosystémy
- Výrazné vymírání útesotvorných organismů (korálů) (acidifikace oceánů)
- úplně vymírají trilobiti, paleozoičtí koráli
- téměř všichni amoniti
- většina planktonu
- Terestrická prostředí
 - tetrapodi – až 75 % čeledí
 - hmyz – z 27 řádů mizí 8 a 10 silně redukováno



Příčiny vymírání na hranici perm-trias

- **masivní vulkanizmus - Sibiřské trapy** (výlevy čedičových láv)
 - krátké a razantní ochlazení (zaprášení atmosféry) a pak výrazné oteplení (odplynění velkého množství CO₂, metanu a dalších skleníkových plynů sopečnou činností)
 - přímá toxikace prostředí (Hg atd.)



- Následovalo **výrazné oteplení** (velké množství skleníkových plynů v atmosféře)

- snížení atmosférického a mořského O₂

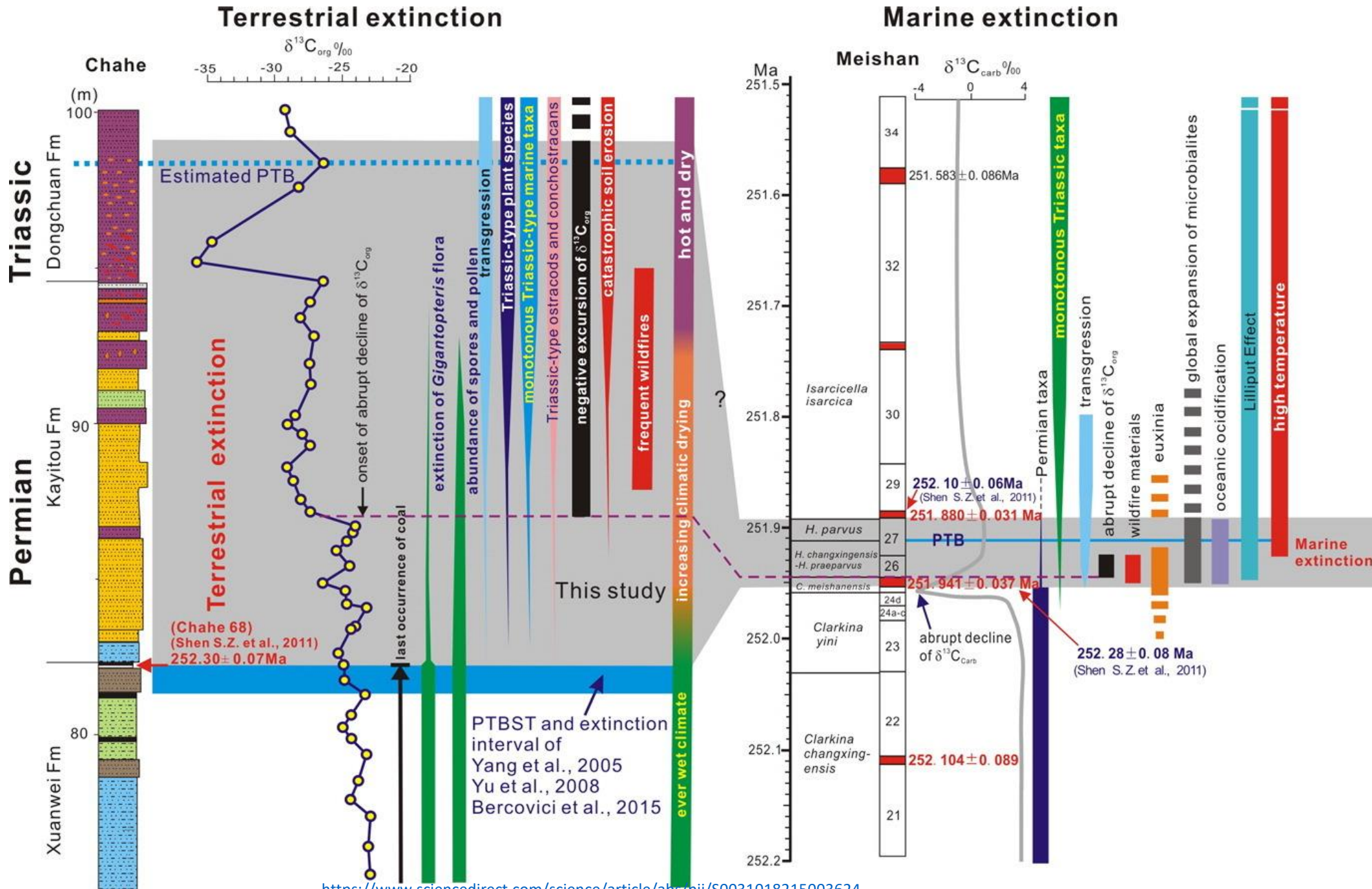
- globální anoxie / euxinie celý pozdní perm vrcholící P-T superanoxií

- **nárůst oceánského CO₂ (hyperkapnie)**

--tání hydrátů metanu (možné spuštění výlevy láv)

- oxidace CH₄ --- vzrůst CO₂

--- vzrůst CO₂, např. také kvůli chybějícím útesům

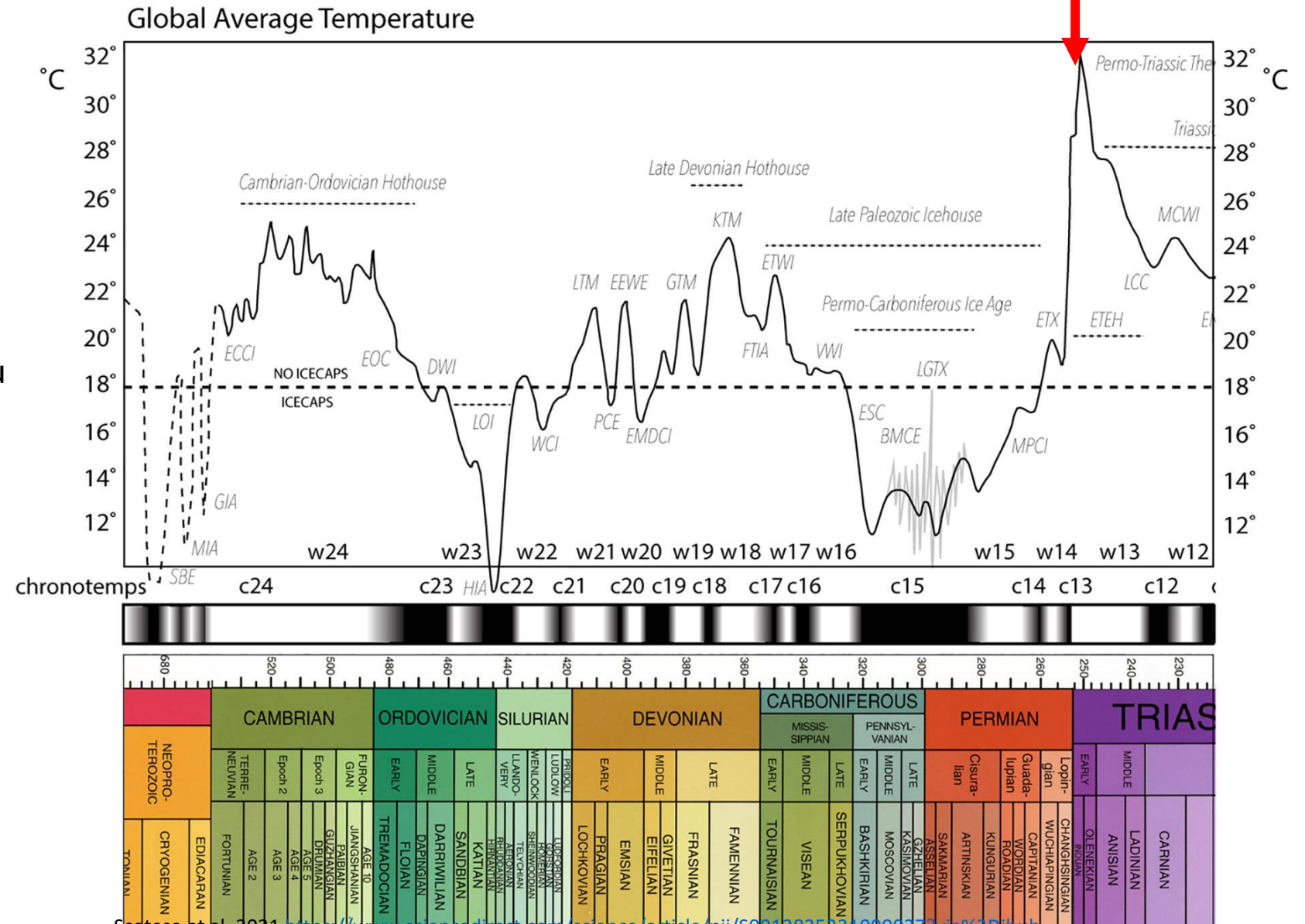


Extrémní klimatické výkyvy

--- zesílení skleníkového efektu

růst teplot na rovníku o 7°C ; na pólech o 20 °C.

- ústup oceánů na konci permu a rychlý růst hladiny na začátku triasu



Scotese et al. 2021 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825221000627?via%3Dihub>

Co jsme se dnes naučili?

- Vývoj flóry během paleozoika směřoval od mořských řas v kambriu, přes příbřežní nízké porosty primitivních výtrusných rostlin v ordoviku a siluru, po lesy výtrusných rostlin od devonu
- Vznik půd a lesů měl vliv na klima zvyšováním ukládání uhlíku do černých mořských břidlic a pevninského uhlí
- Při spojení s vlivem činnosti „supervulkánů“ způsobují hromadná vymírání na konci devonu
- Vyvrásnění pásemného pohoří Pangey s rozvojem rostlin vedlo k nejdelšímu zalednění fanerozoika (pozdně paleozoická doba ledová)
- Extrémně vysoké koncentrace O₂ v karbonské atmosféře
- Suché klima Pangey vedlo k dominanci nahosemenné flóry a plazů
- Vymírání na hranici perm-trias, největší vymírání fanerozoika – hlavním spouštěčem aktivita ve velké magmatické provincii na Sibiři