

Krajina v kvartéru (podzimní semestr 2018)

Moře a mořské sedimenty



Daniel Nývlt (daniel.nyvlt@seznam.cz)

MOŘSKÁ PROSTŘEDÍ – moře zaujímají téměř $\frac{3}{4}$ zemského povrchu

- dělení je založeno na vzdálenosti od břehu, hloubce vody a gradientu dna

Pobřežní prostředí

- rozhraní pevniny a moře
- ovlivňována mořskými procesy, ale ne vždy pod vodou
- sedimentace v ústích řek, na plážích, tidálních plošinách a v lagunách

Mělká moře

- většinou se jedná o kontinentální šelfy (oblasti kontinentální kůry zakryté mořem)
- nízký gradient dna 1:100; strmé šelfy 1:40
- šířka X0–X00 km od pobřeží po hranu šelfu (hloubka 100 až 400 m)

Kontinentální svah

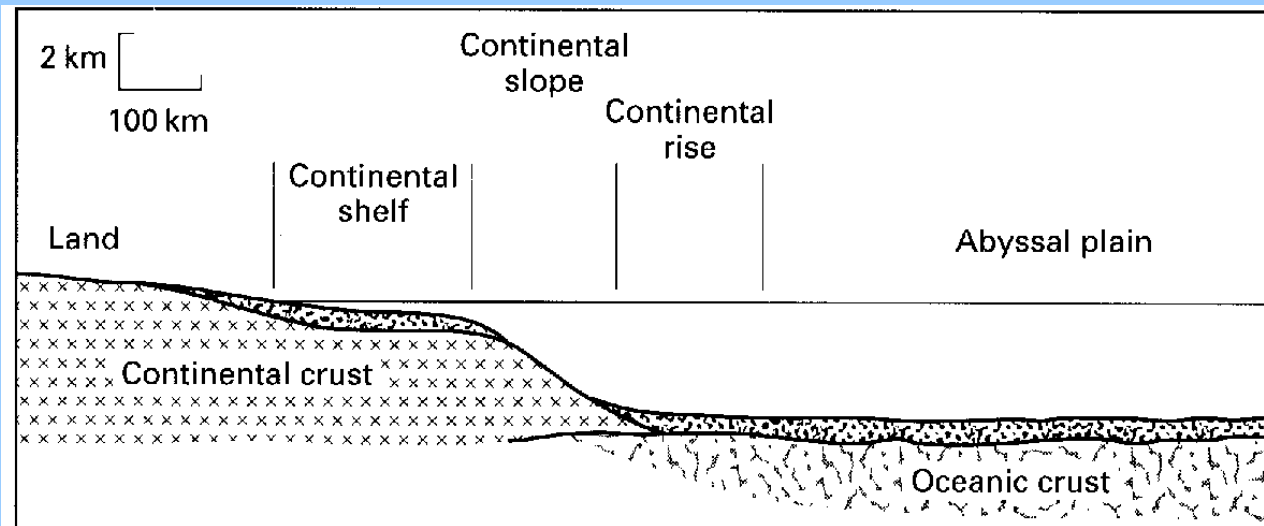
- sklon 2–7°

Hluboká moře

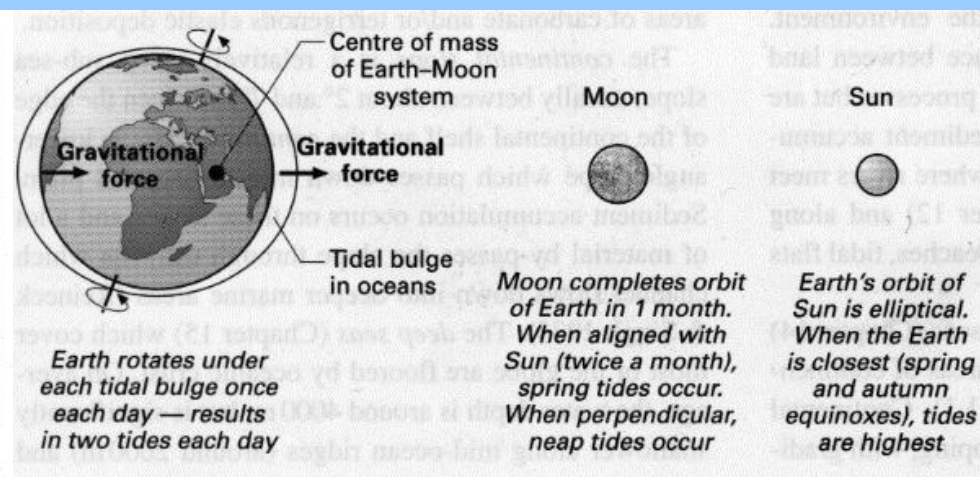
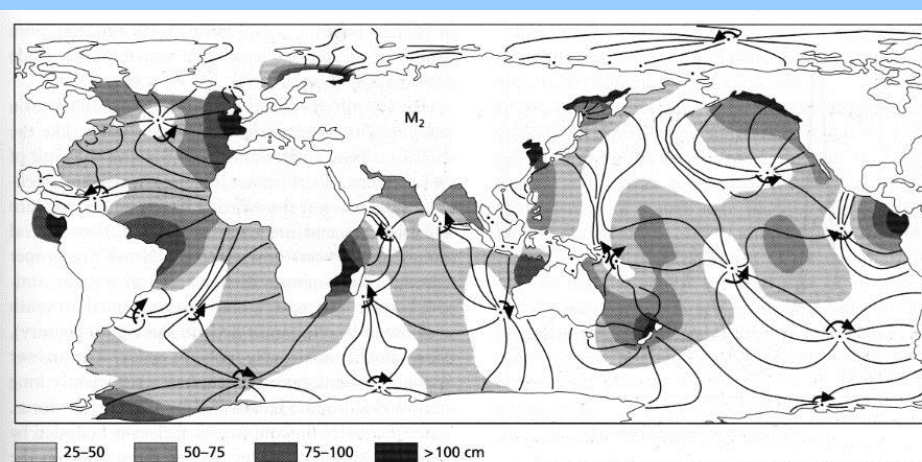
- nad oceánskou kůrou
- průměrná hloubka ~4 km, hřbety ~ 2 km, příkopy >8 km

Epikontinentální moře

- rozsáhlá moře nad kontinentální kůrou
- komunikace s oceány – průlivy
- vlastní cirkulace v hloubkách X0–X00 m



Pohyby vody vznikající gravitačním účinkem Měsíce a Slunce ⇒ Vytvoření tidální vlny



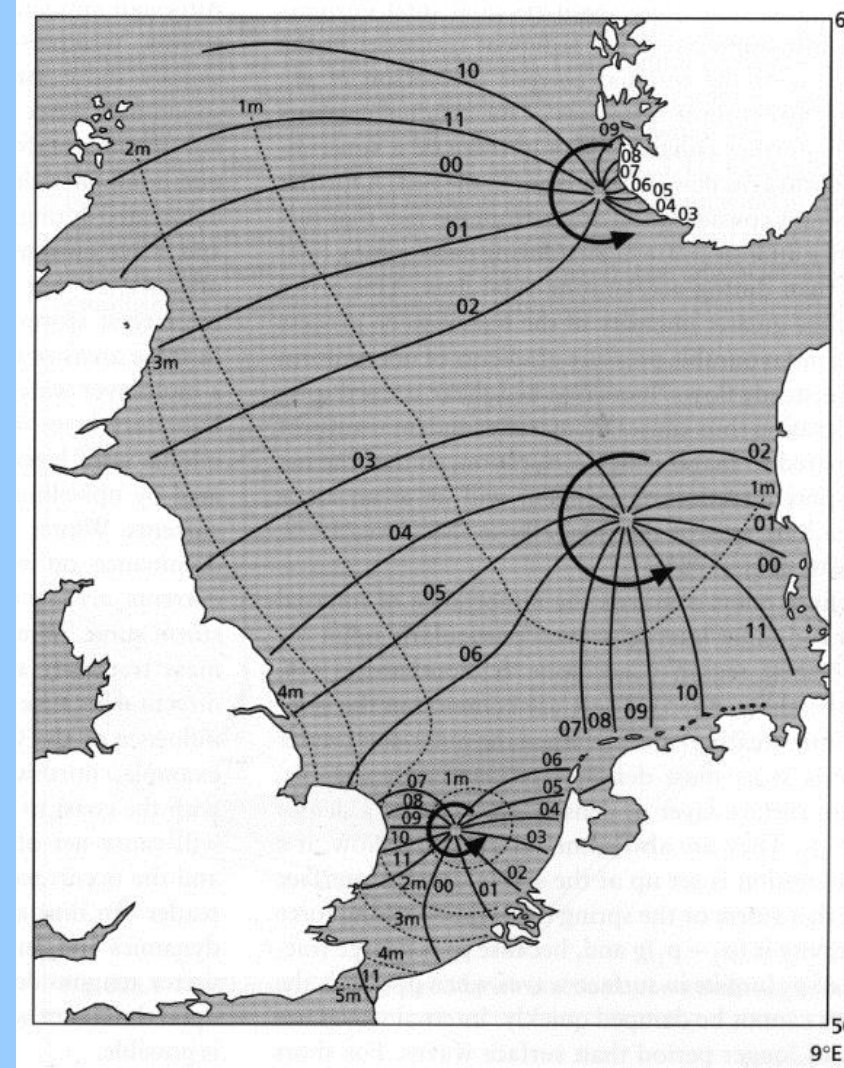
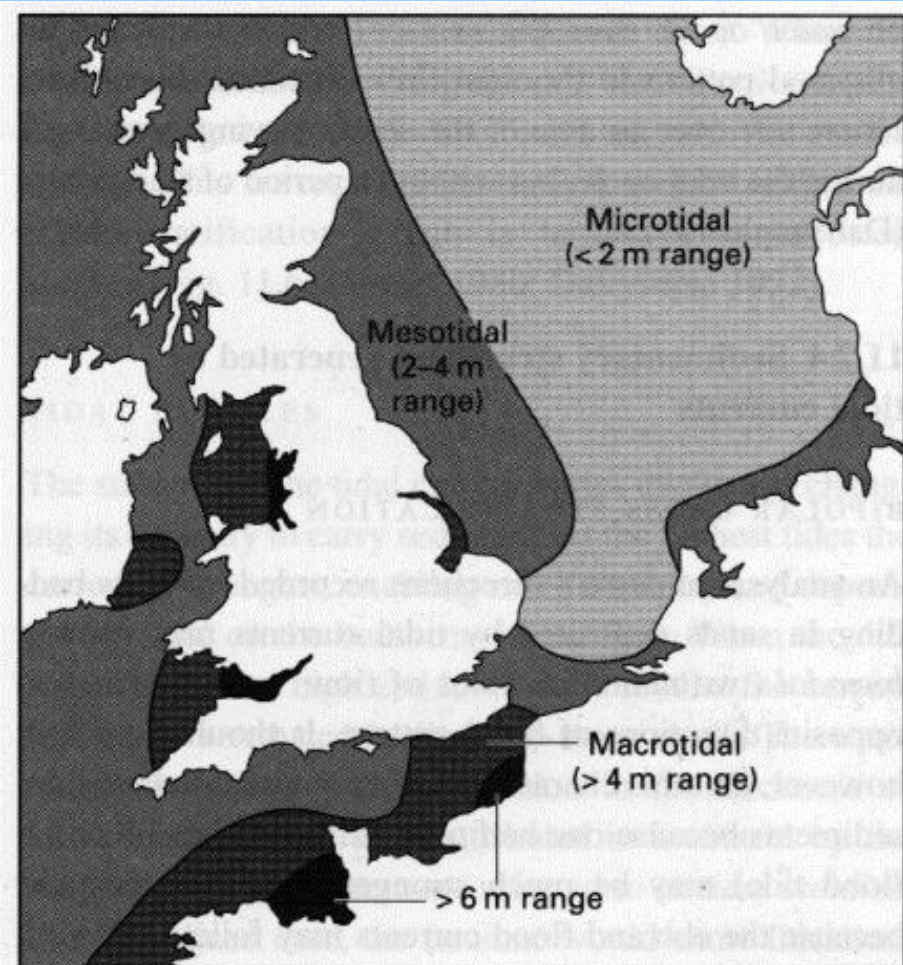
Tidální cyklus

- **Diurnální cyklus** – příliv a odliv je dvakrát za den (12 ½ h); jeden příliv je vždy větší
- **Skočný a hluchý příliv** – způsoben konfigurací Země Měsíce a Slunce
- **Roční cyklus** – způsoben elipticitou oběžné dráhy Země kolem Slunce (maxima – konec března a konec září, minima uprostřed léta a zimy)

ROZSAH DMUTÍ A TIDÁLNÍ PROUDY

V různých oblastech různá výška přílivu

Vliv topografie dna a reliéfu pobřeží na výšku přílivu



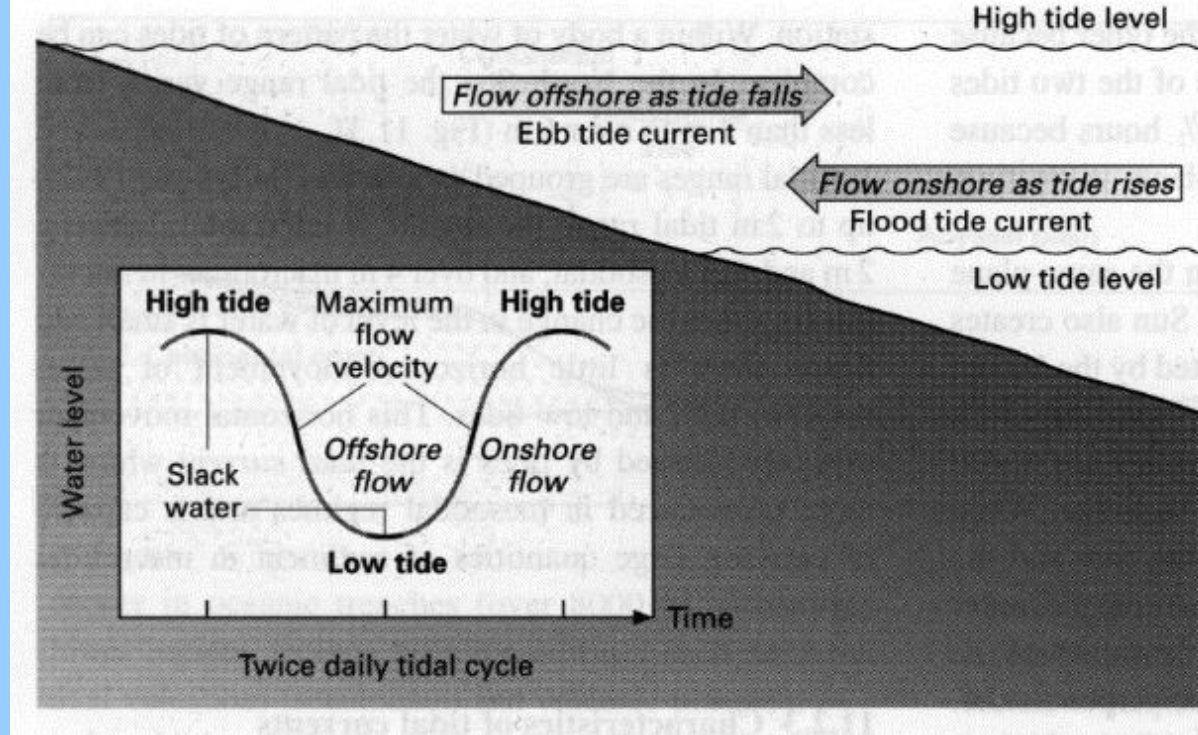
Dělení tidálních oblastí podle amplitudy dmutí

< 2 m mikrotidál

2-4 m mezotidál

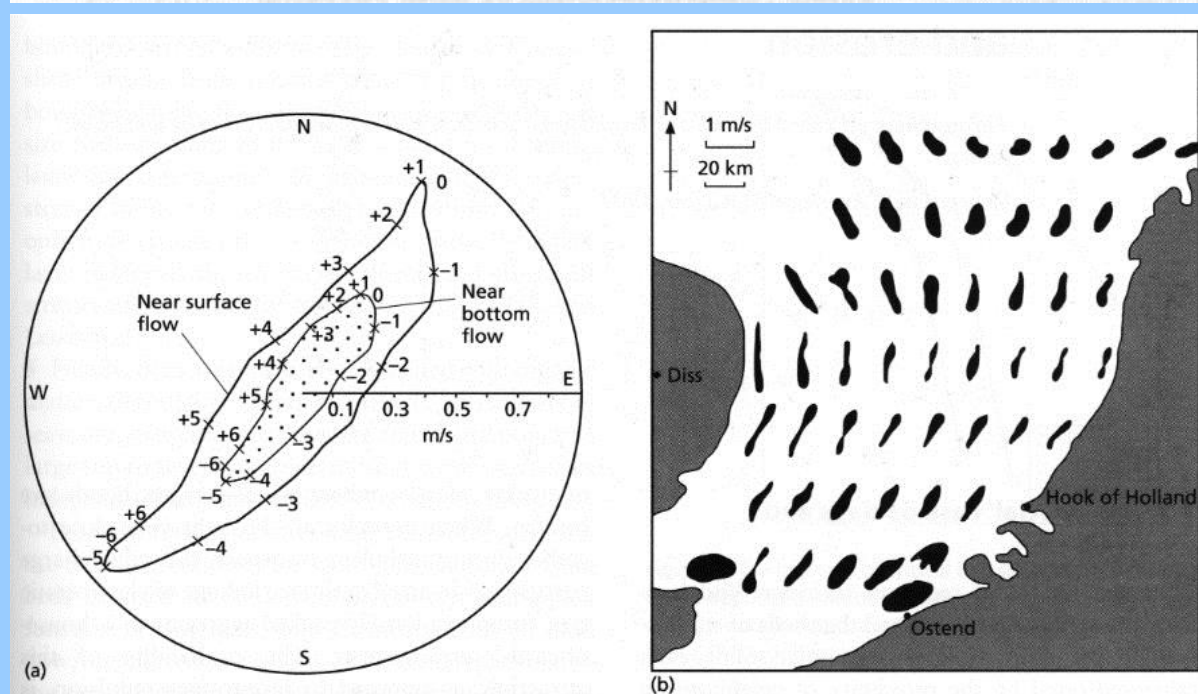
> 4 m makrotidál

Změny rychlosti přílivových a odlivových proudů



Tidální elipsa

– záznam změn rychlosti a směru
tidálních proudů v čase



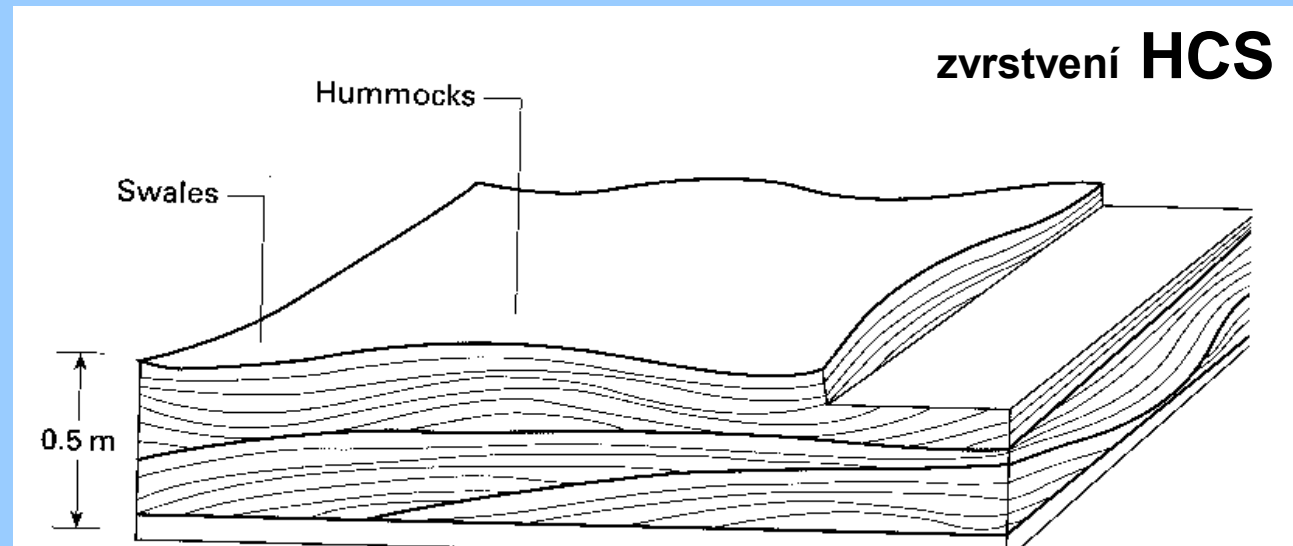
VLNĚNÍ

proudění je generované působením větru na vodní hladinu

dosah vlnění je definován bází vlnění

- **Báze běžného vlnění 5–15 m**
- **Báze bouřkového vlnění 20–30 m (maximum kolem 200 m)**

Pod bází bouřkového vlnění neovlivňuje vlnění dno!!!



Tsunami

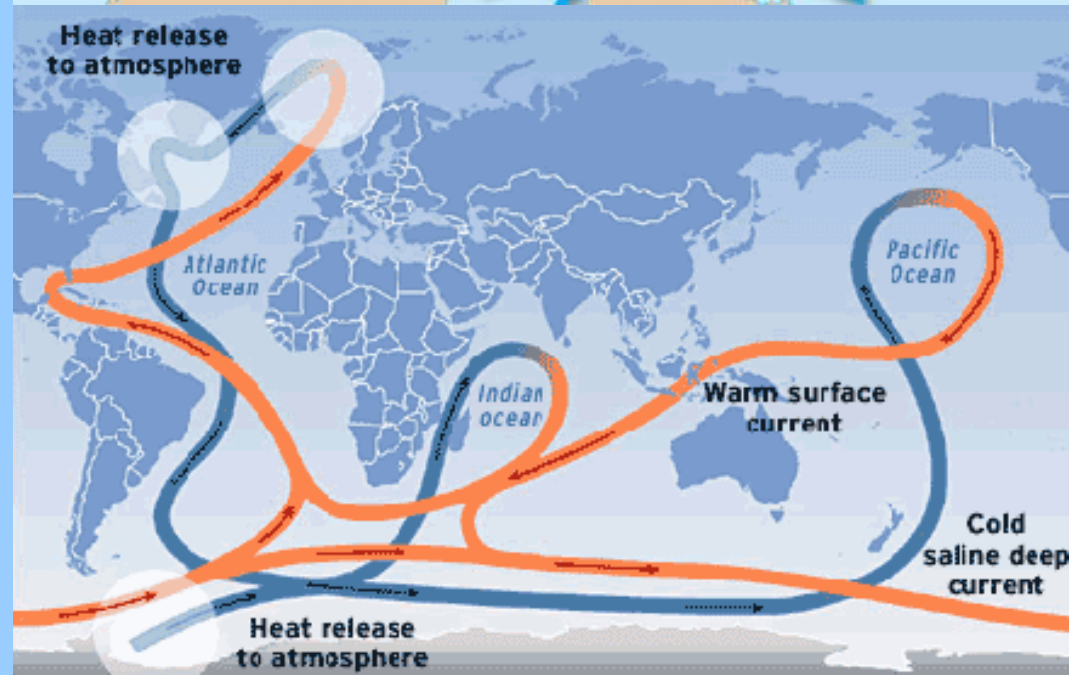
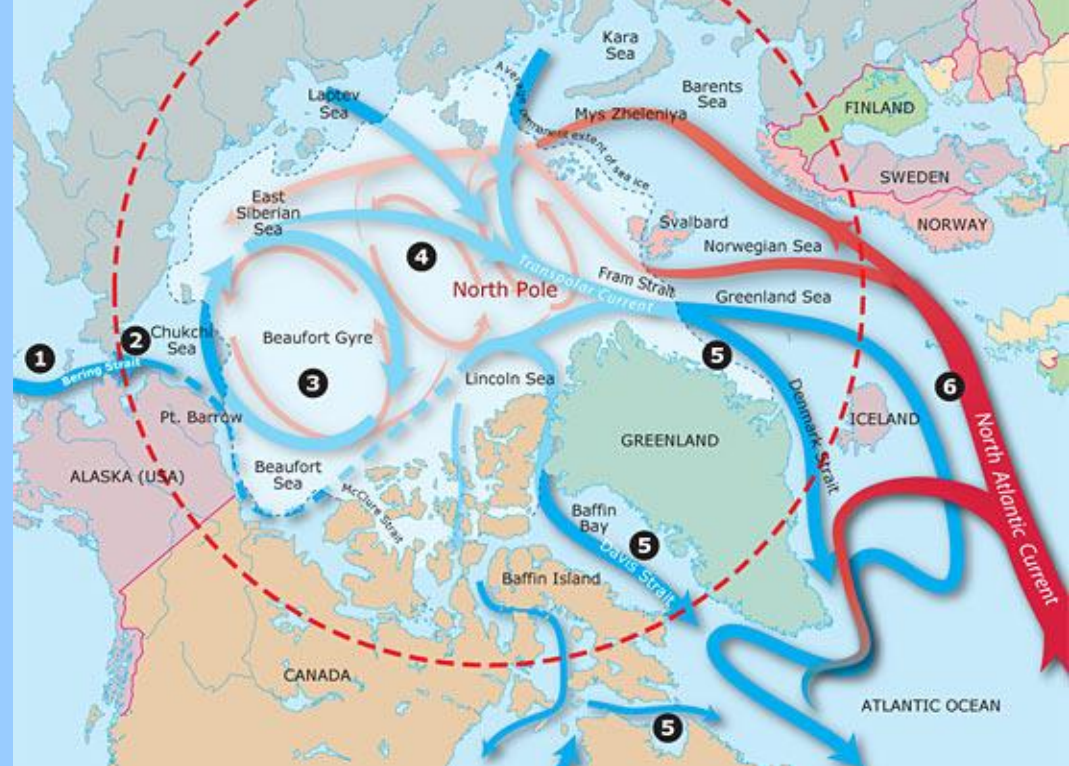
- vlny s periodou 10^3 – 10^4 s
- jsou generované *zemětřesením, impaktem, vulkanickou erupcí, podmořským skluzem*
- amplituda je X0 cm a vlnová délka X00 km v hluboké vodě, po dosažení šelfu nárůst amplitudy až na ~10 m

TERMOHALINNÍ PROUDĚNÍ

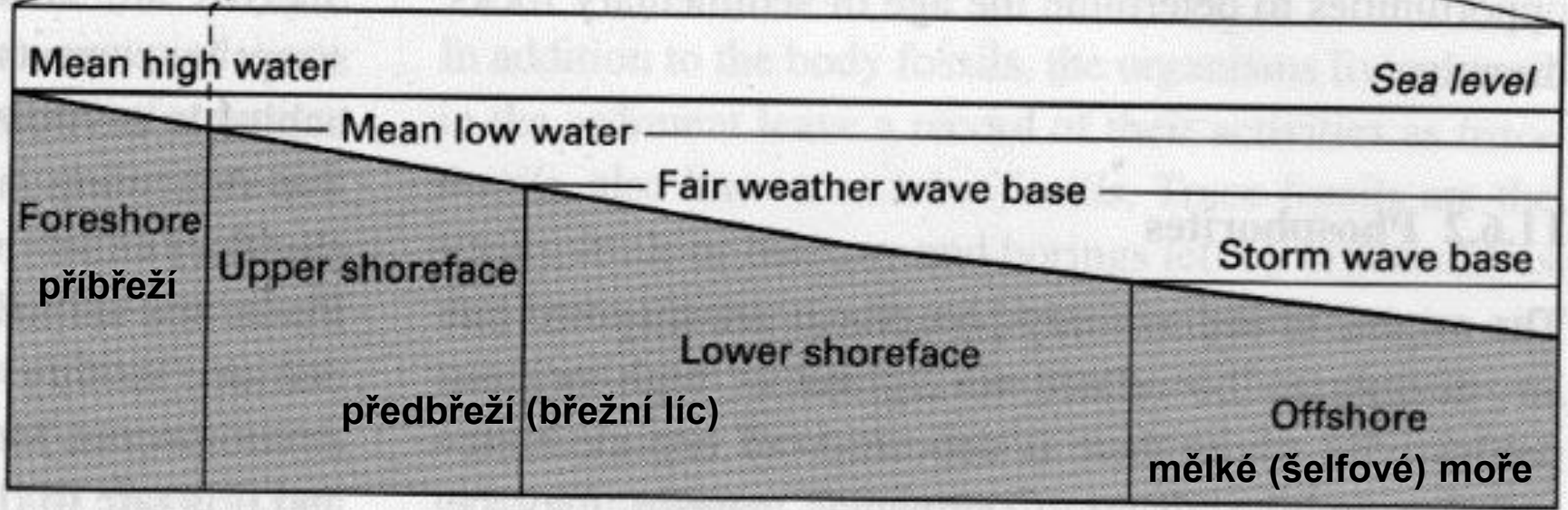
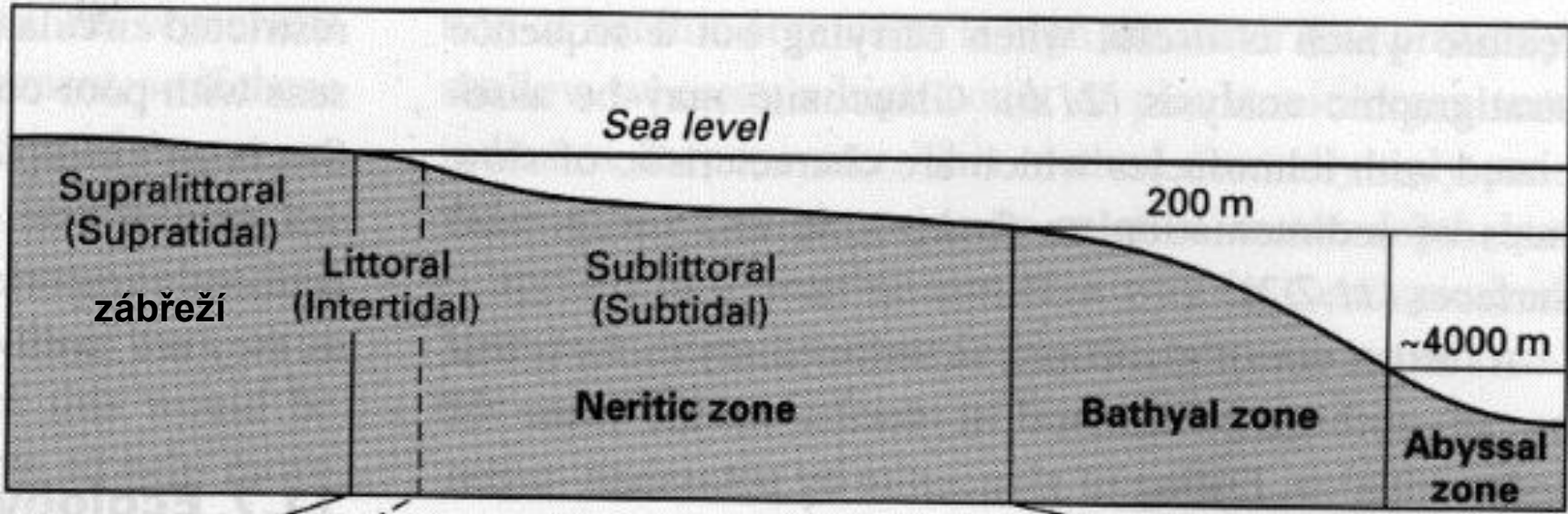
Globální **oceánická cirkulace** založená na **hustotních** (teplotních a salinitních) **rozdílech mořské vody**. Hustší tropické vody směřující do Arktidy **Severoatlantským proudem** se postupně ochlazují, naředují a klesají do hloubek abysálních pánví a směřují z Arktického oceánu zpět k jihu jako **Severoatlantské hluboké vody (NADW)**.

Vysoké zeměpisné šířky jsou zdrojovými oblastmi studené vody (především **ACC** a **Transpolární proud**)

Hlavním hnacím mechanismem **termohalinní cirkulace (THC)** je **ochlazování** oceánské vody **ve vysokých šířkách**, tím dochází k jejímu těžknutí a klesání, což přímo pohání celou cirkulaci.



Dělení mořských prostředí na základě dominujících procesů



MĚLKÁ MOŘE

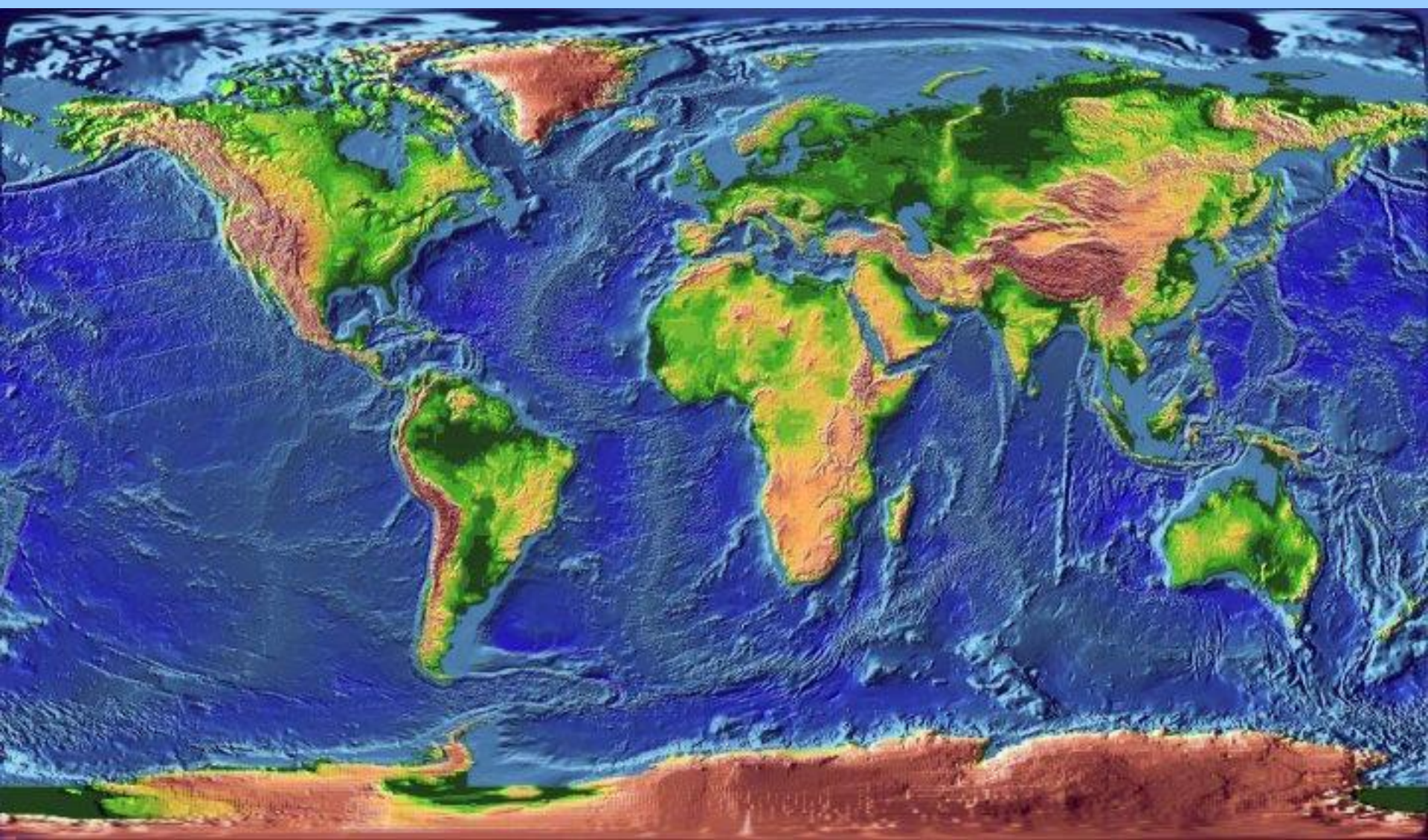
šelfy, epikontinentální moře

Zdroj sedimentu:

- redistribuce materiálu z pobřeží tidálními, bouřkovými, nebo geostrofickými proudy
- biogenní karbonátová produkce – mimo dosah přínosu terigenního materiálu
- evapority – v epikontinentálních mořích se zvýšenou salinitou

➤ **Šelf s dominancí bouřkového vlnění**

➤ **Šelf s dominancí dmutí**



ŠELFY S DOMINANCÍ BOUŘKOVÉHO VLNĚNÍ

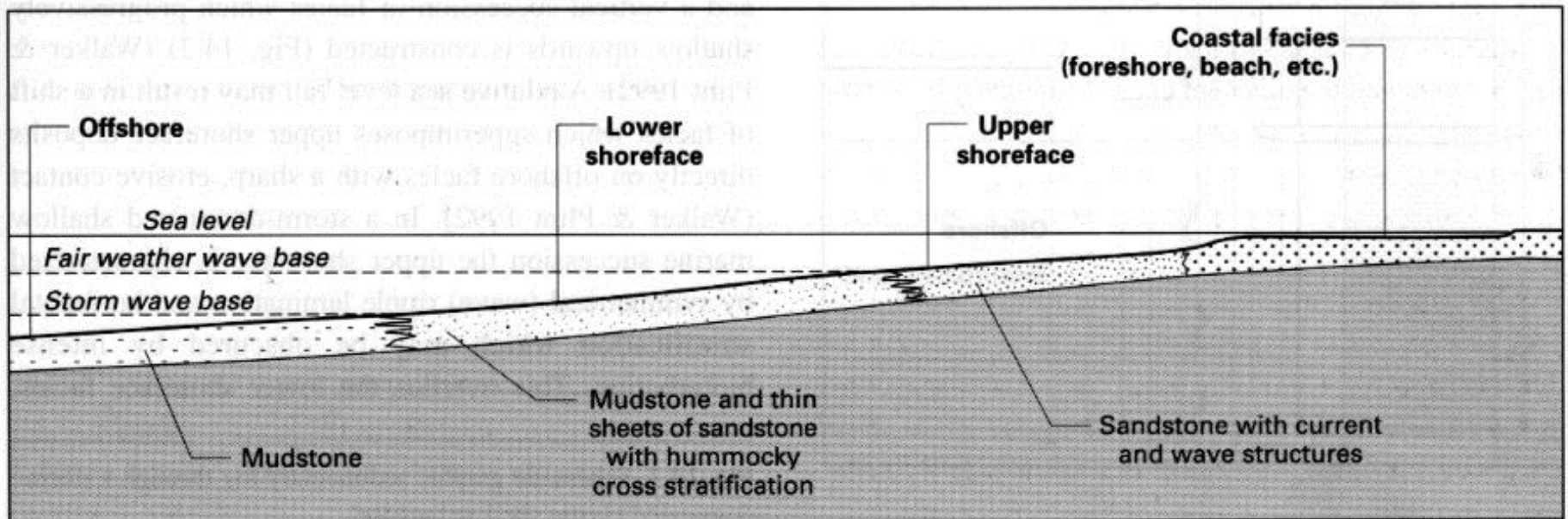
Svrchní předbřeží (upper shoreface)

- intenzivní přepracování sedimentu vlněním ⇒ vlnové čeřiny, horizontální zvrstvení
- ve větších hloubkách se ukládá jemný materiál během nižší energie vlnění ⇒ mázdřité zvrstvení
- směrem od pobřeží ubývá vlnových čeřin

Spodní předbřeží (lower shoreface)

Transport a sedimentace během bouřek (dosah bouřkového vlnění 20–50 m) ⇒ **tempestity** (ukládání **X0 km** od pobřeží; mocnost **mm** až **dm**, **proximální tempestity** – erozní báze, hrubší materiál, **distální tempestity** – jemnější laminovaný písek)

- mezi bouřkovými epizodami se ukládá bahno – v proximálních částech často erodováno následnými bouřkami; bahna přibývá směrem od břehu



Mělká (šelfová) moře (offshore)

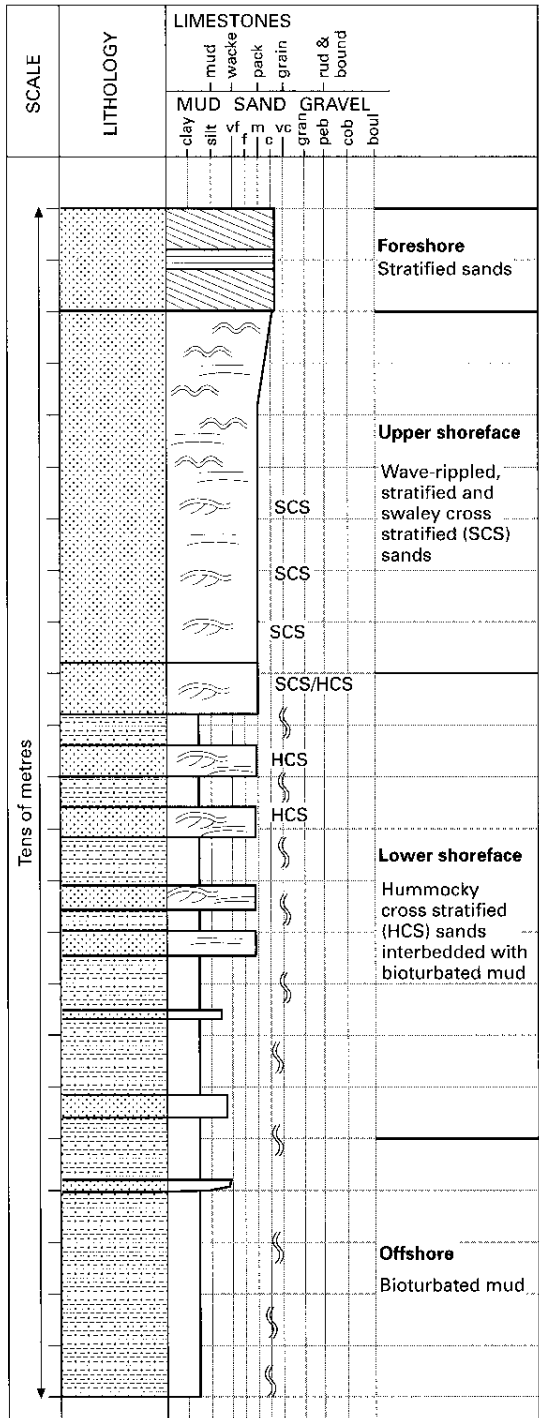
- sedimentace jemného materiálu – bahno

Bioturbace

– bentická fauna ničí primární sedimentární struktury!!!



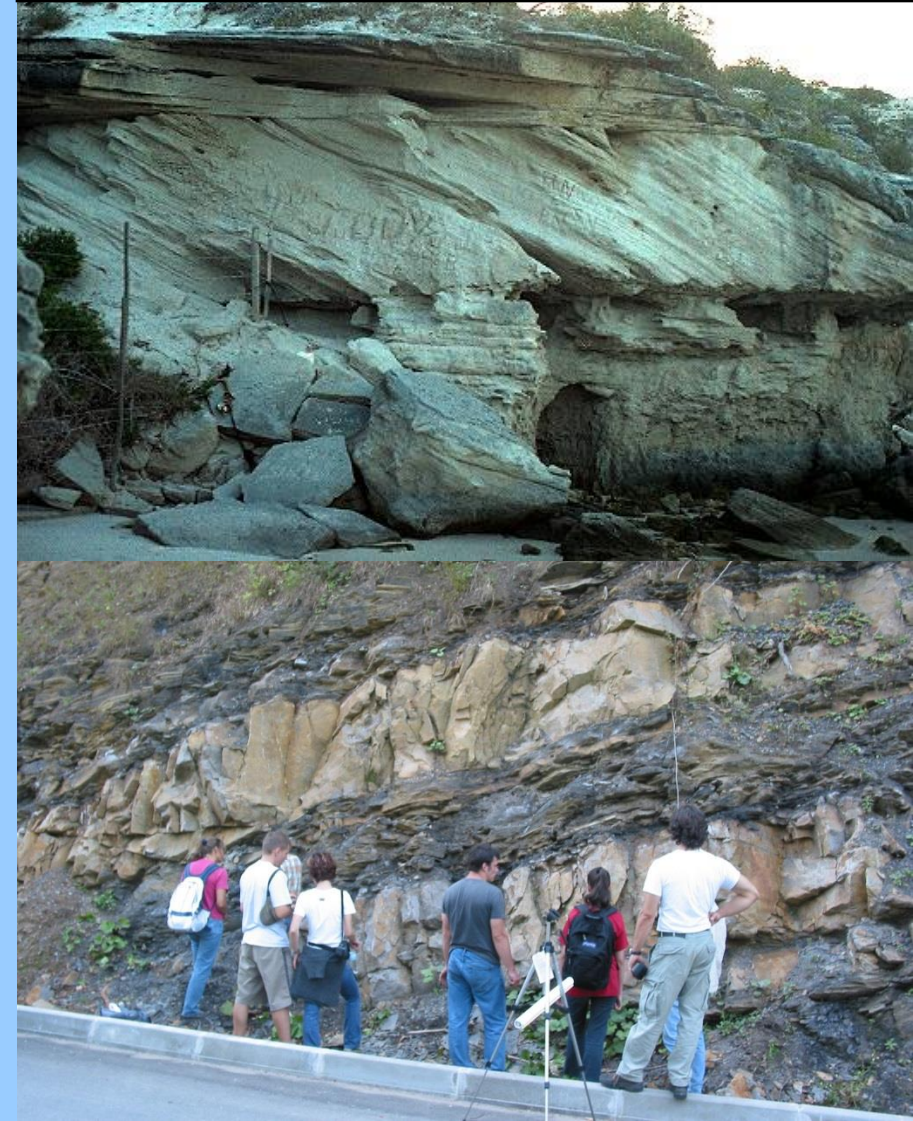
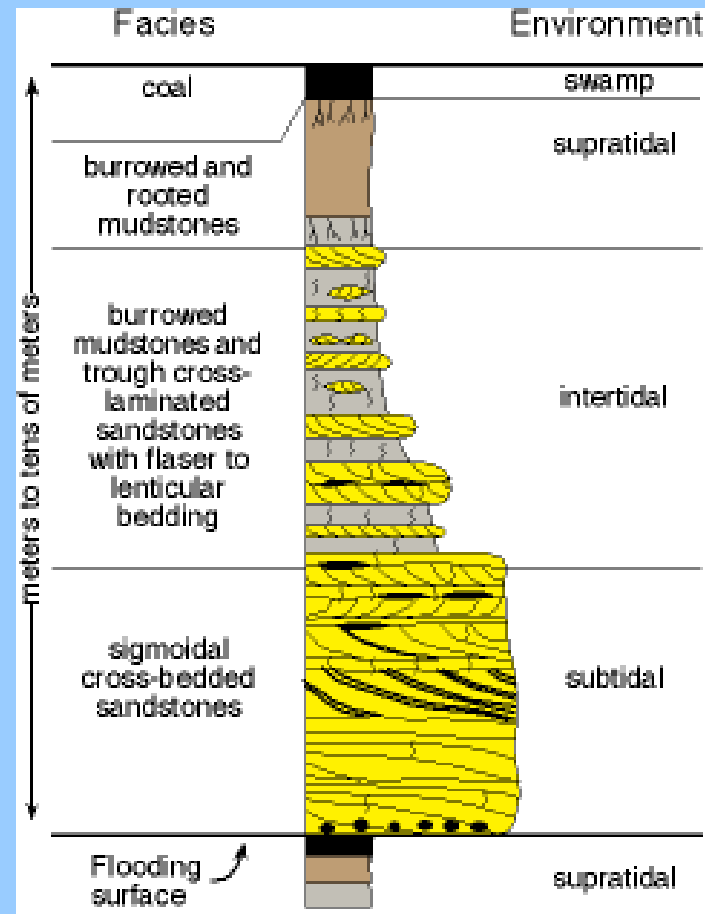
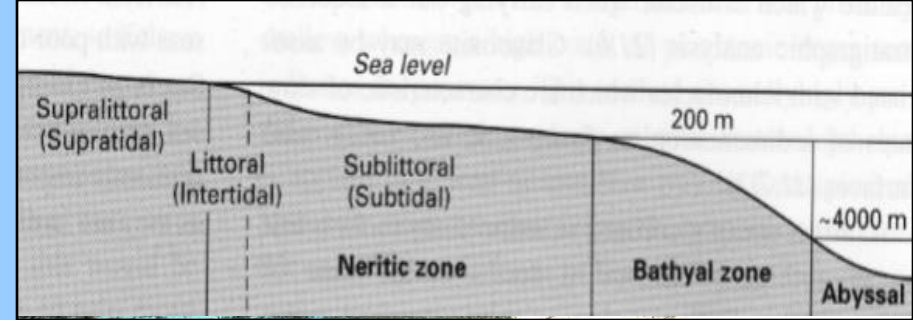
Typický profil uloženinami šelfu s dominancí bouřkového vlnění



ŠELFY S DOMINANCÍ DMUTÍ

- oblast subtidálu (sublitoral)
- hloubkový dosah tidálních proudů až 100 m (i více)
- často přetiskuje sedimentární záznam vlnění a bouřek (hlavně v makrotidálu)

⇒ v makrotidálu nebývají zachovány bouřkové sedimenty



MĚLKOMOŘSKÉ KARBONÁTOVÉ SYSTÉMY

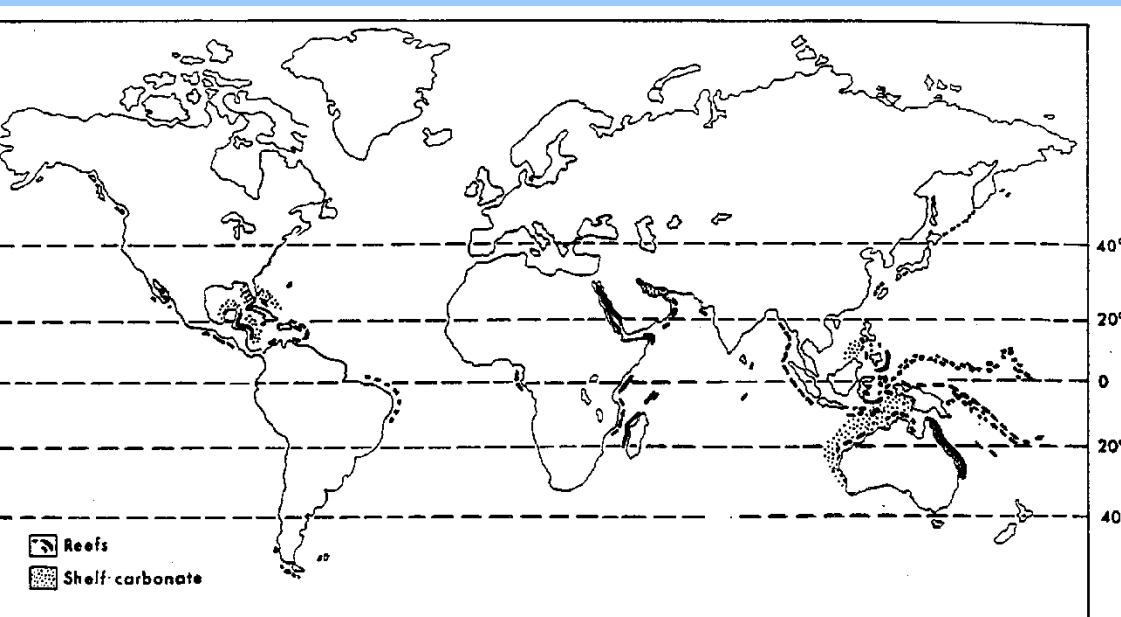
(KARBONÁTOVÉ PLATFORMY S.L.)

KARBONÁTOVÁ PRODUKCE - závisí na teplotě, salinitě a světle

- nízké zem. š., $T > 15^{\circ}\text{C}$ a normální salinita \Rightarrow korály, Ca zelené řasy, další organismy (*chlorozoan*)
- vyšší salinita \Rightarrow jen Ca zelené řasy (*chloralga*)
- chladnější vody \Rightarrow bentické foraminifery a mlži (*foramol*)
- většina mořských bentických organismů preferuje klidnější podmínky
- hermatypní korály se vyskytují v čistých mělkých vodách s vysokou energií vlnění

Díky světlu největší výskyt fotosyntetizujících organismů ve svrchních 10–15 m

\Rightarrow největší karbonátová produkce \Rightarrow **karbonátová továrna**



Great Barrier Reef, Cairns, Austrálie



HLUBOKOMOŘSKÁ PROSTŘEDÍ

~70 % zemského povrchu zaujímají oceány rozkládající se nad oceánskou kůrou

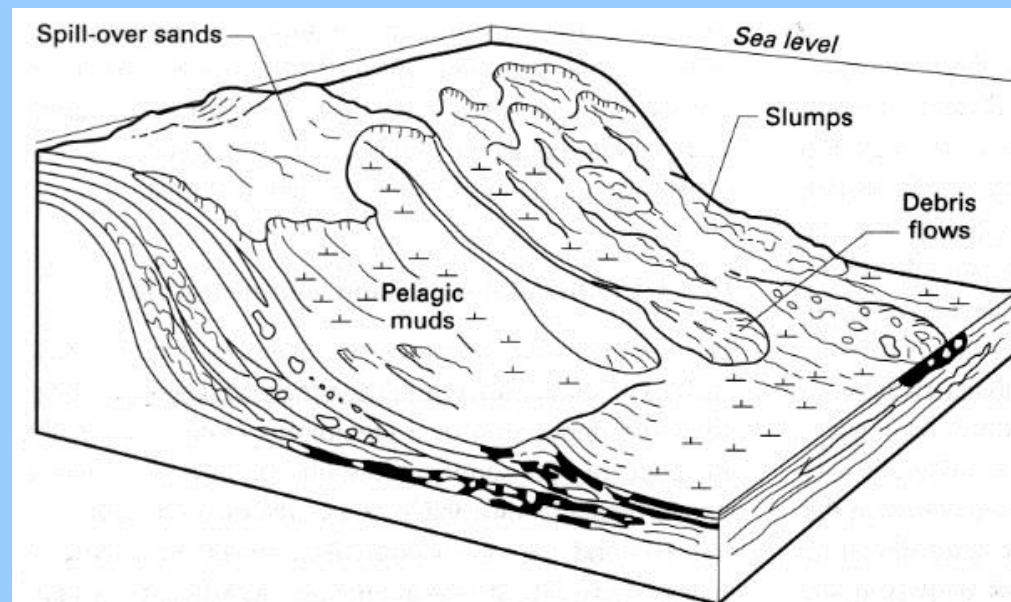
Tvorba nové oceánské kůry na středoocéánských hřbetech a současný zánik staré oceánské kůry v subdukčních zónách ⇒ nejstarší oceánské dno jurského stáří (sz. Pacifik). Záznam starých oceánů je zachován v orogenních pásech kolizních zón.

KONTINENTÁLNÍ SVAH A ÚPATÍ (batyální zóna)

- přechodová oblast mezi kontinentálním šelfem a oceánským dnem
- šířka až 100 km (ve směru sklonu)
- sklon 2–10°
- náchylnost sedimentů kontinentálního svahu ke gravitačním procesům

Povaha a objem sedimentu ukládaného na kontinentálním svahu závisí na velikosti šelfu a typu jeho sedimentů.

- **Úzké šelfy** ⇒ pokryvové písčité sedimenty
- **Široké šelfy** ⇒ minimum nebo žádný hrubý materiál; dominuje pelagická nebo hemipelagická sedimentace



40 km

Cracks along outer shelf:
Hints of future,
large-scale failure?

kaňony

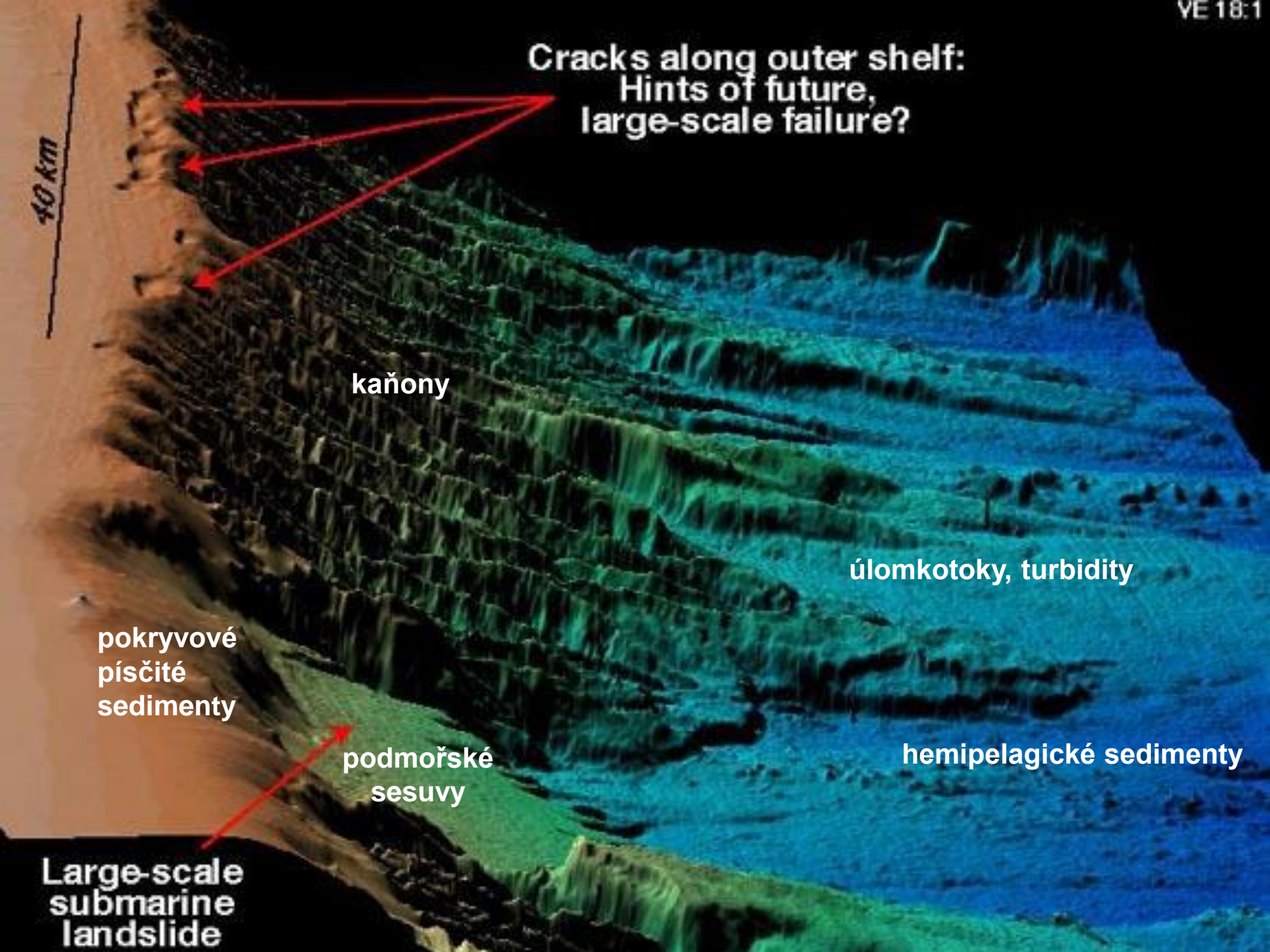
úlomkotoky, turbidity

pokryvové
písčité
sedimenty

podmořské
sesuvy

hemipelagické sedimenty

Large-scale
submarine
landslide



OCEÁNSKÉ ÚPATÍ A DNO

- hlavní akumulace podél úpatí ⇒ turbidity (boumova sekvence), úlomkotoky

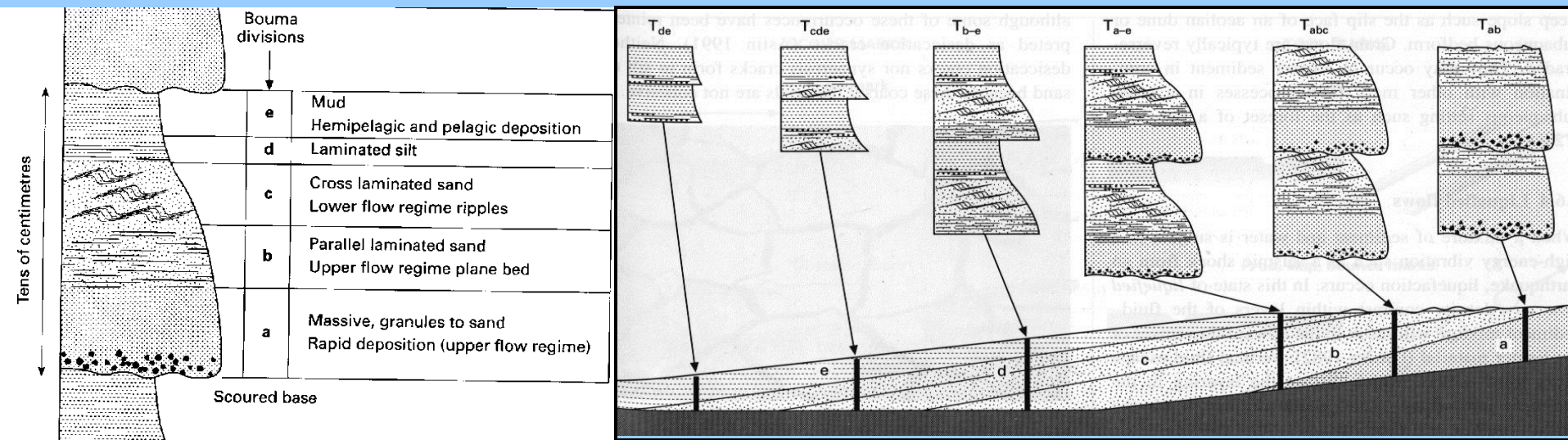
Příčiny:

- mobilizace nezpevněného a málo zpevněného materiálu kontinentálních svahů při zemětřeseních
- vliv bouřkového vlnění na hlubší části šelfu
- pokles mořské hladiny
- rozsáhlé turbiditní proudy generované z velkých delt (např. gravitační procesy na čelech delt)

- v centrální části oceánů pelagická sedimentace

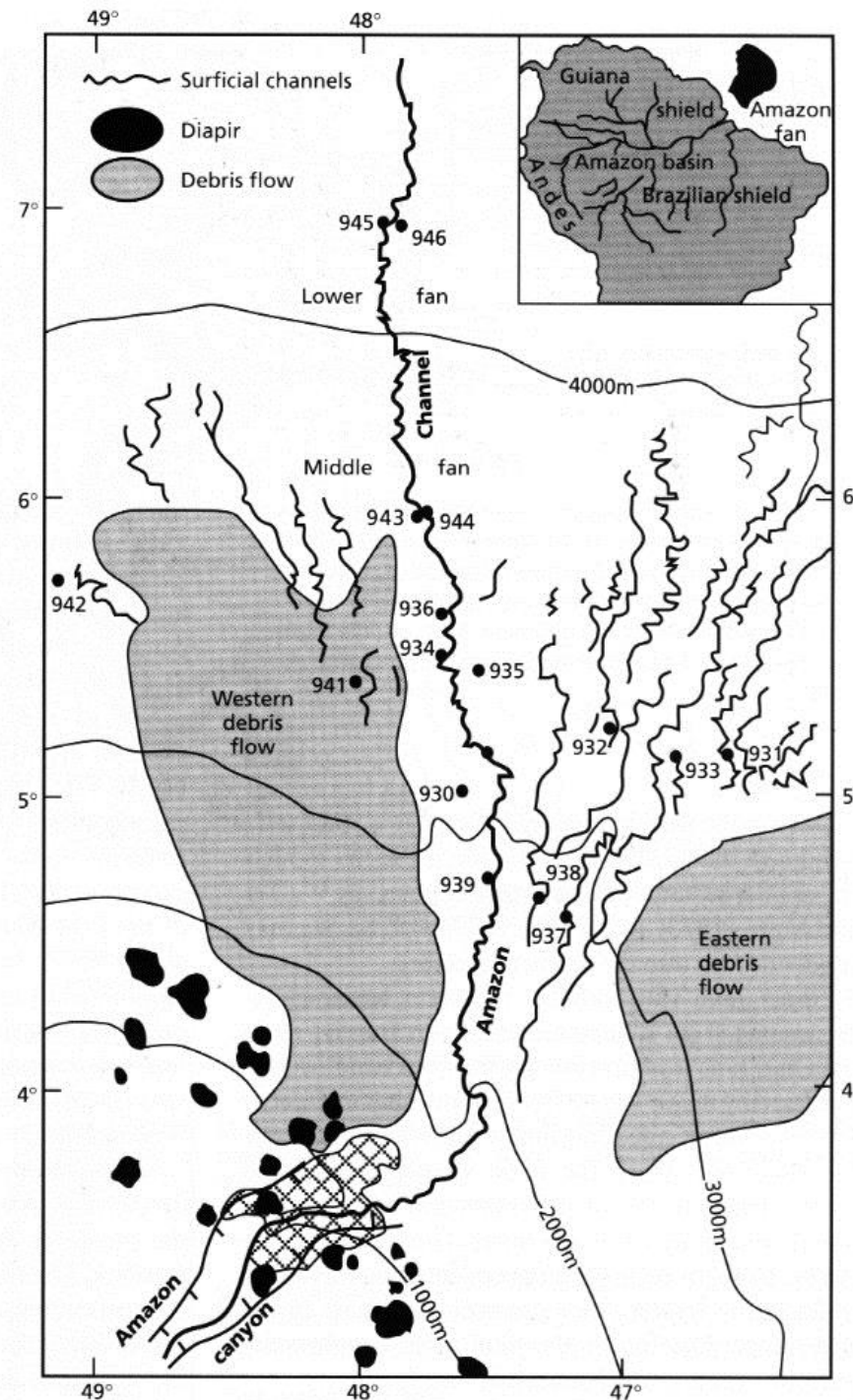
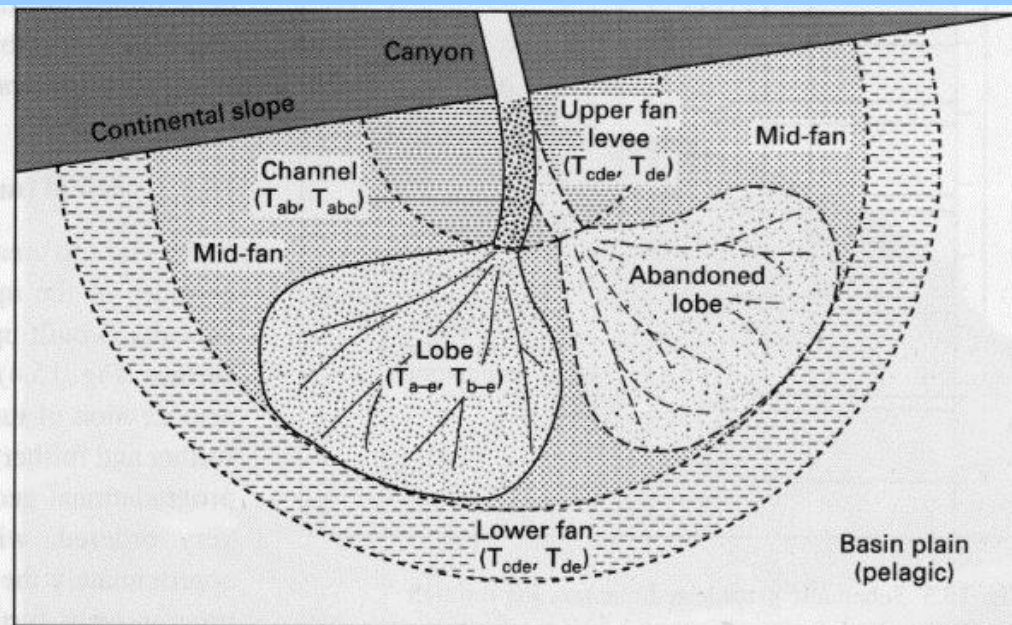
SEDIMENTÁRNÍ ZÁZNAM TURBIDITNÍCH PROUDŮ

Boumova sekvence



PODMOŘSKÉ VĚJÍŘE

- sedimentární tělesa tvaru velmi plochého kužele; velikost X km až X000 km (napříč)
- v ústí podmořských kaňonů, při úpatí kontinentálního svahu a na okraji oceánské pánve
- turbiditní proudy – hlavní sedimentární procesy, které přinášejí materiál ze šelfu
- zjemňování sedimentu směrem k vnějšímu okraji ⇒ dělení vějíře na tři hlavní části (svrchní, střední a spodní)
- moderní vějíře jsou převážně bahnité, s koryty a agradačními valy a výraznou sinuositou.



PELAGICKÁ A HEMIPELAGICKÁ SEDIMENTACE V HLUBOKÝCH MOŘÍCH

Hemipelagické sedimenty

- jemnozrný terestrický a vulkanický materiál (jíl, jemnozrný prach) transportovaný před uložením v suspenzi v mořské vodě
- velmi pomalá sedimentace mm–cm/ka; v oblastech s vysokým přínosem terigenního materiálu je sedimentace vyšší
- smíchán s pelagickým materiálem

Pelagické sedimenty

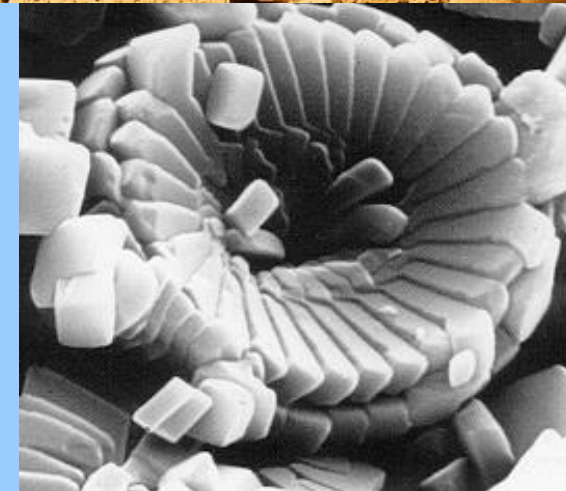
- převážně jemnozrný CaCO_3 nebo SiO_2 materiál biogenního původu – skeletární částice a schránky nektonních a planktonních organismů
- hrubý materiál – “dropstones“

Hlavní producenti karbonátů:

- **řasy (Chrysofita)** ⇒ kokolity po odumření ⇒ kokolitový kal
- **planktonické foraminifery** ⇒ foraminiferový kal
- oba typy vznikají v teplých mořích

Hlavní producenti křemenného materiálu:

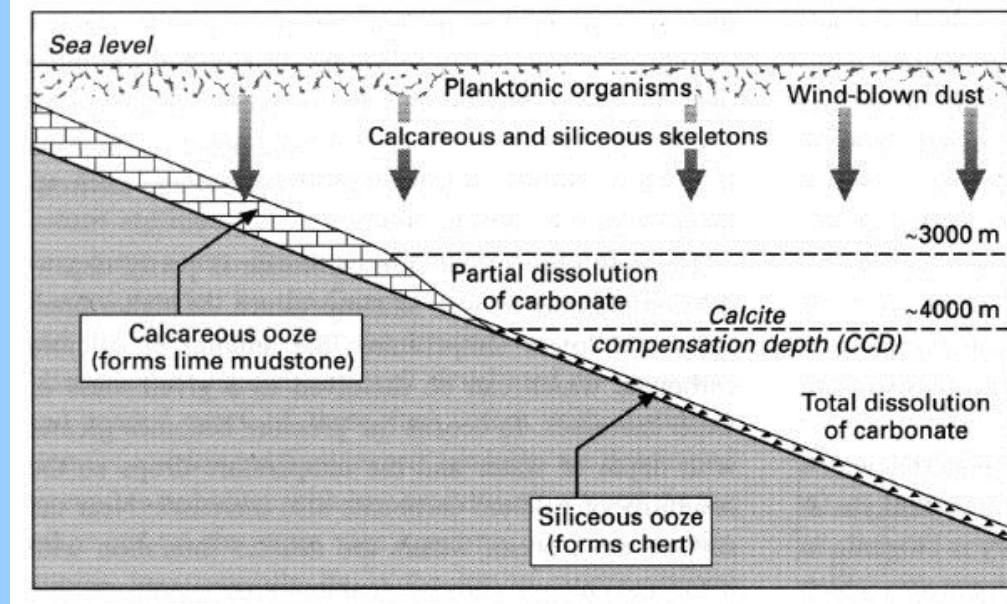
- **mřížovci (radiolarie)** ⇒ křemitý kal
- **rozsivky (diatomy)**



ROZPOUŠTĚNÍ KARBONÁTU

- rozpustnost CaCO_3 závisí na tlaku a teplotě
- 3 km začátek výrazného rozpouštění CaCO_3 v podobě **kalcitu**
- 4–5 km všechen kalcit rozpuštěn – **Calcite compensation depth (CCD)**
- ACD pro **aragonit** je výš

Změna CCD a ACD během geologické minulosti, jejich výrazné poklesy nastaly ve středním eocénu a během miocénu.



Sedimentace pod CCD \Rightarrow hustotní proudy

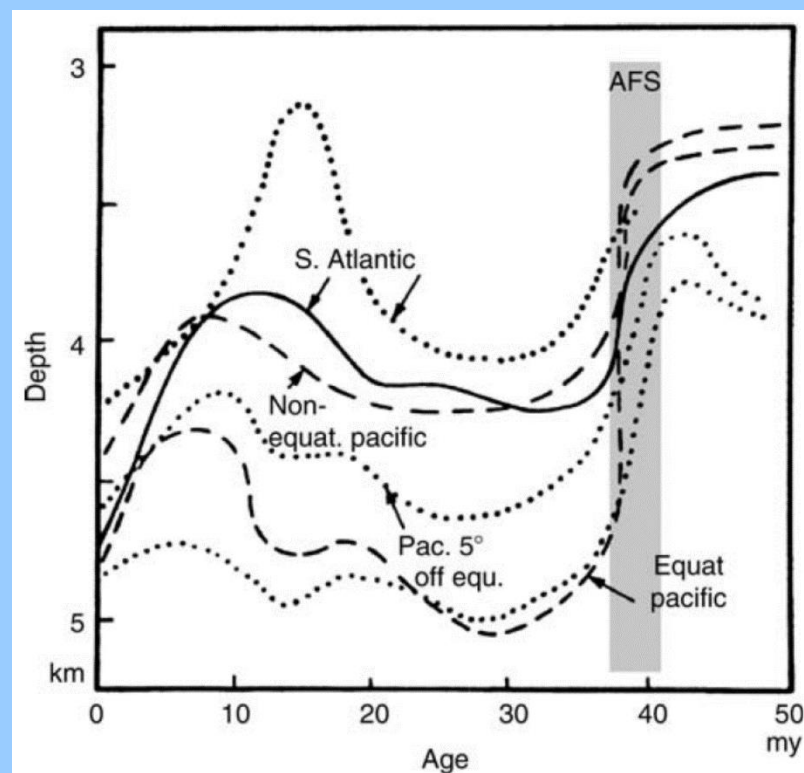
KŘEMITÉ PELAGICKÉ SEDIMENTY

- vyskytují se v hlubokých mořích pod CCD
- v polárních vodách i na šelfech

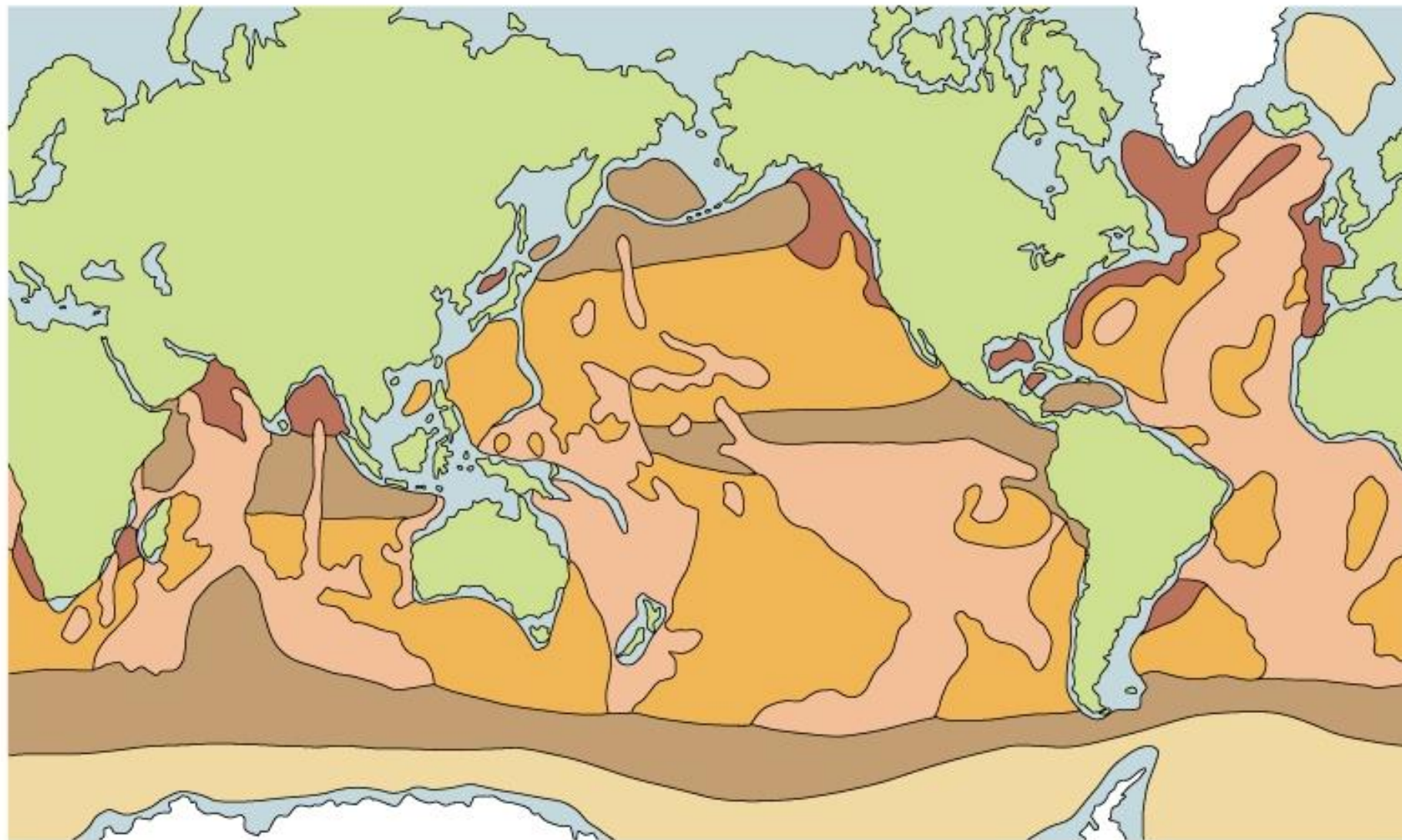
V hloubce ~6 km – opal comensation depth, silica compensation depth

DALŠÍ ULOŽENINY OCEÁNSKÉHO DNA

- **Manganové nodule** – oxidy Fe a Mn vysrážené z mořské vody a pórové vody bahna dna oceánu.
- **Hydrotermální uložení** – srážení z vody ohřáté magmatem blízko pod povrchem \Rightarrow metalické sulfidy



Rozšíření jednotlivých typů mořských sedimentů



Calcareous ooze

Pelagic clay

Glacial-marine sediments

Siliceous ooze

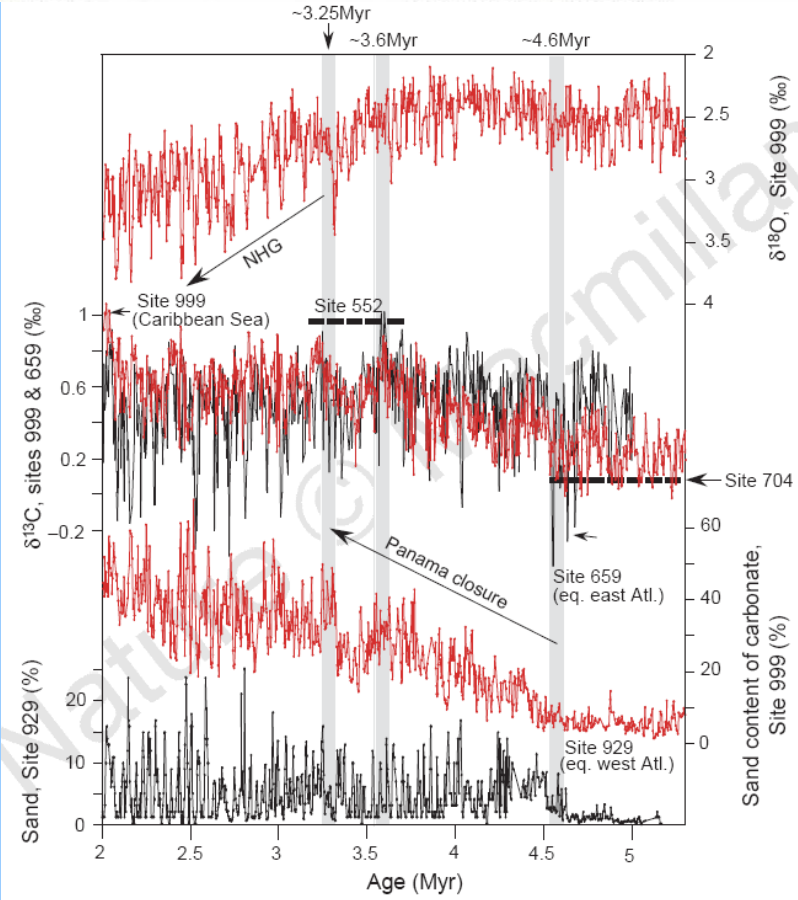
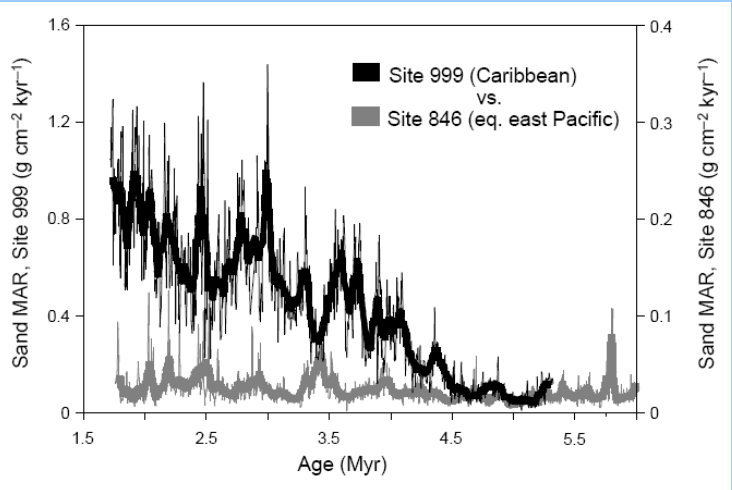
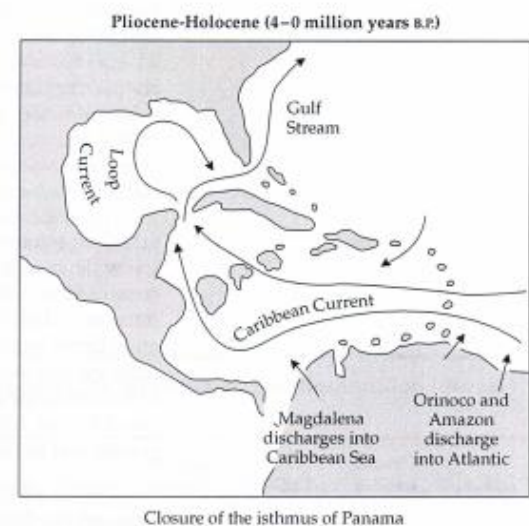
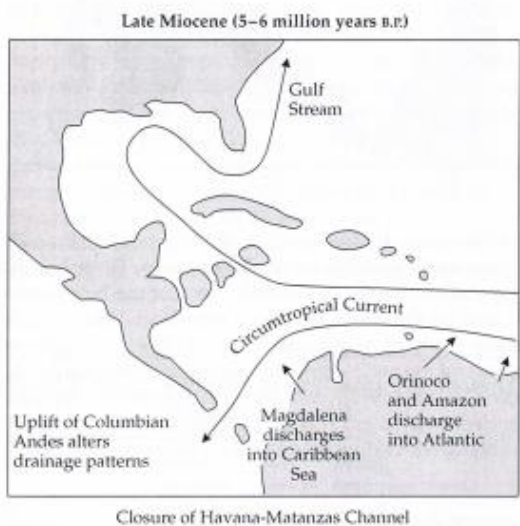
Terrigenous sediment

Continental-margin sediments

Paleogeografické změny

Vznik Panamské šije

(postupné uzavírání mořského spojení mezi tropickým Atlantikem a Pacifikem mezi 13 a 2,5 Ma) mělo za následek zastavení tropického přetoku teplých oceánských vod z Pacifiku do Atlantiku, tvorbu severoatlantských hlubinných vod a zesílení termohalinní cirkulace s nárůstem výparu a srážek v severoatlantském sektoru a následnou intenzifikaci zalednění severní polokoule od konce pliocénu.



Kvartérní paleoklimatologie na základě mořských sedimentů

Existuje množství vhodných proxy-dat

Stabilní izotopy – $\delta^{18}\text{O}$ z CaCO_3 foraminifer

$\delta^{18}\text{O}$ závisí na teplotě a salinitě okolní vody, dále na srážkách a množství vody vázané v ledovcích.

V oblastech s vyšší teplotou a výparem (tropy, subtropy) je povrchová mořská voda izotopicky těžší, ve vysokých zeměpisných šířkách (nižší teplota, vyšší srážky) je izotopicky lehčí.

Díky tomu můžeme $\delta^{18}\text{O}$ přepočítat na paleoteploty:

$$T = 16,5 - 4,3 * (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) + 0,14 * (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)^2$$

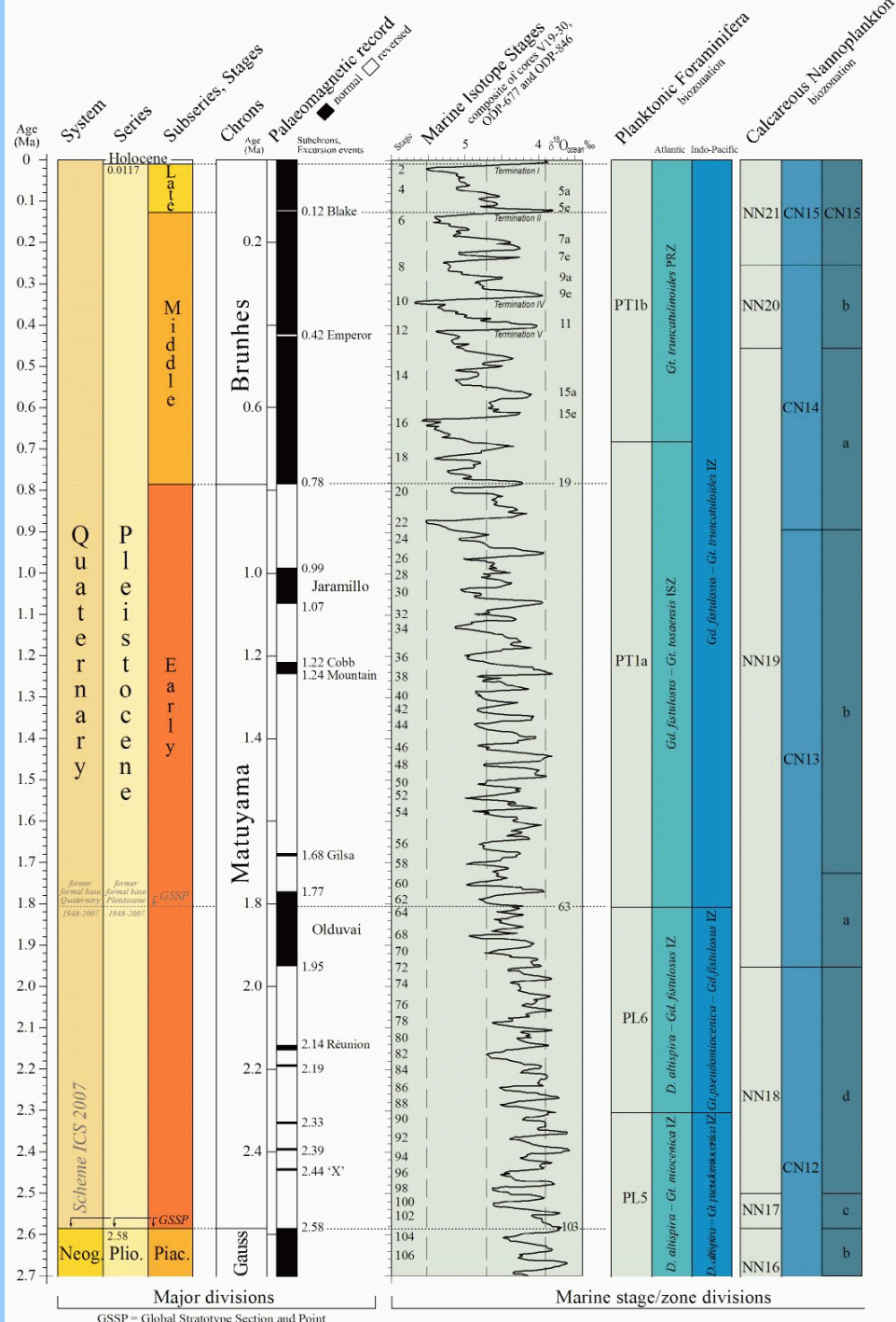
$$T = 16,9 - 4,2 * (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) + 0,13 * (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)^2$$

$$T = 16,9 - 4,2 * (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)$$

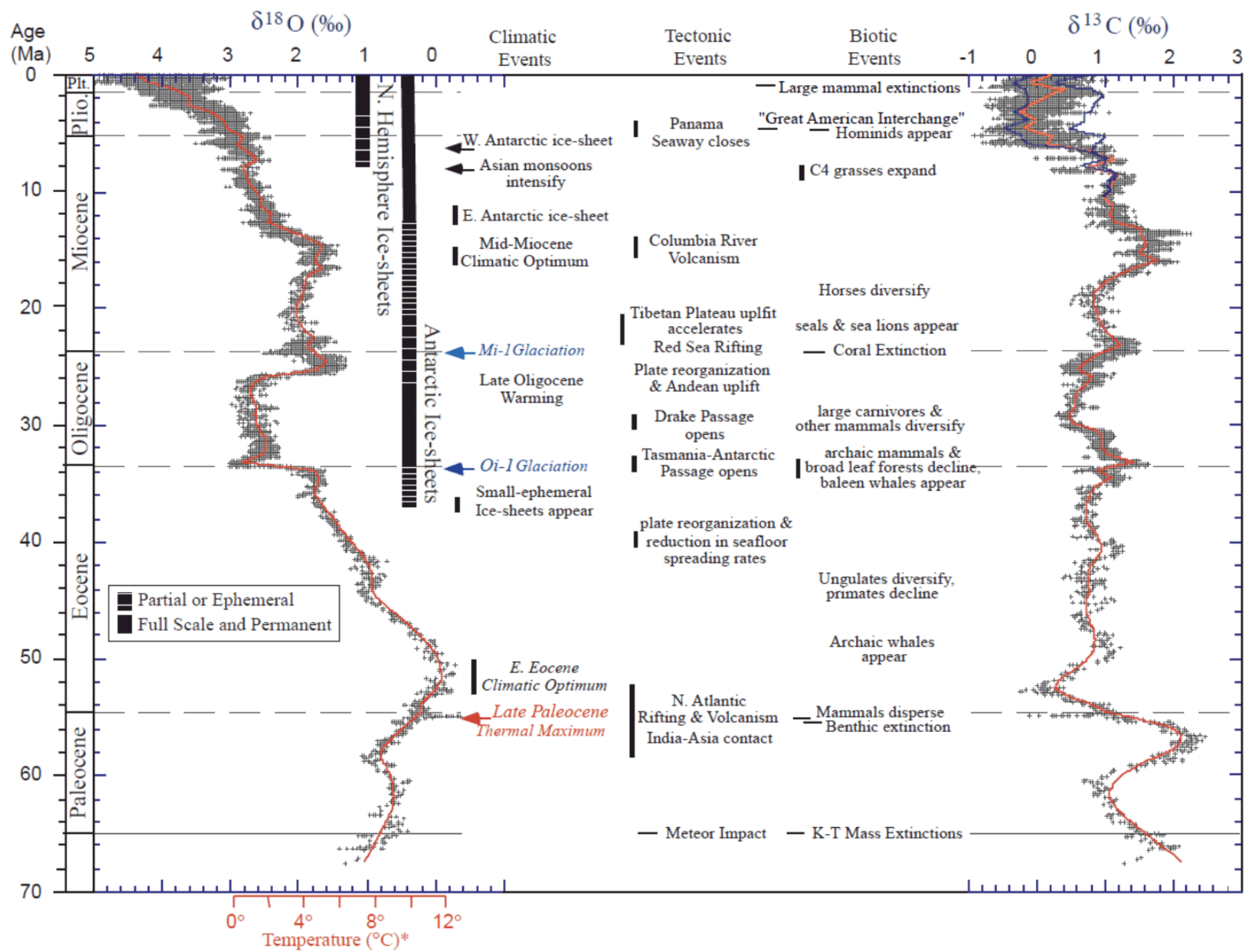
$$T = 16,9 - 4,0 * (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w)$$

Voda v ledovcích je izotopicky lehčí a její vyvázání způsobuje ztěžnutí mořské vody.

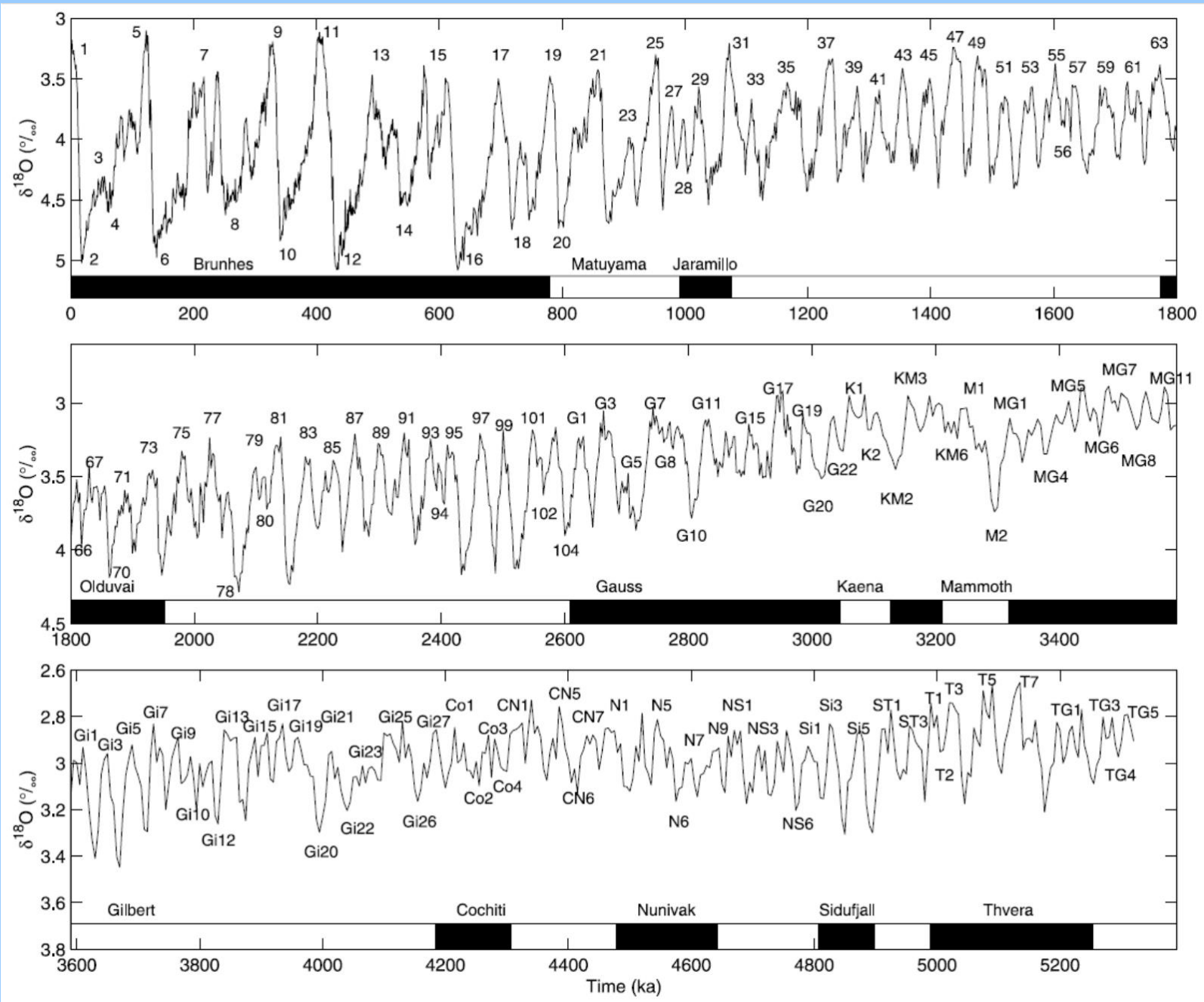
Proto $\delta^{18}\text{O}$ v mořských sedimentech nepřímo ukazuje na objem ledu v daném časovém období na Zemi.



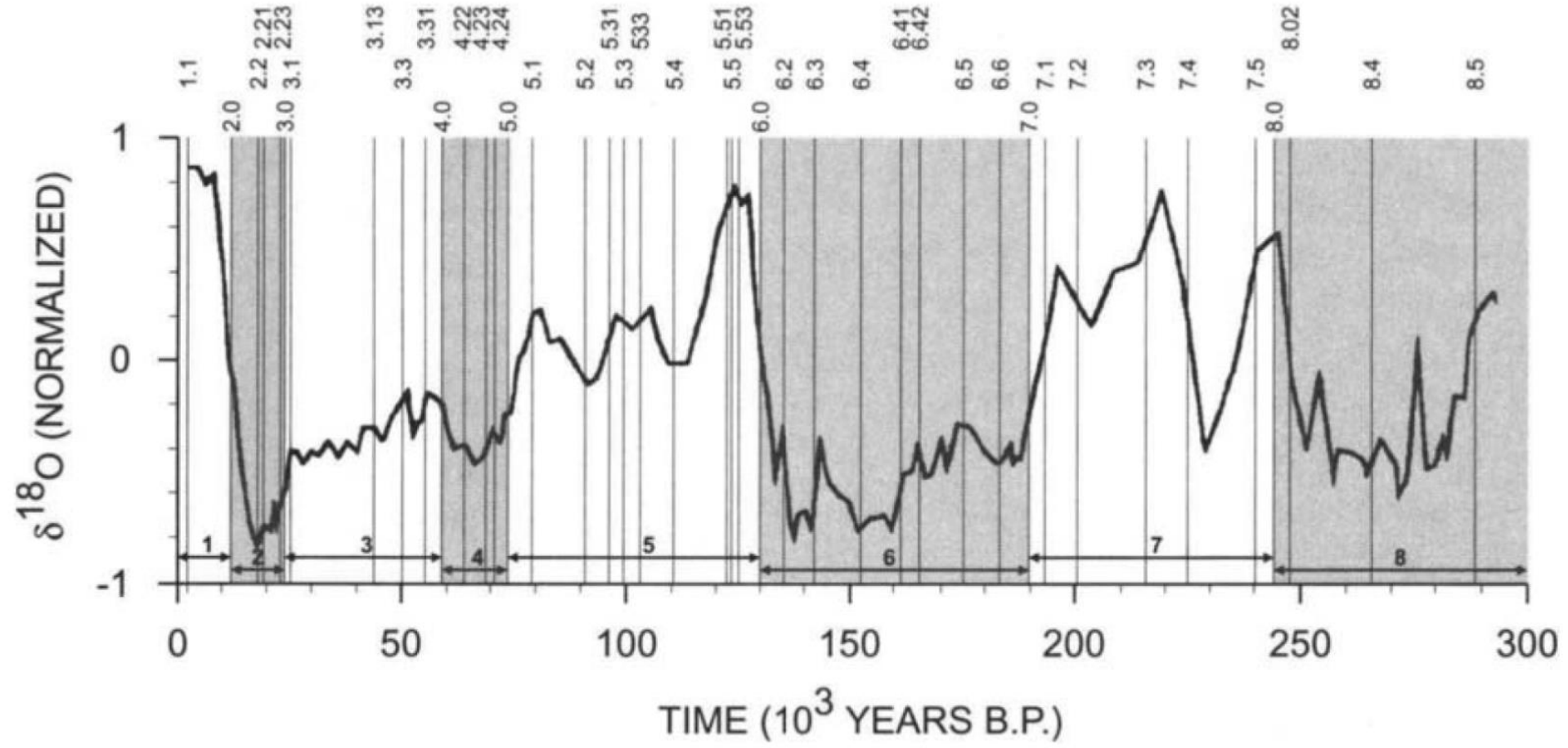
Změny $\delta^{18}\text{O}$ během kenozoika (posledních 65 Ma)



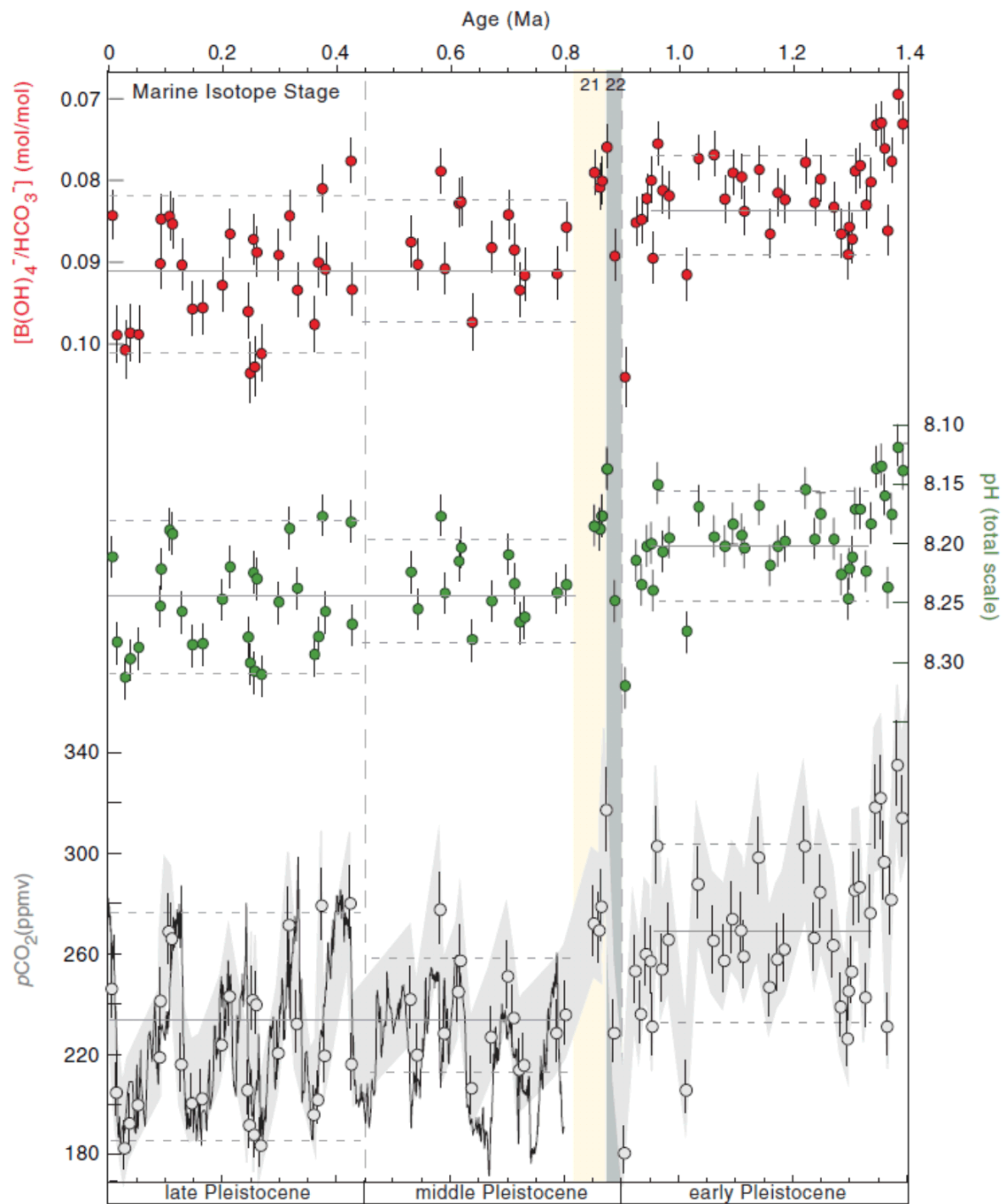
LR04 stack $\delta^{18}\text{O}$ (pliocén-pleistocén; posledních 5,3 Ma)



SPECMAP $\delta^{18}\text{O}$ (300 ka), definice MIS (poslední klimatický cyklus – detail)



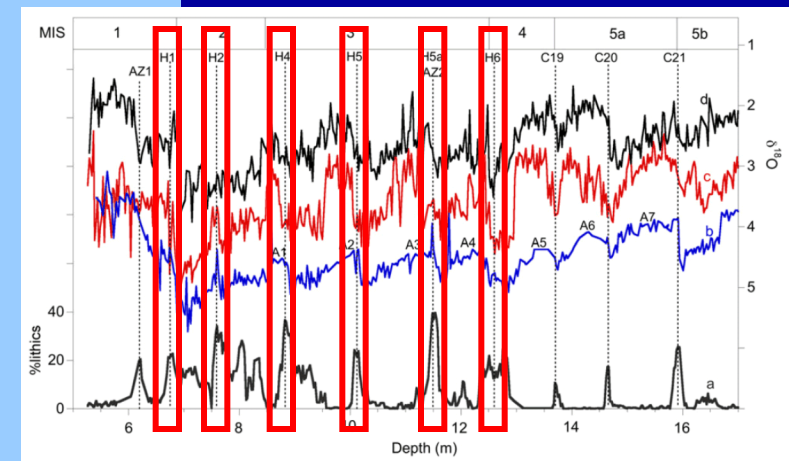
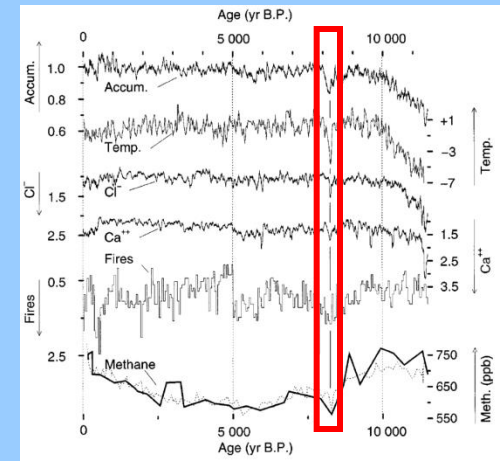
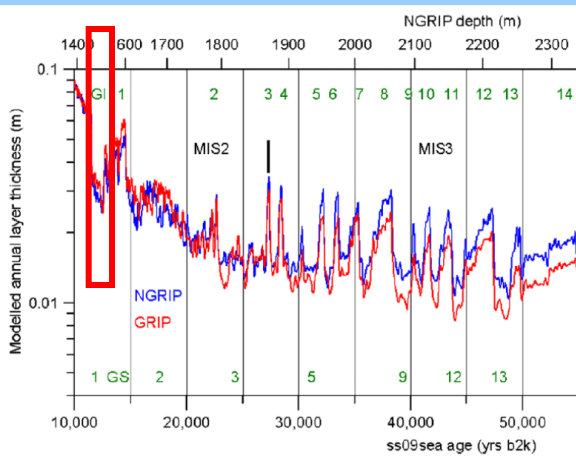
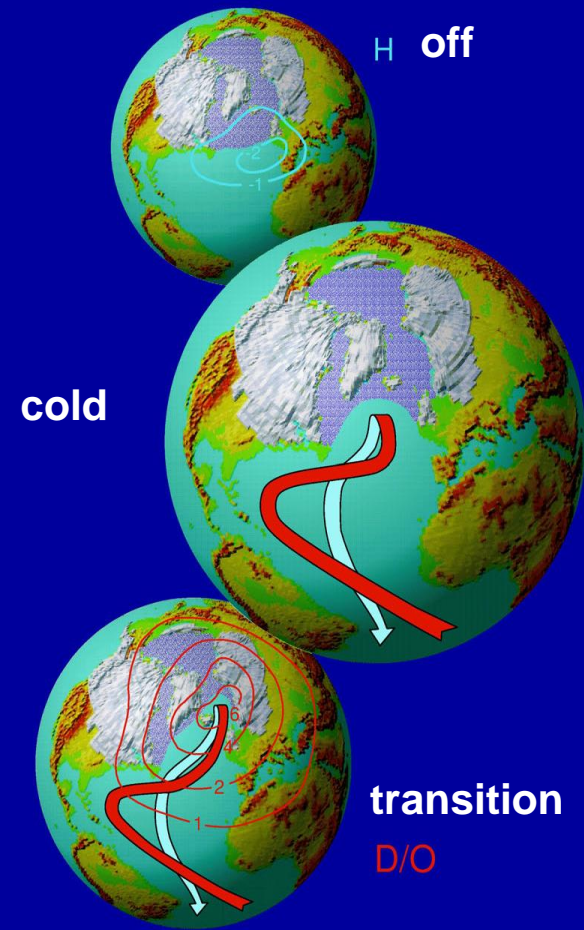
Stanovení CO_2 v dřívější atmosféře na základě mořských sedimentů



THC v pleistocénu

Výkon termohalinního výměníku se měnil během glaciálně-interglaciálního cyklu, což jasně dokládají hlubokomořské vrty ze severního Atlantiku. Existují 3 základní módy THC: **teplý** (obdobný současnosti), **chladný** (NADW vznikají v Irmingerově moři j. od Islandu) a tzv. **vypnutý mód** (NADW se netvoří).

K **vypnutí THC** dochází v důsledku uvolnění obrovského množství lehké (sladké a chladné) vody při tání kontinentálních ledovců a při rychlých odvodňováních rozsáhlých pleistocénních jezer (Agassiz, Ojibway, apod.). To vše vedlo ke zpomalení/zastavení termohalinního výměníku, které mělo za příčinu ochlazení během **mladého dryasu**, **8.2 ka event**u nebo během **Heinrichových událostí** posledního glaciálu.



THC v pleistocénu

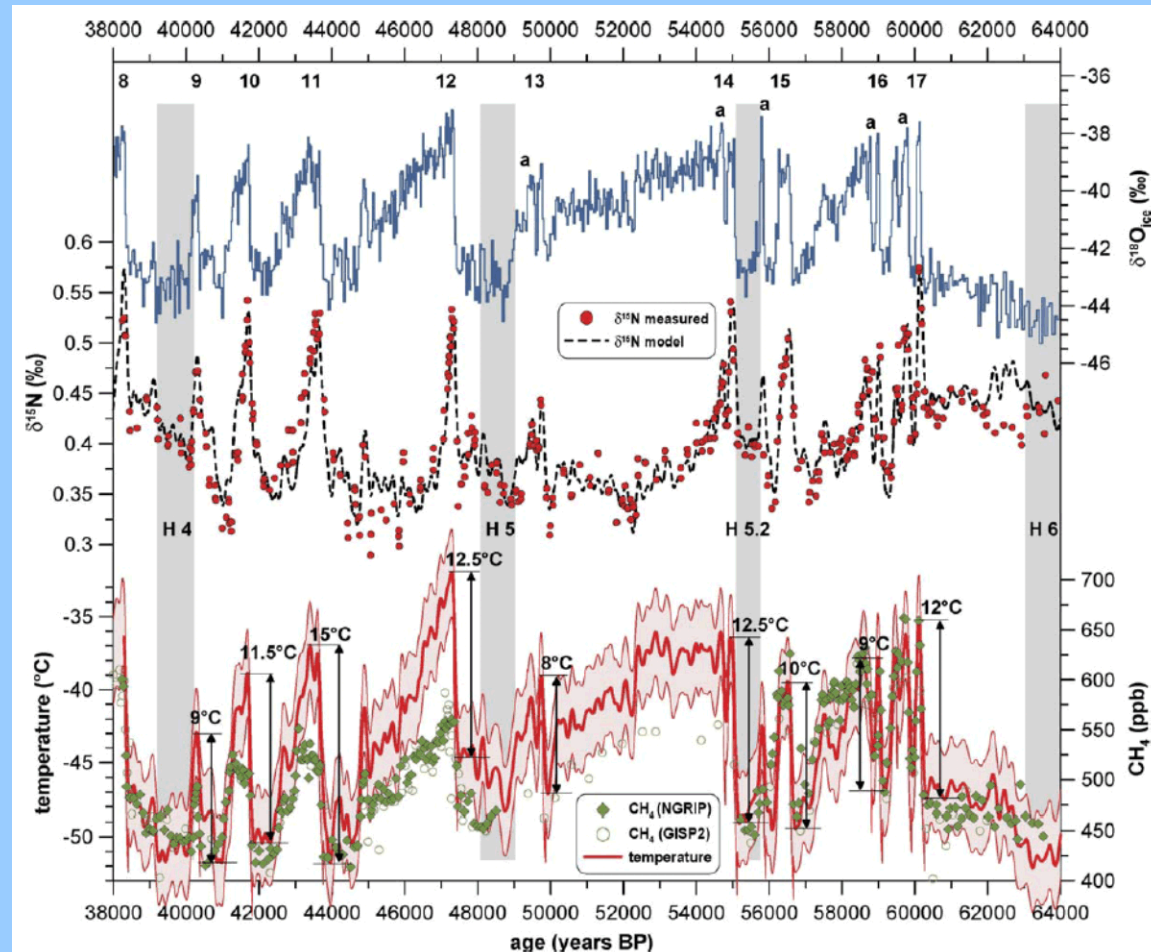
Klimaticky nejvýznamnější rychlé glaciální události (**grónské stadiály a interstadiály** – dříve **Dansgaard-Oeschgerovy cykly**; změny teplot o **8–15°C za 50–200 let!!!**) vznikaly díky S–J změně pozice konvekce - jsou **přechodem mezi teplým a chladným módem**.

Mnoho dokladů dnes ukazuje na to, že rychlé klimatické změny v minulosti jsou velmi pravděpodobně spojeny se změnou v **THC**.

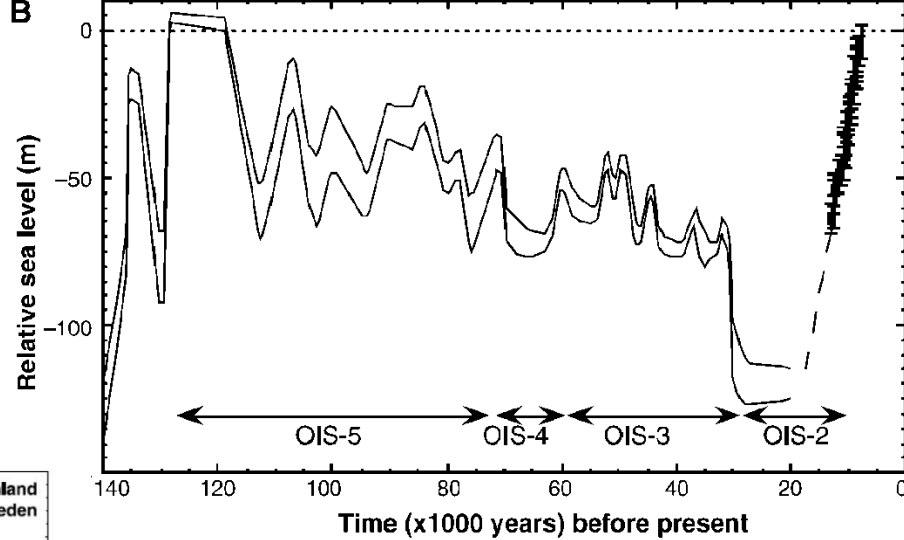
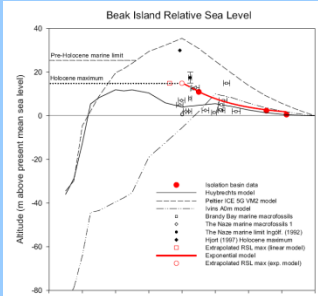
THC a současné klimatické změny

Někteří oceánologové uvažují o obdobném **zastavení nebo změně stavu THC** díky současnému oteplování a **přísunu sladké vody v Arktidě** z tajícího grónského ledovcového štítu a řekami z tajícího ruského a kanadského permafrostu.

Přímá souvislost je známá, protože **Severoatlantský proud** byl historicky **nejsilnější** během středověkého klimatického optima a **naopak nejslabší** (až o ~10 %) během Malé doby ledové.

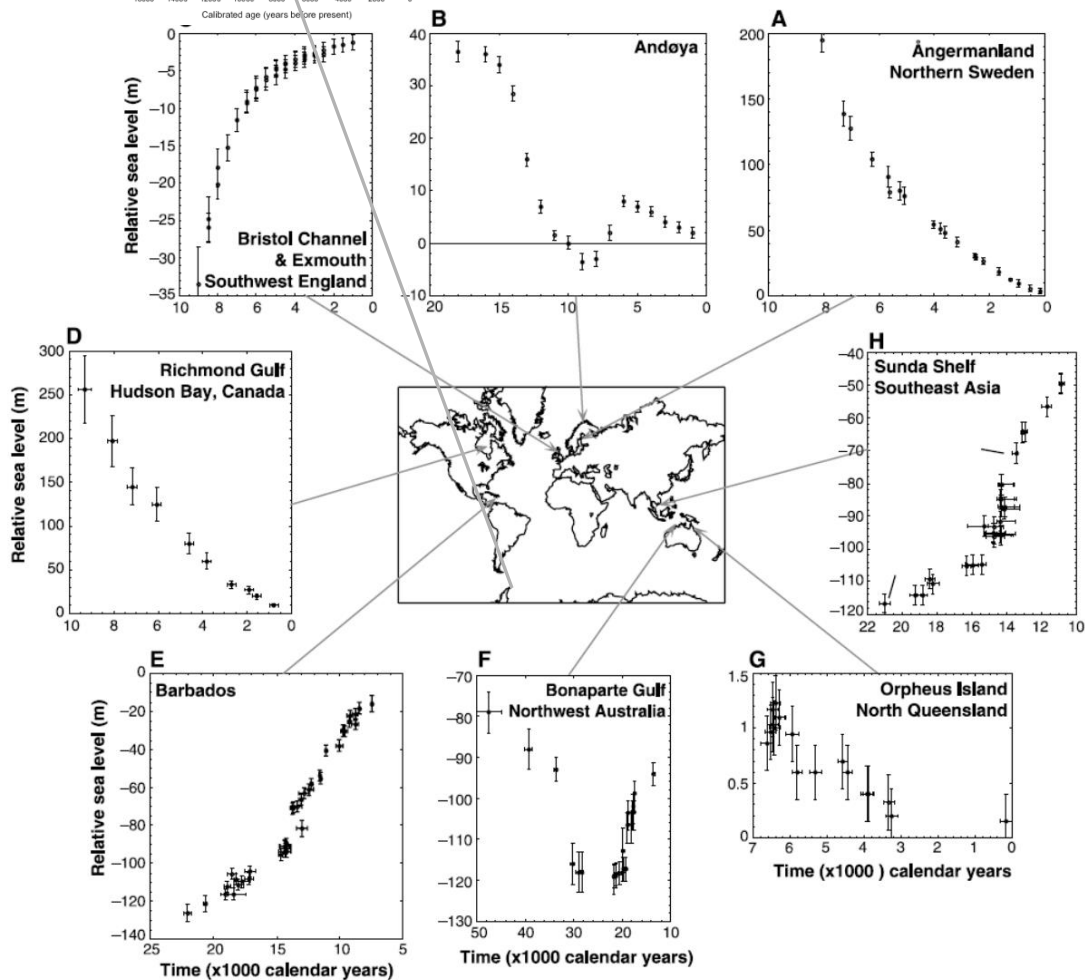


Glacieustatické a glaciostatické změny mořské hladiny a pevnin



Ve **vrcholných glaciálech** (např. MIS 2) globální **hladina oceánu** ležela **o 120–160 m níže než dnes** v důsledku vyvázání vody, doklady z ponořených mořských teras tropické oblasti (Barbados, Sundský šelf, SZ Austrálie).

Jádra zaledněných oblastí severní polokoule byla **po odlehčení vyzdvižena do výšek 250–300 m** (Hudsonův záliv, severní Skandinávie), vyzdvih stále pokračuje rychlostmi 5–40 mm.rok⁻¹.



K dalšímu čtení:

- Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L., McManus, J., Andrews, J., Huon, S., Jantschik, R., Clasen, S., Simet, C., Tedesco, K., Klas, M., Bonani, G., Ivy, S. (1992): Evidence for Massive Discharges of Icebergs into the North-Atlantic Ocean during the Last Glacial Period. *Nature*, 360, 245–249.
- Bradley, R.S. (1999): *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary. Second Edition. International Geophysics Series, 64*, Academic Press.
- Broecker, W., Bond, G., Klas, M., Clark, E., McManus, J. (1992): Origin of the northern Atlantic's Heinrich events. *Climate Dynamics*, 6, 265–273.
- Elias, S. A. (2007): *Encyclopedia of Quaternary Science. 4 volume set*. Elsevier.
- Gornitz, V., Ed. (2009): *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer.
- Haug, G.H., Tiedemann, R. (1998): Effect of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation. *Nature*, 393, 673–676.
- Hodell, D. A., Evans, H. F., Channell, J. E. T., Curtis, J. H. (2010): Phase relationships of North Atlantic ice-rafted debris and surface-deep climate proxies during the last glacial period. *Quaternary Science Reviews*, 29, 3875–3886.
- Lambeck, K., Chappell, J. (2001): Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science*, 292, 679–686.
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E. (2005): A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20, PA1003.
- Lunt, D.J., Valdes, P.J., Haywood, A., Rutt, I.C. (2008): Closure of the Panama Seaway during the Pliocene: implications for climate and Northern Hemisphere glaciation. *Climate Dynamics*, 30, 1–18.
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., Imbrie, J., Moore, Jr. T. C., Shackleton, N. J. (1987): Age Dating and the Orbital Theory of the Ice Ages: Development of a High-Resolution 0 to 300,000-Year Chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27, 1–29.
- Tripathi, A. K., Roberts, C. D., Eagle, R. A. (2009): Coupling of CO_2 and Ice Sheet Stability Over Major Climate Transitions of the Last 20 Million Years. *Science*, 326, 1394–1397.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. (2001): Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292, 686–693.