

**Krajina v kvartéru (podzimní semestr 2016)**

# **Moře a mořské sedimenty**



***Daniel Nývlt (daniel.nyvlt@seznam.cz)***

# MOŘSKÁ PROSTŘEDÍ – moře zaujmají 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

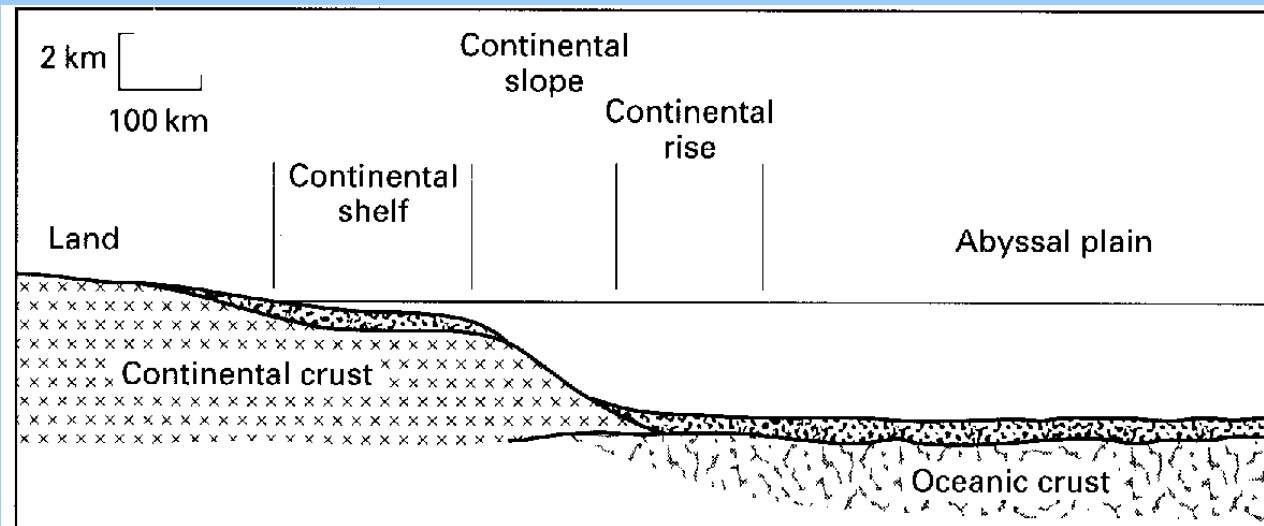
- sklon 2–7°

## Hluboká moře

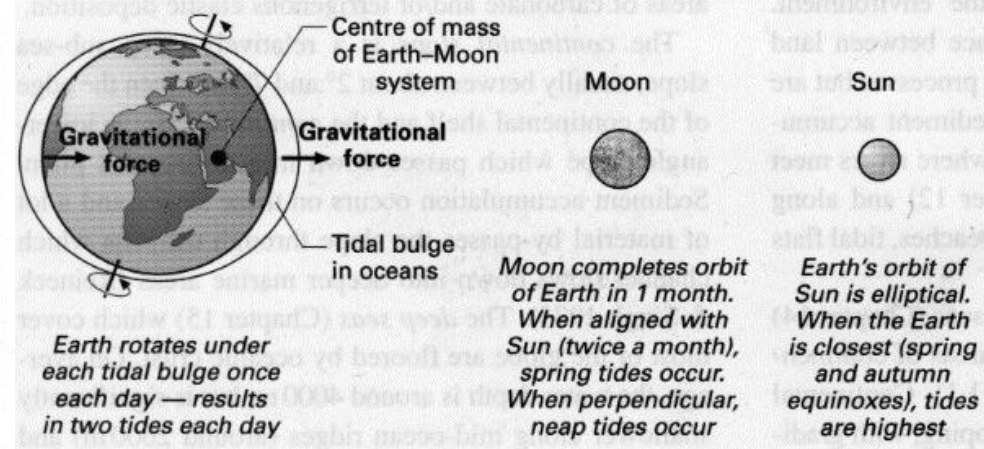
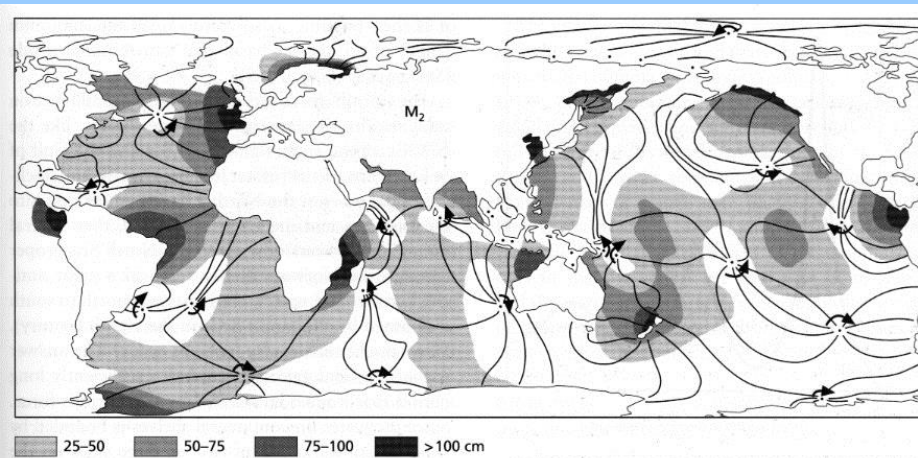
- nad oceánskou kůrou
- průměrná hloubka ~4 km, hřbety ~ 2 km, příkopy >8 km

## 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



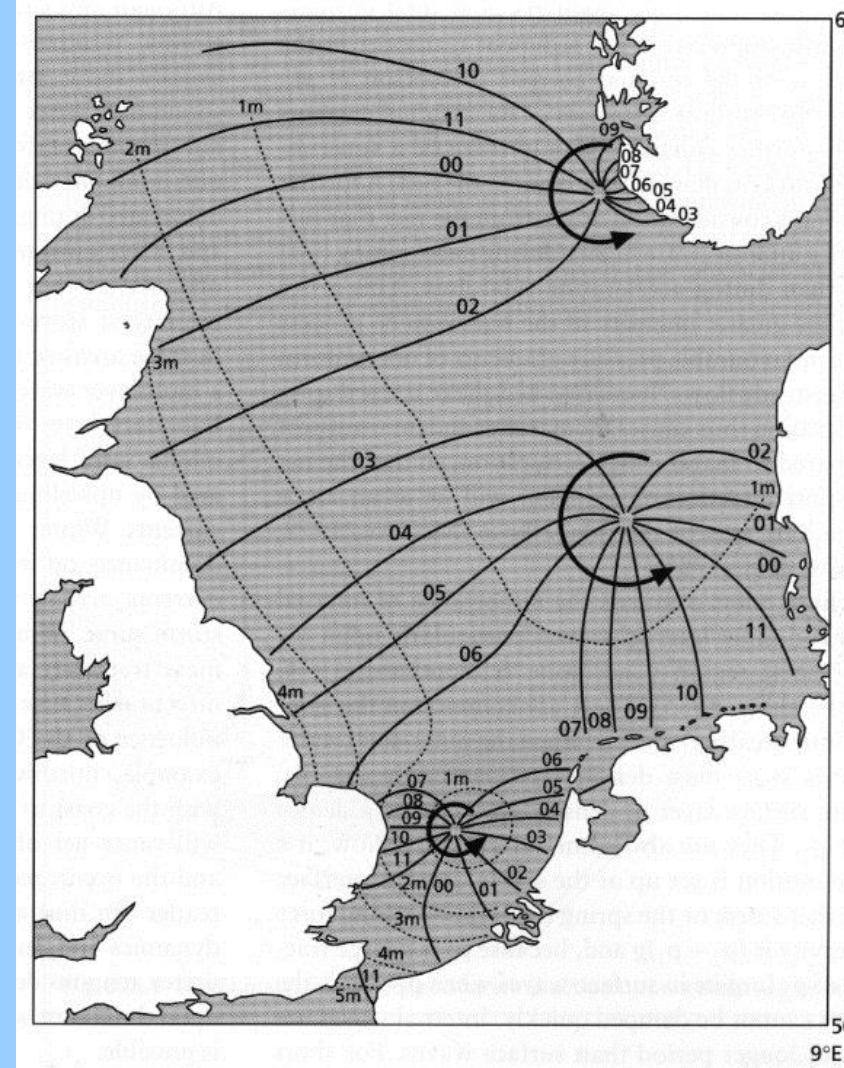
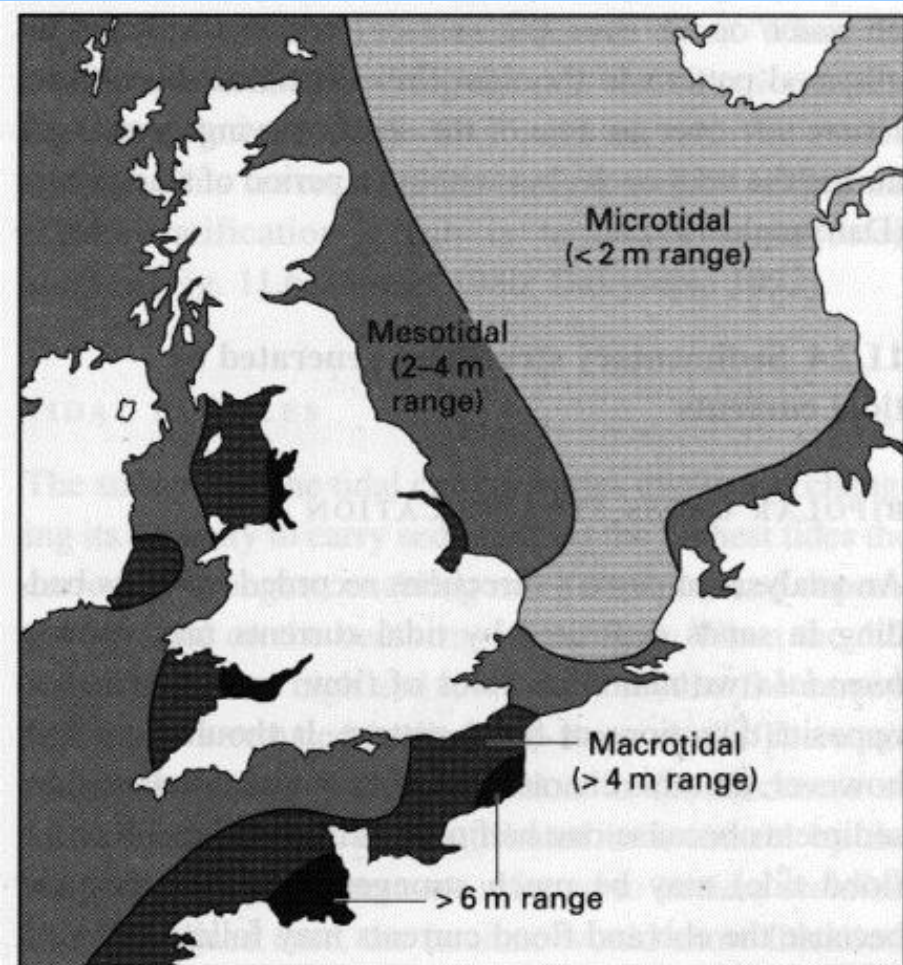
## Tidální cyklus

- **Diurnální cyklus** – příliv a odliv je dvakrát za den ( $12 \frac{1}{2}$  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 dmутí

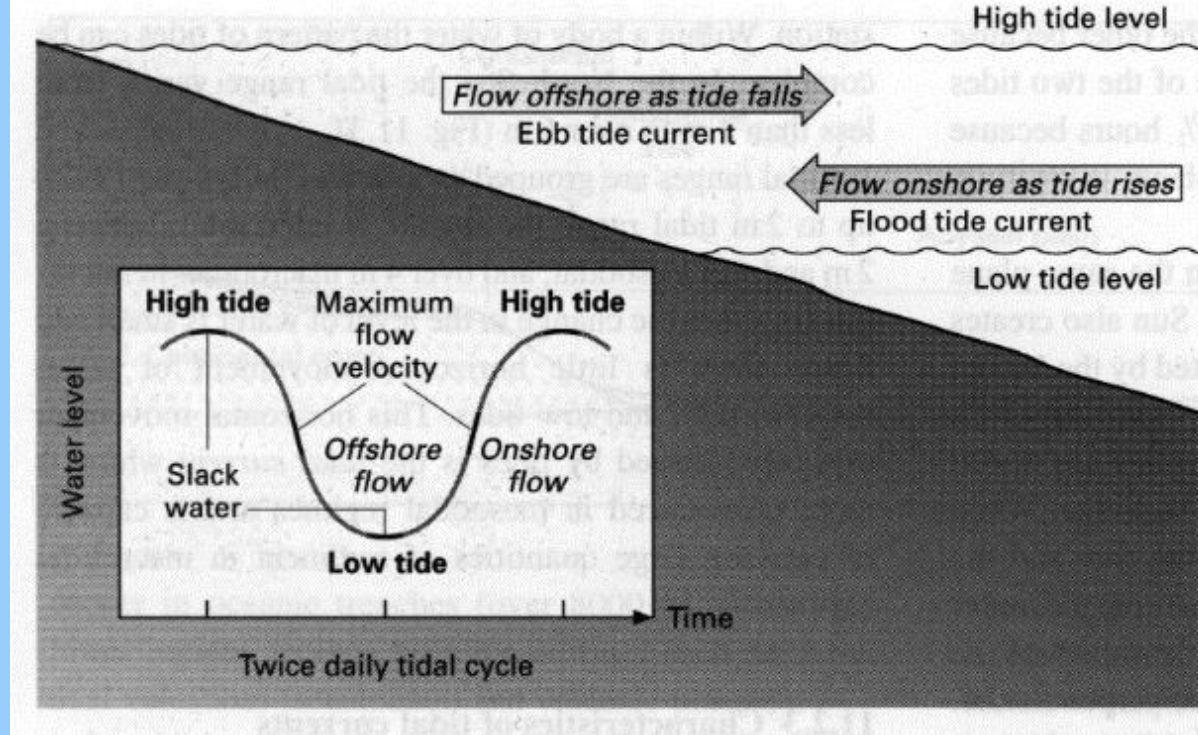
< 2 m mikrotidál

2-4 m mezotidál

> 4 m makrotidál

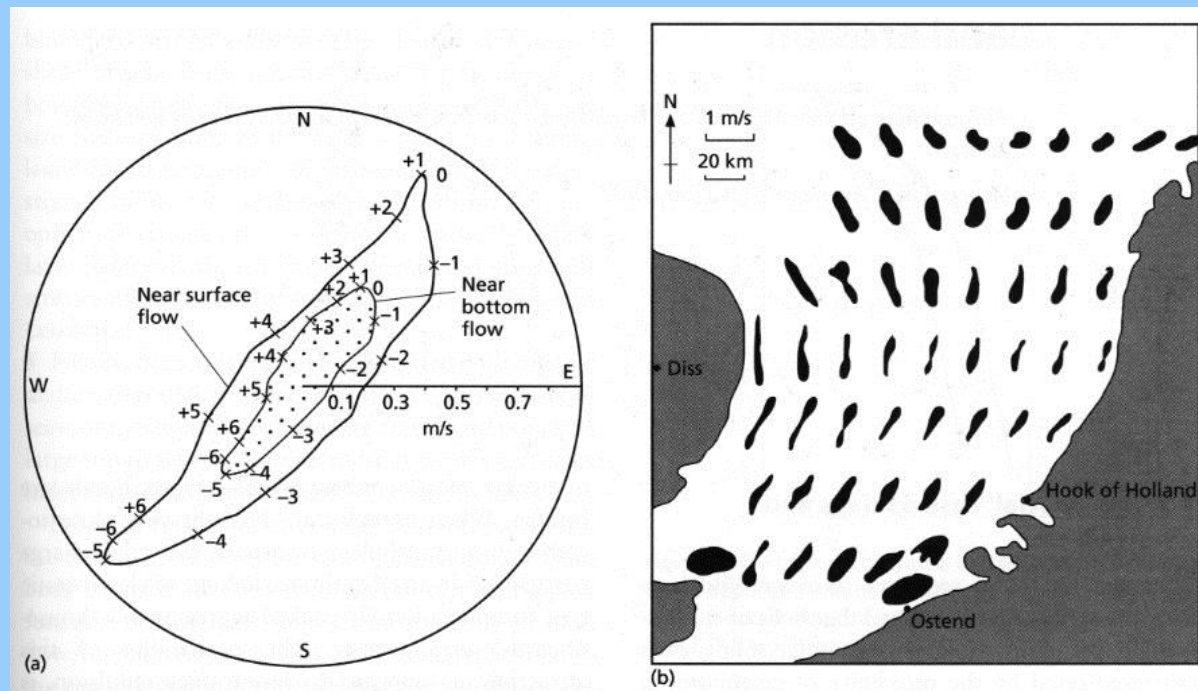


# Změny rychlosti přílivových a odlivových proudů



## Tidální elipsa

– záznam změn rychlosti a směru  
tidálních proudů v čase



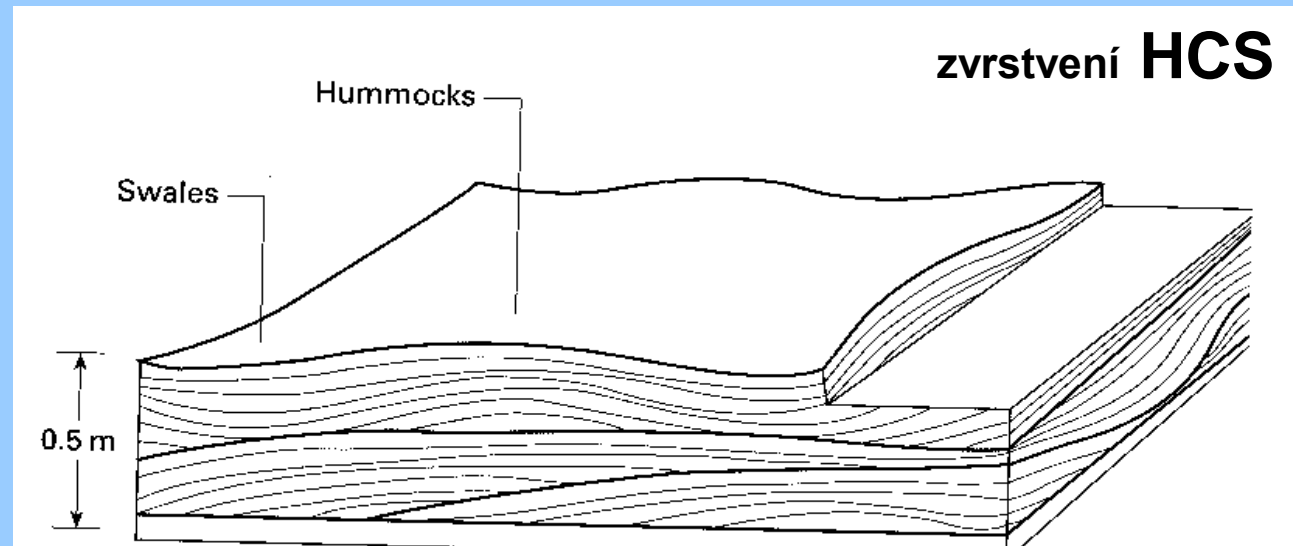
# VLNĚNÍ

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

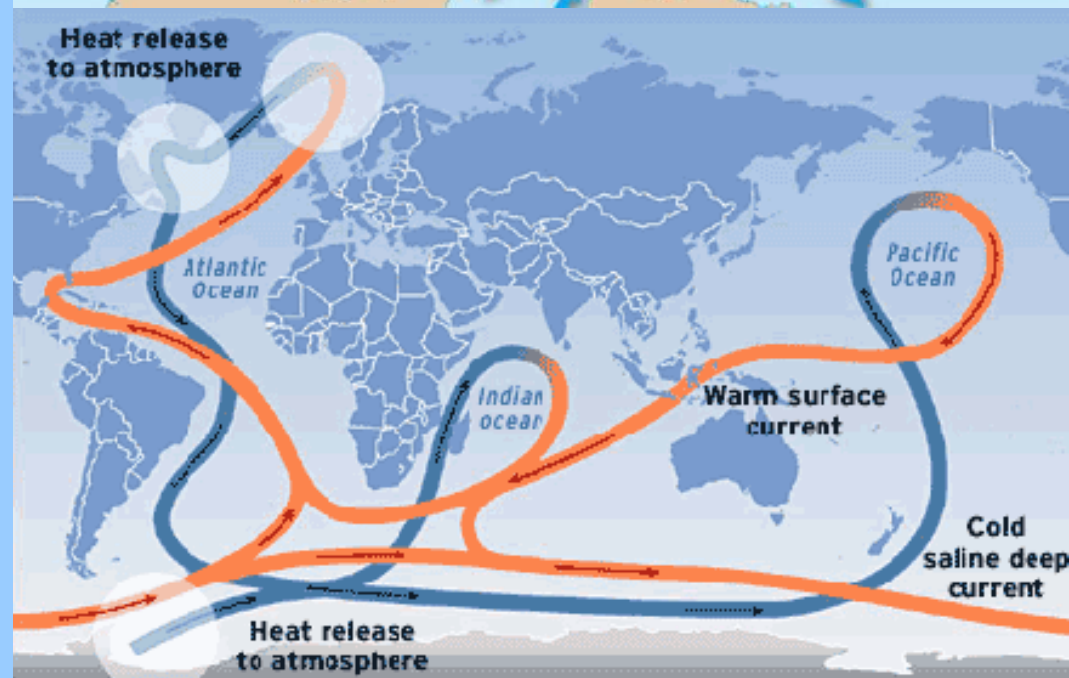
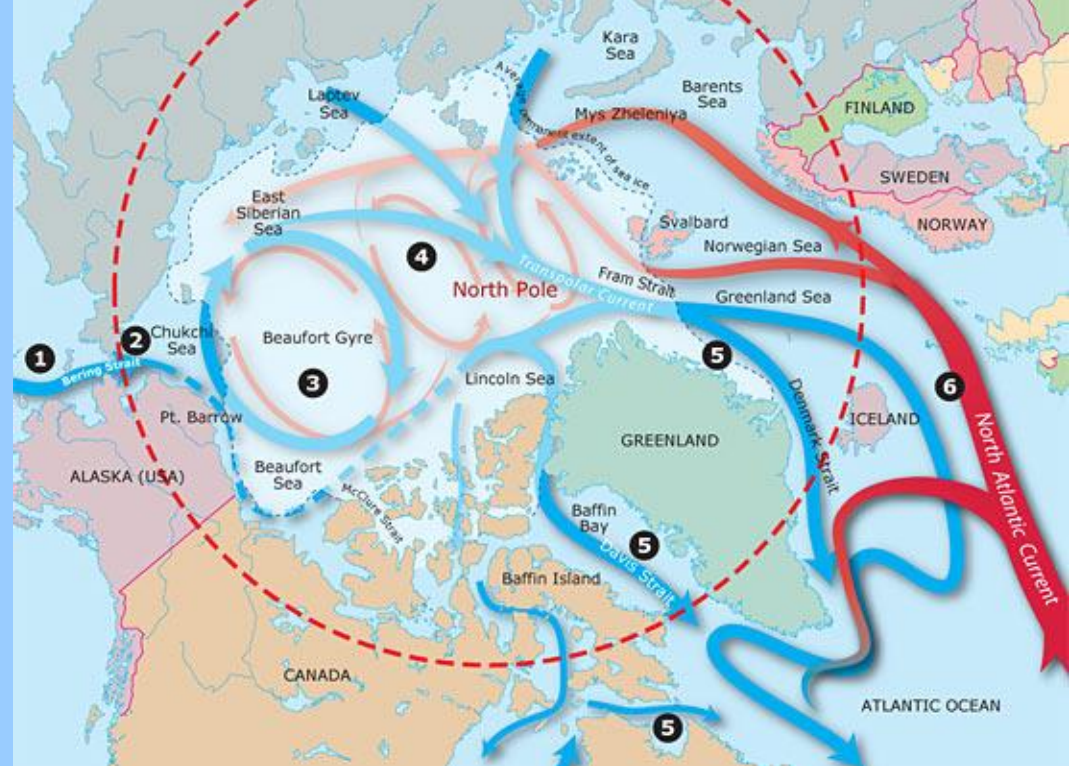
- vlny s periodou  $10^3$ – $10^4$  s
- jsou generované *zemětřesením, impaktem, vulkanickou erupcí, podmořským skluzem*
- amplituda je X0 cm a vlnová délka X00 km v hluboké vodě, po dosažení šelfu nárůst amplitudy až na ~10 m

# 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)**.

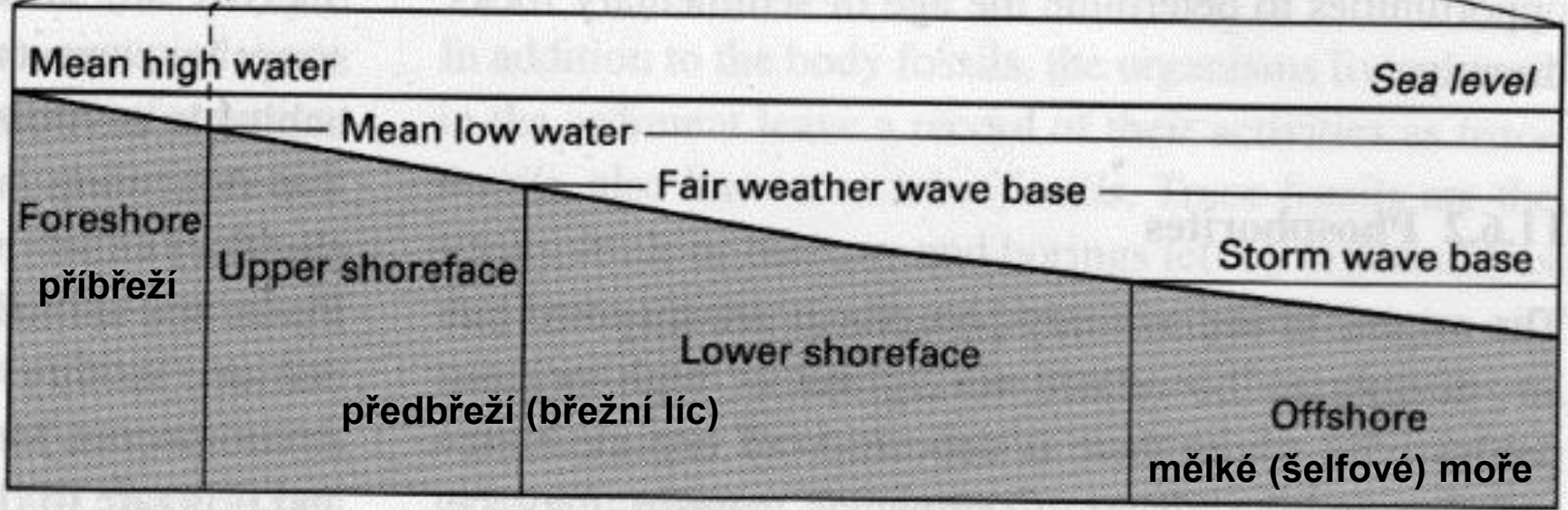
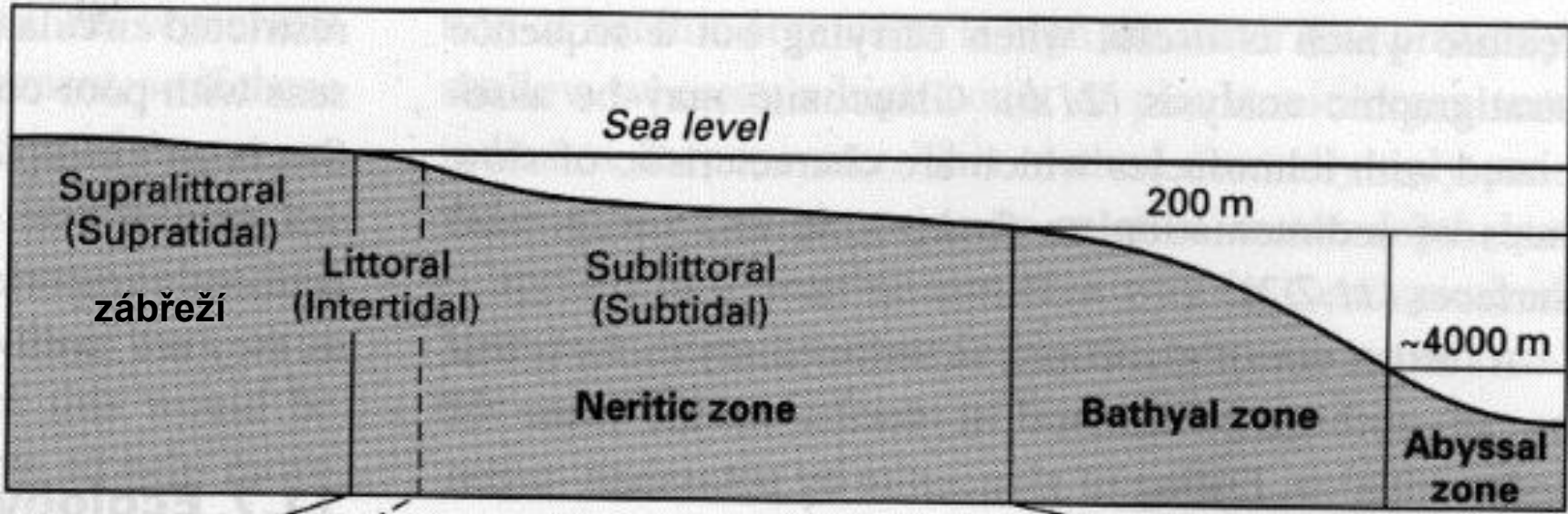
Vysoké zeměpisné šířky jsou zdrojovými oblastmi studené vody (především **ACC** a **Transpolární proud**)

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

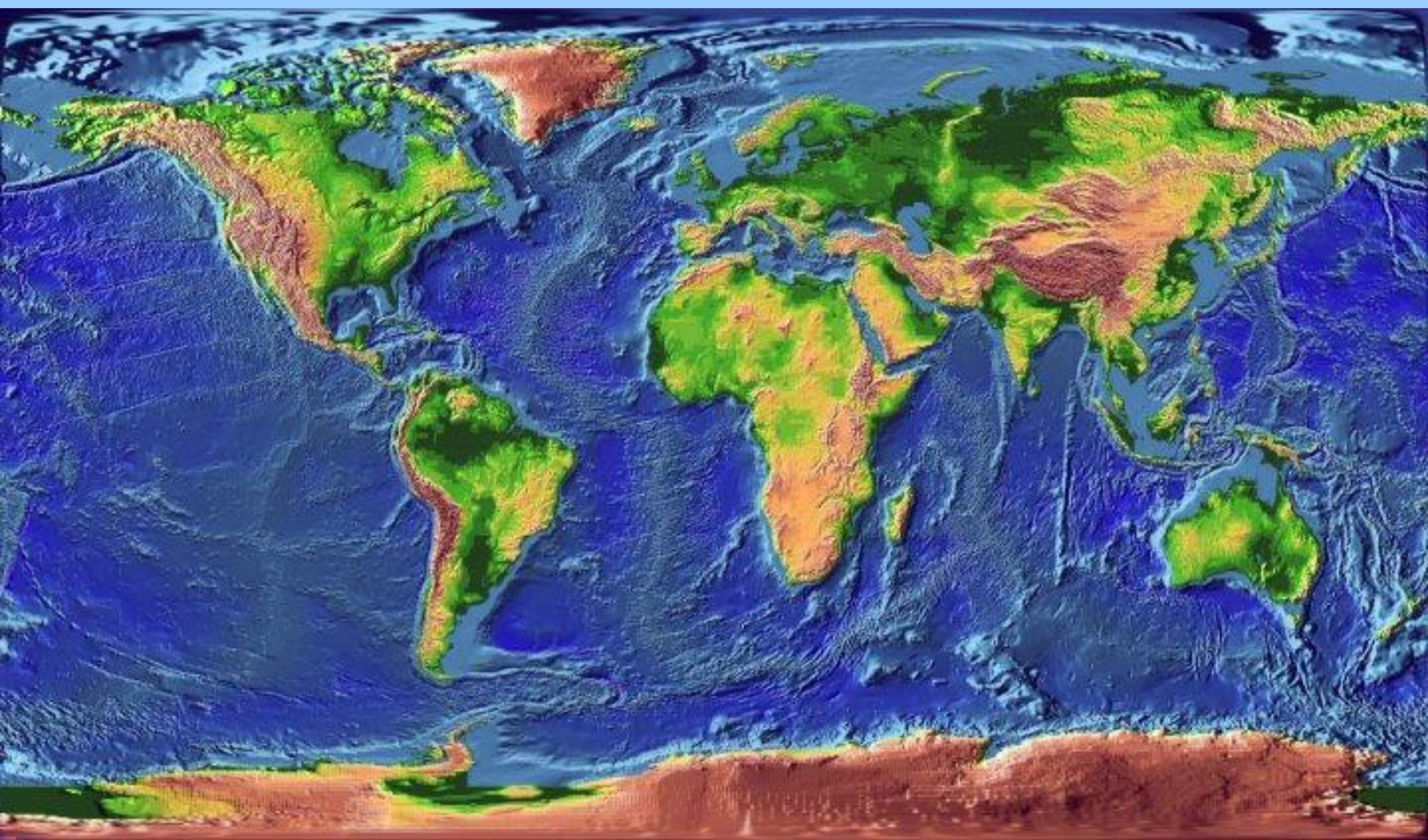
## šelfy, epikontinentální moře

### 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

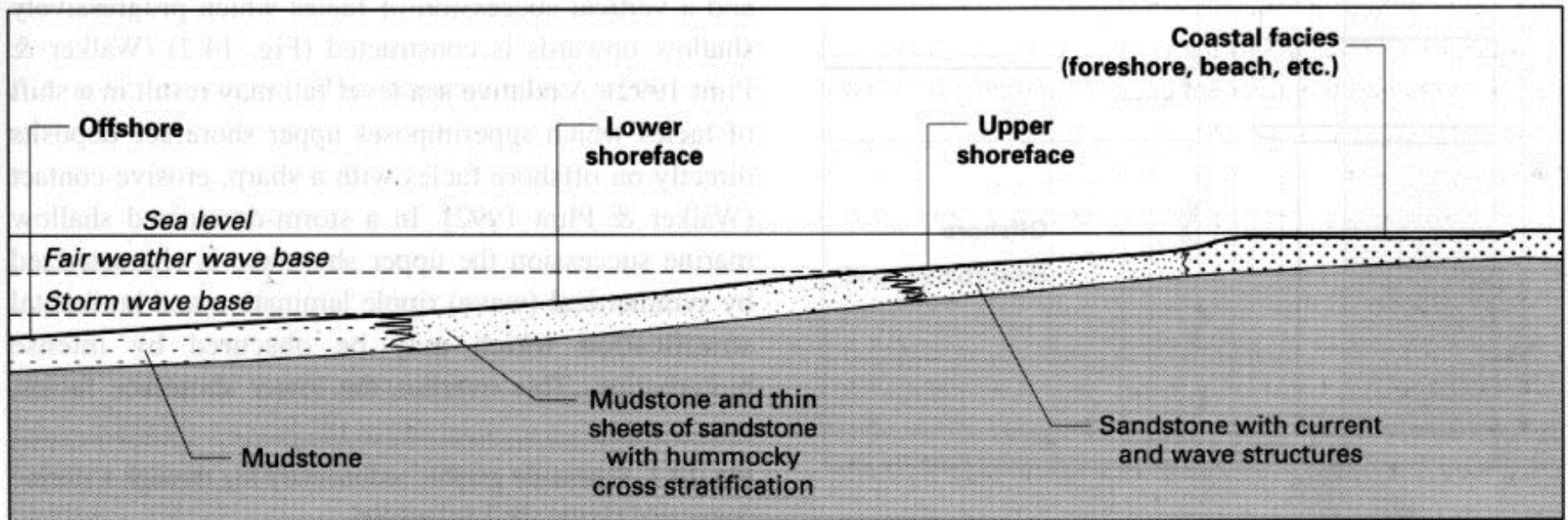
## Svrchní předbřeží (upper shoreface)

- 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)

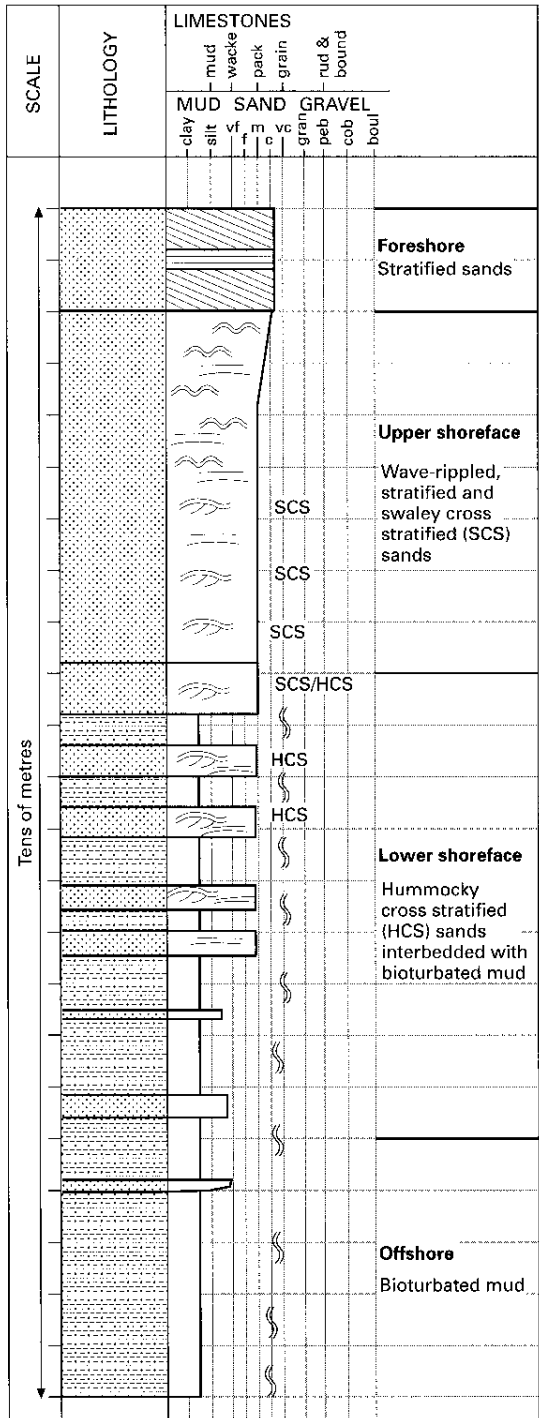
- sedimentace jemného materiálu – bahno

## Bioturbace

– bentická fauna ničí primární sedimentární struktury!!!



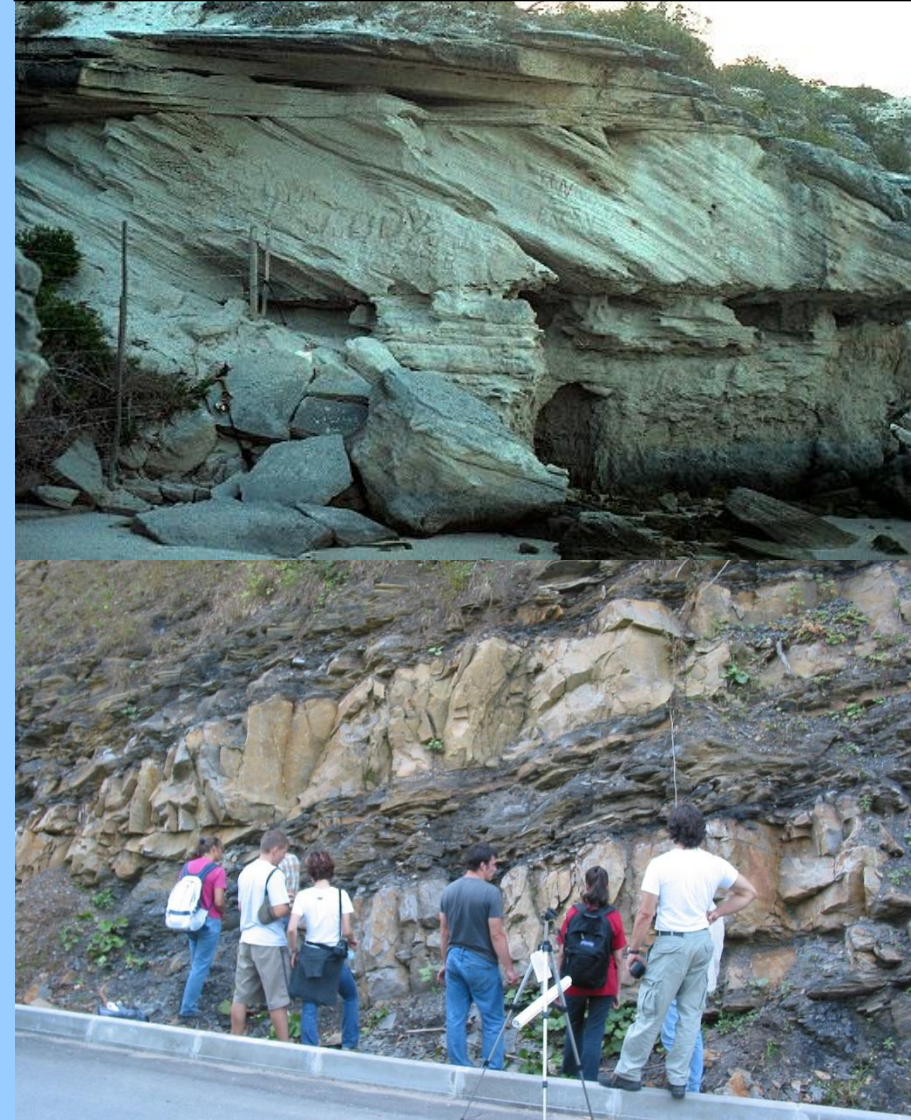
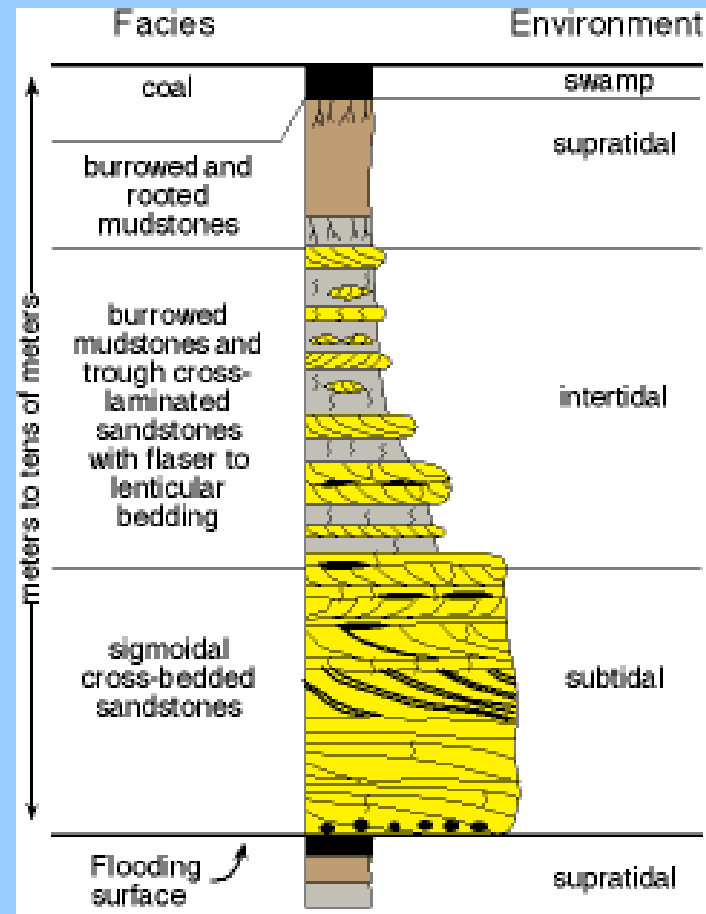
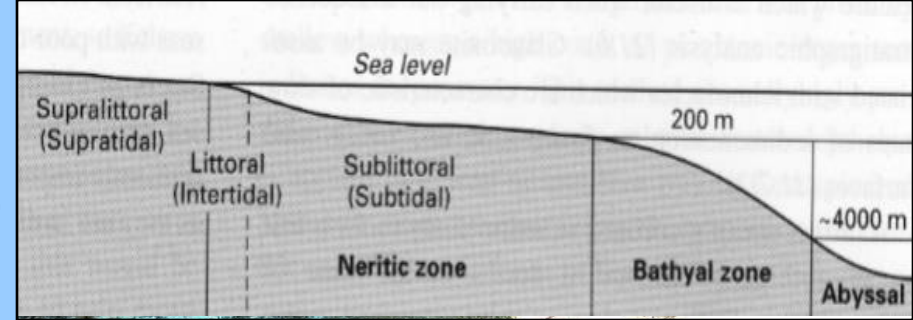
Typický profil uloženinami šelfu s dominancí bouřkového vlnění



# 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

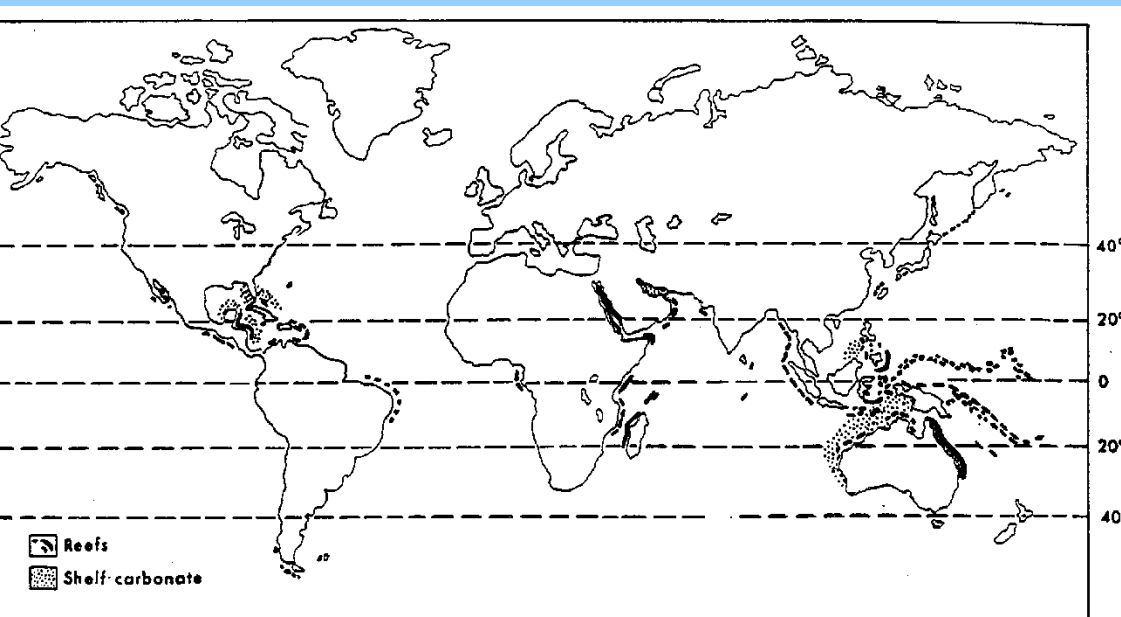
(KARBONÁTOVÉ PLATFORMY S.L.)

**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

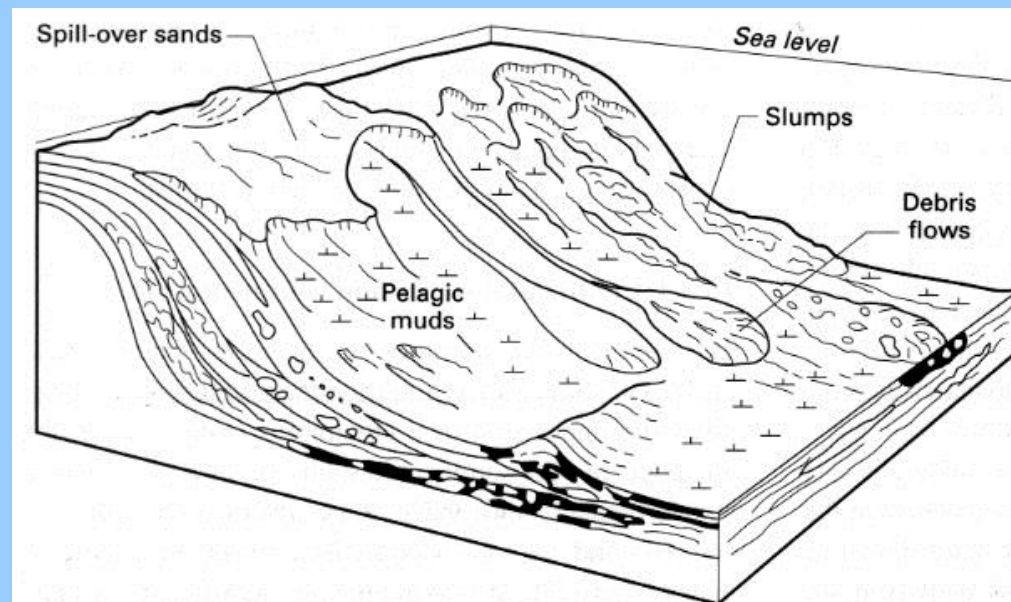
Tvorba nové oceánské kůry na středoocéánských hřbetech a současný zánik staré oceánské kůry v subdukčních zónách ⇒ nejstarší oceánské dno jurského stáří (sz. Pacifik). Záznam starých oceánů je zachován v orogenních pásech kolizních zón.

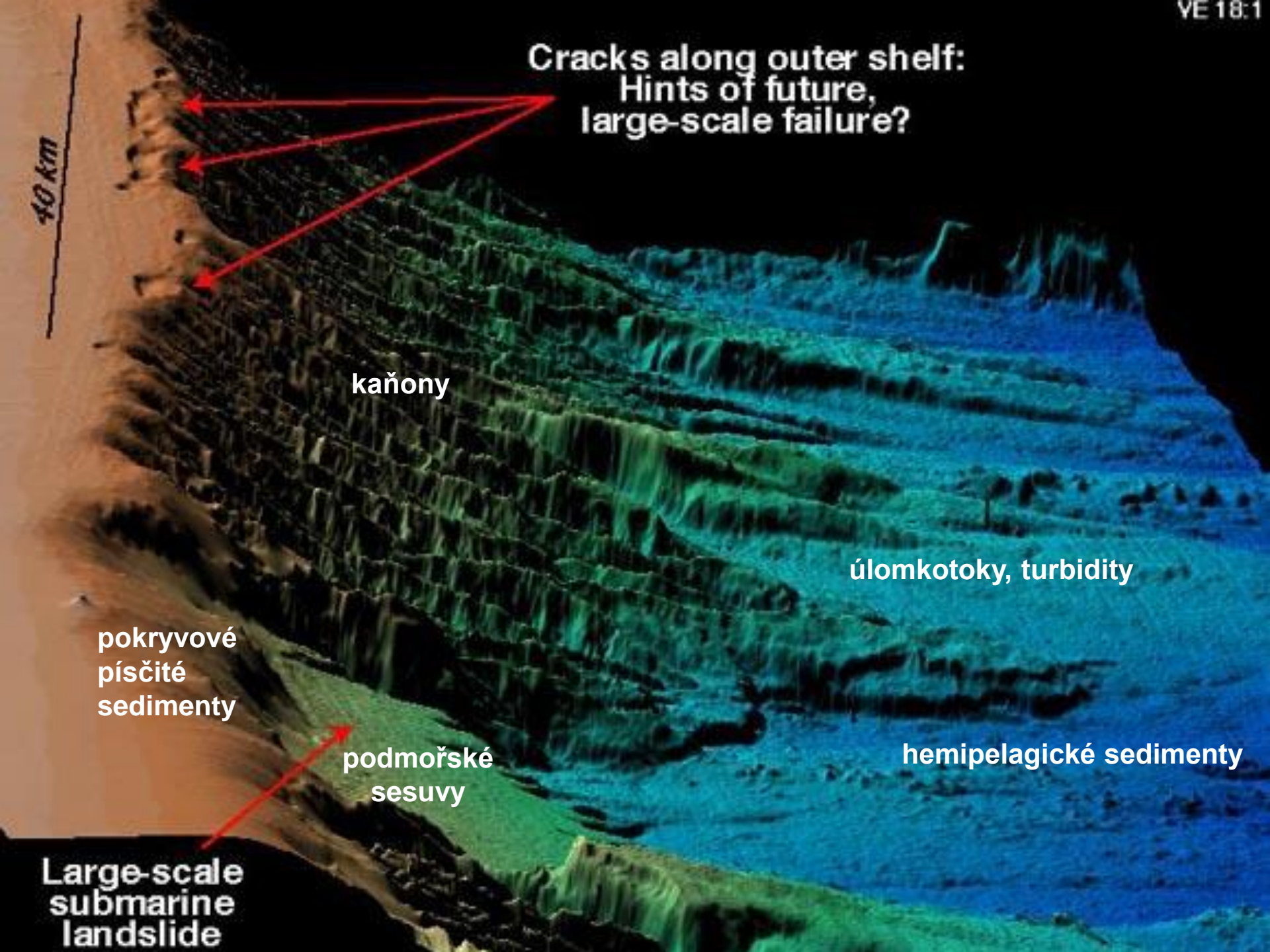
## KONTINENTÁLNÍ SVAH A ÚPATÍ (batyální zóna)

- 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





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

40 km

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

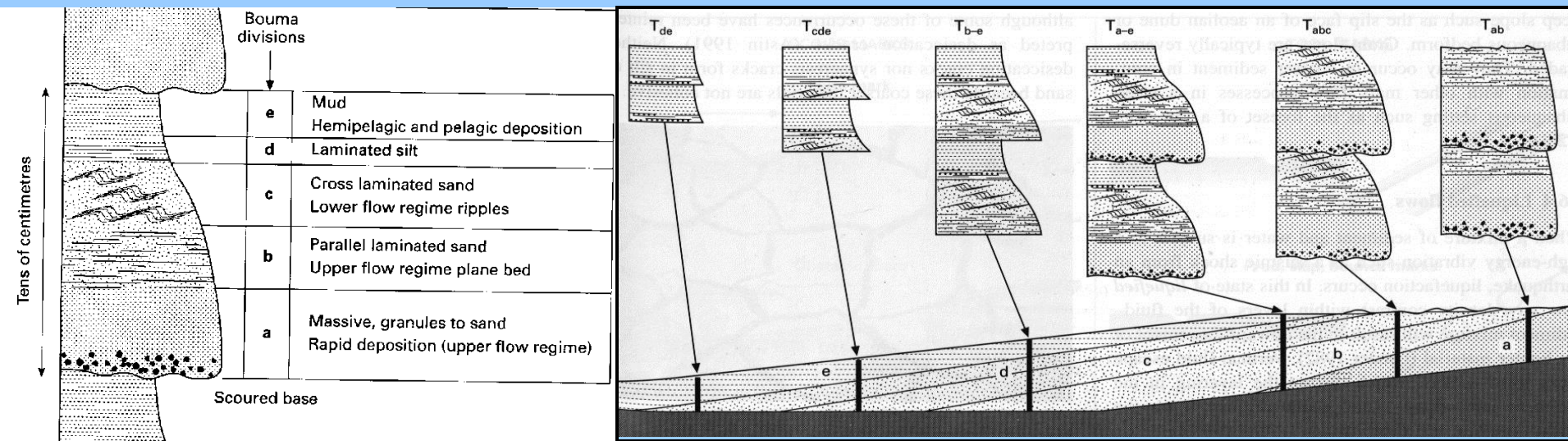
Příčiny:

- 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

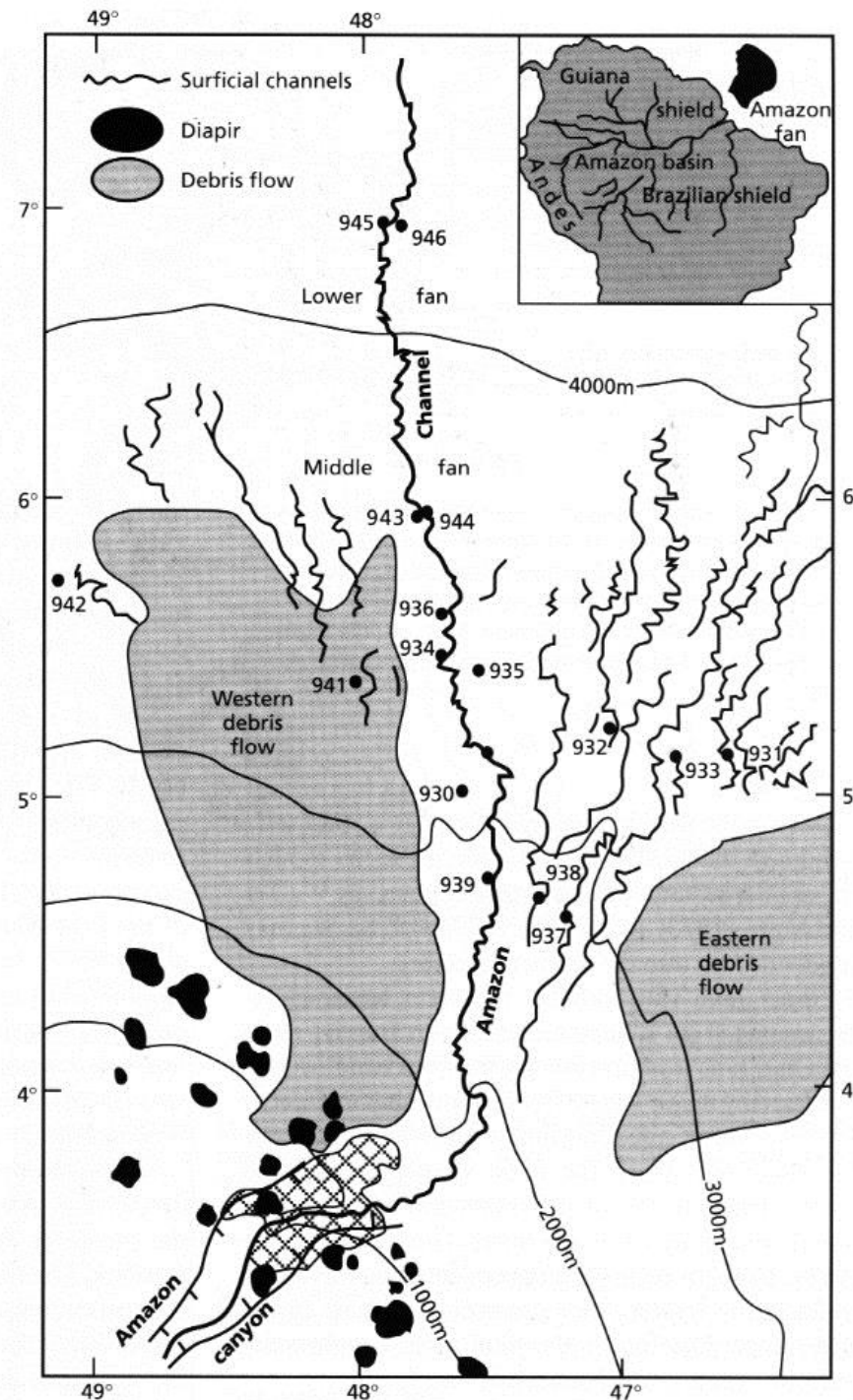
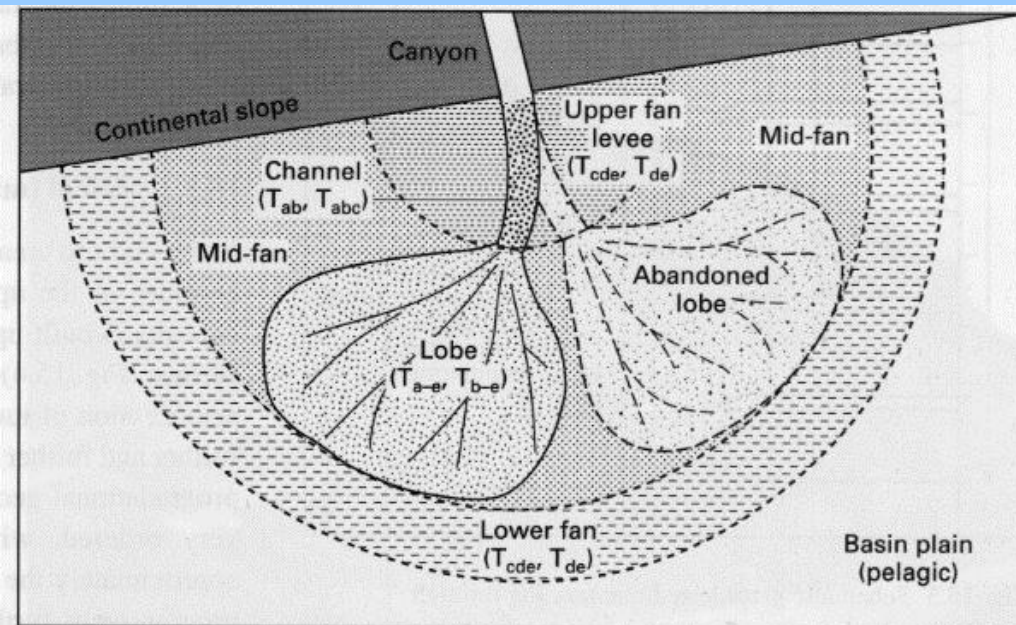
### Boumova sekvence





# 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*

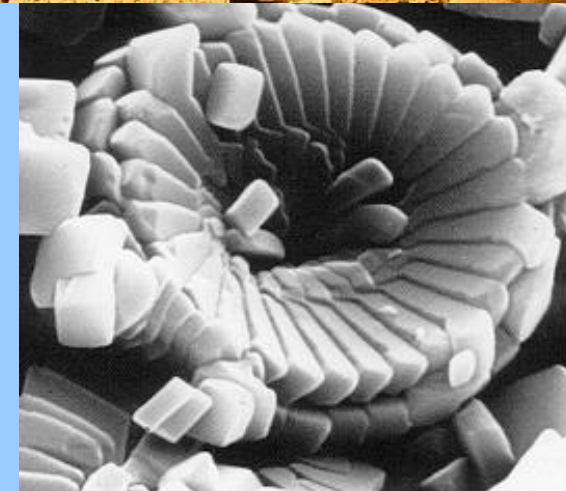
- převážně jemnozrný  $\text{CaCO}_3$  nebo  $\text{SiO}_2$  materiál biogenního původu – skeletární částice a schránky nektonních a planktonních organismů
- hrubý materiál – “dropstones“

### *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)**

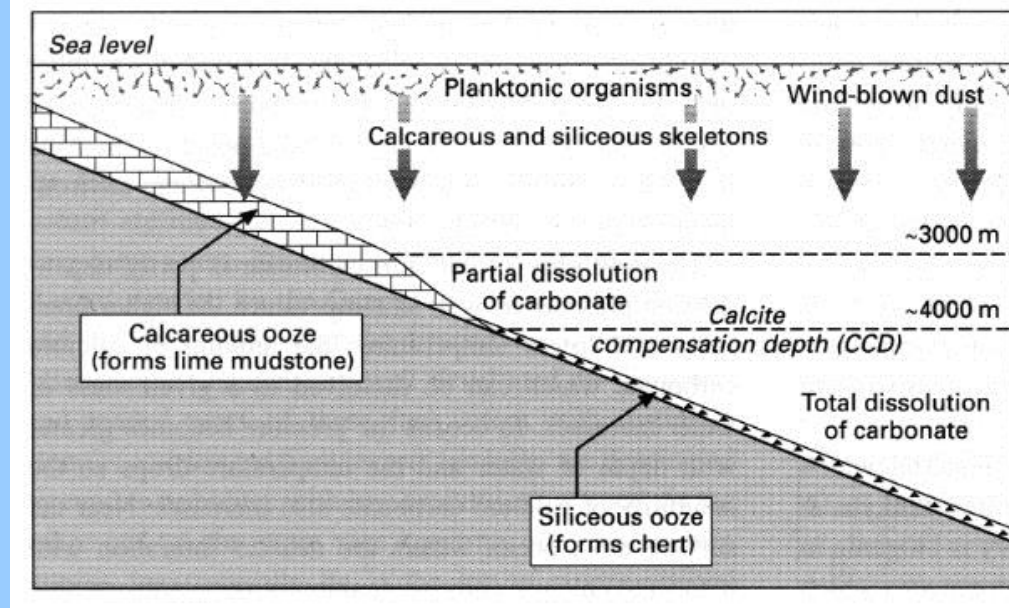




# ROZPOUŠTĚNÍ KARBONÁTU

- rozpustnost  $\text{CaCO}_3$  závisí na tlaku a teplotě
- 3 km začátek výrazného rozpouštění  $\text{CaCO}_3$  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**

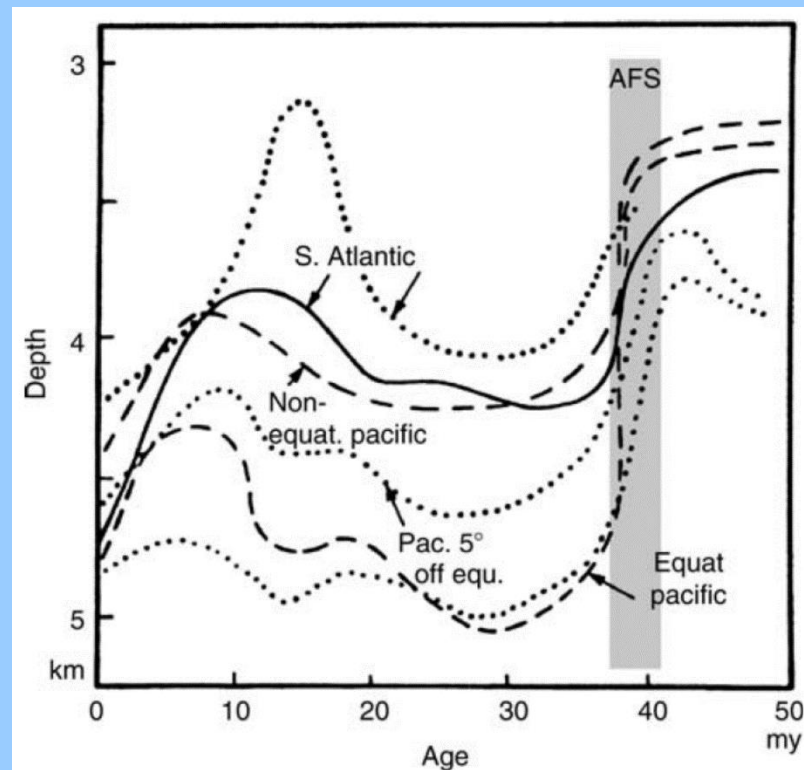
## KŘEMITÉ PELAGICKÉ SEDIMENTY

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

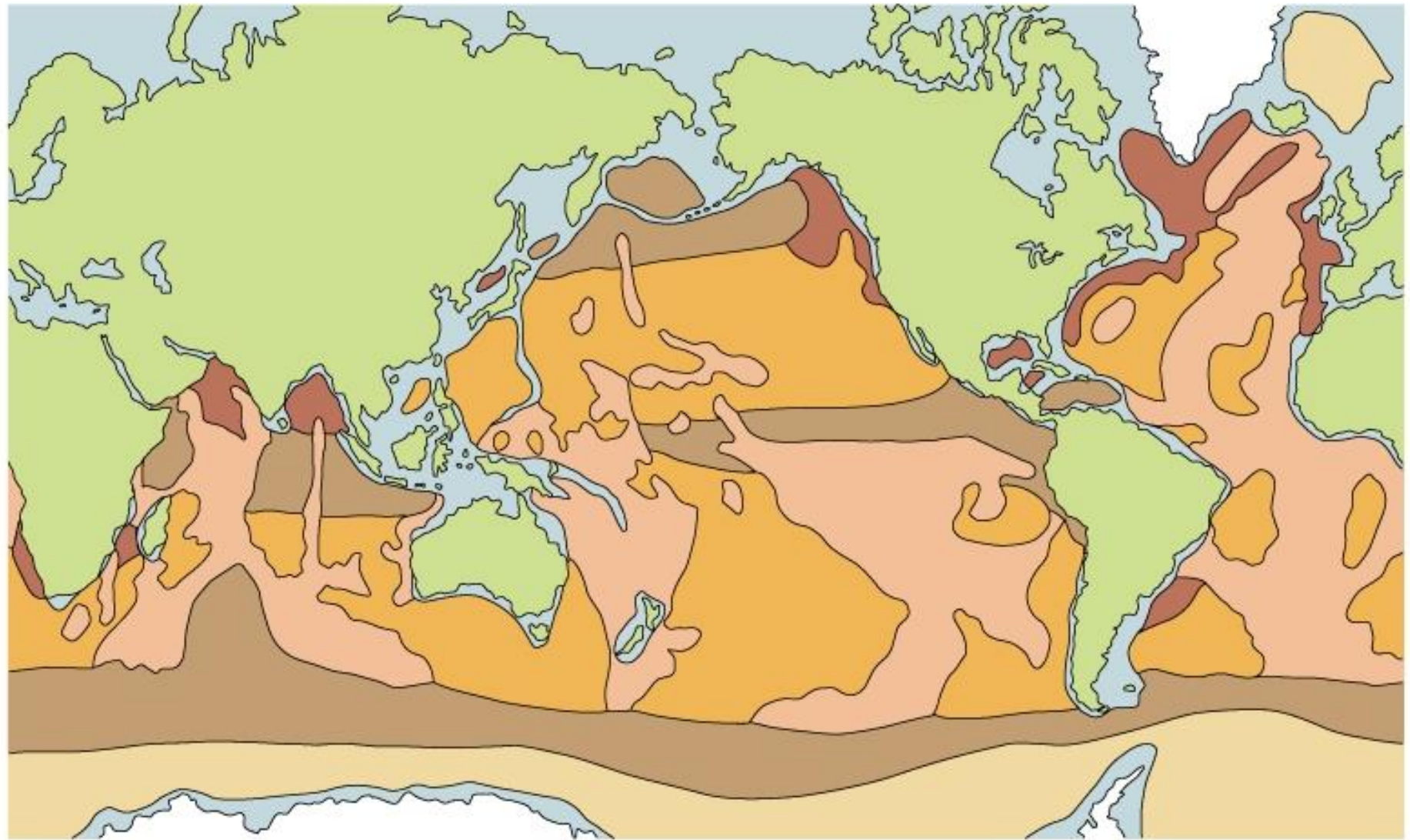
**V hloubce ~6 km – opal comensation depth, silica compensation depth**

## 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

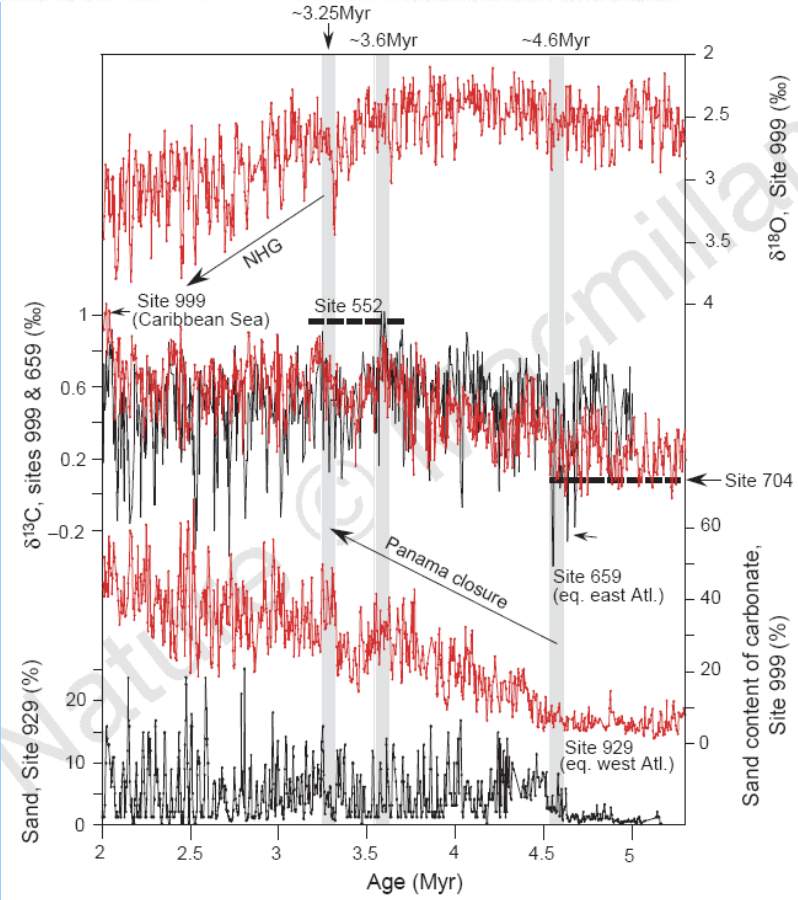
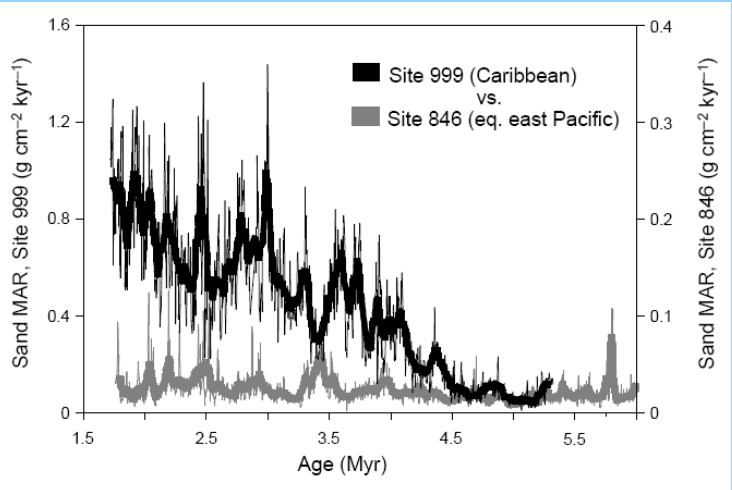
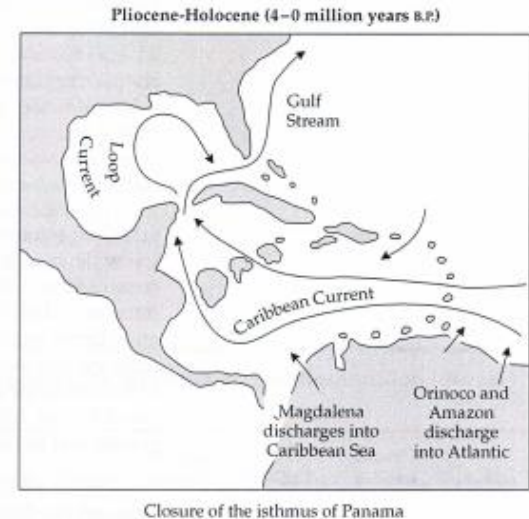
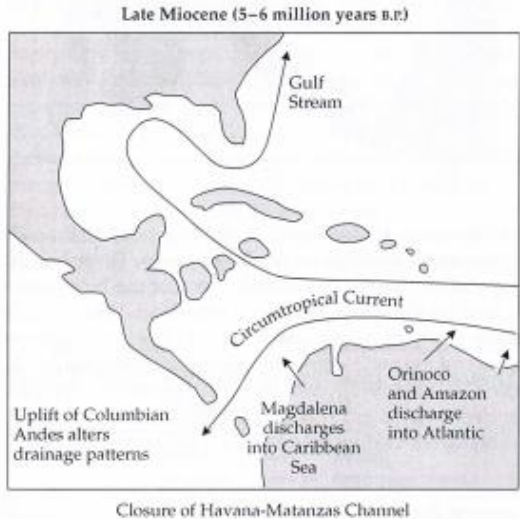
Continental-margin sediments



# 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 –  $\delta^{18}O$  z  $CaCO_3$  foraminifer

$\delta^{18}O$  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  $\delta^{18}O$  přepočítat na paleoteploty:

$$T = 16,5 - 4,3 * (\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w) + 0,14 * (\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w)^2$$

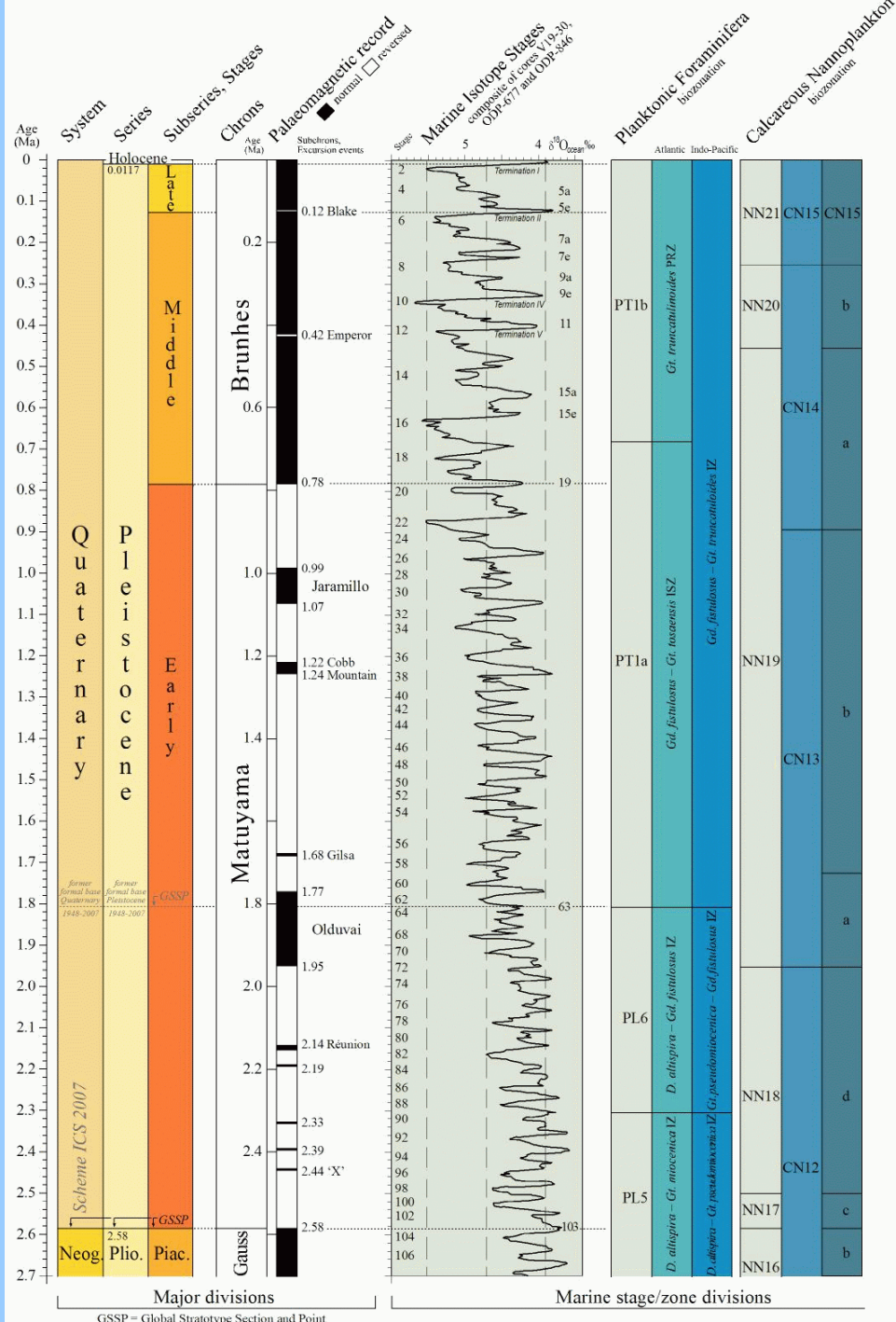
$$T = 16,9 - 4,2 * (\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w) + 0,13 * (\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w)^2$$

$$T = 16,9 - 4,2 * (\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w)$$

$$T = 16,9 - 4,0 * (\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w)$$

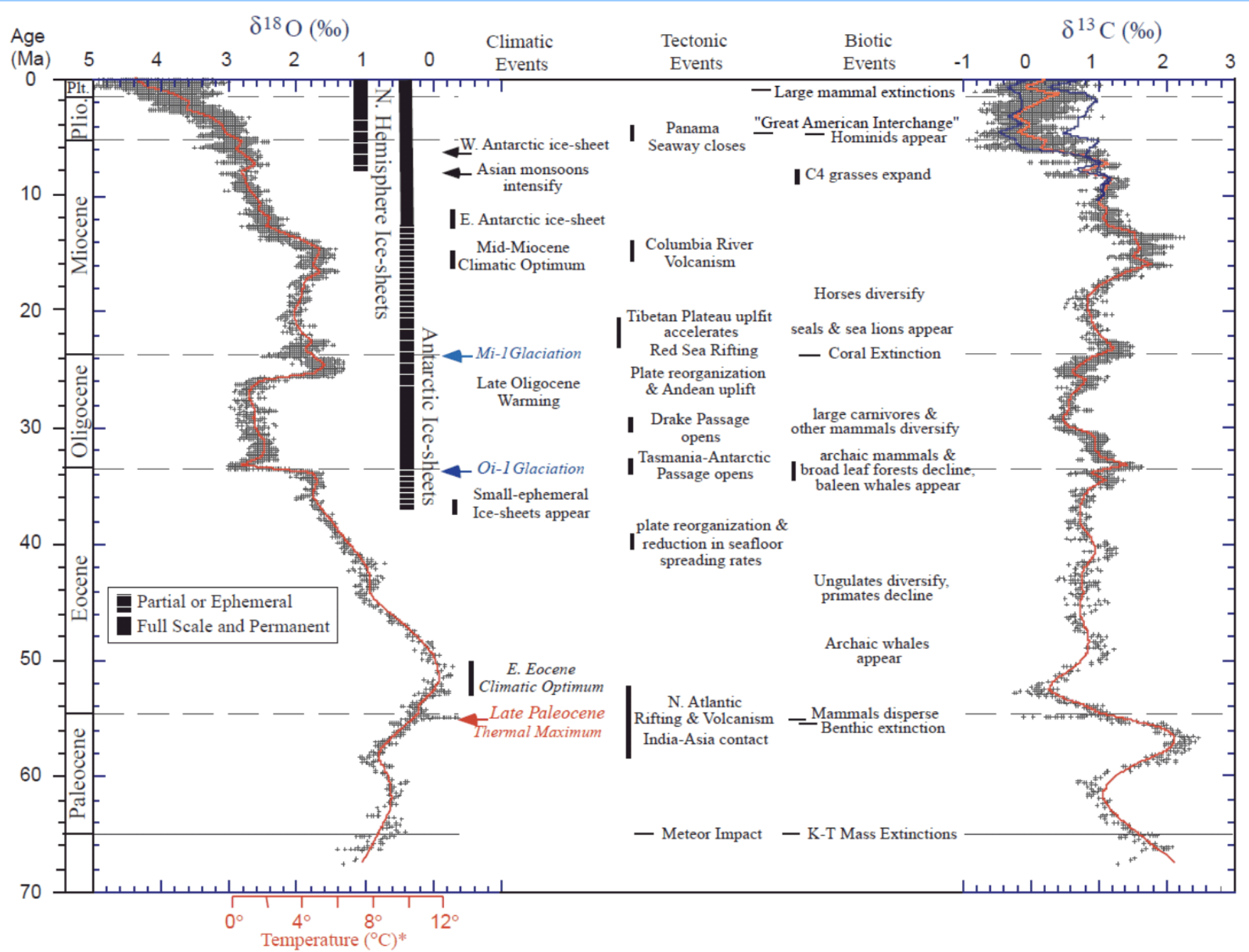
Voda v ledovcích je izotopicky lehčí a její vyvázání způsobuje ztěžknutí mořské vody.

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

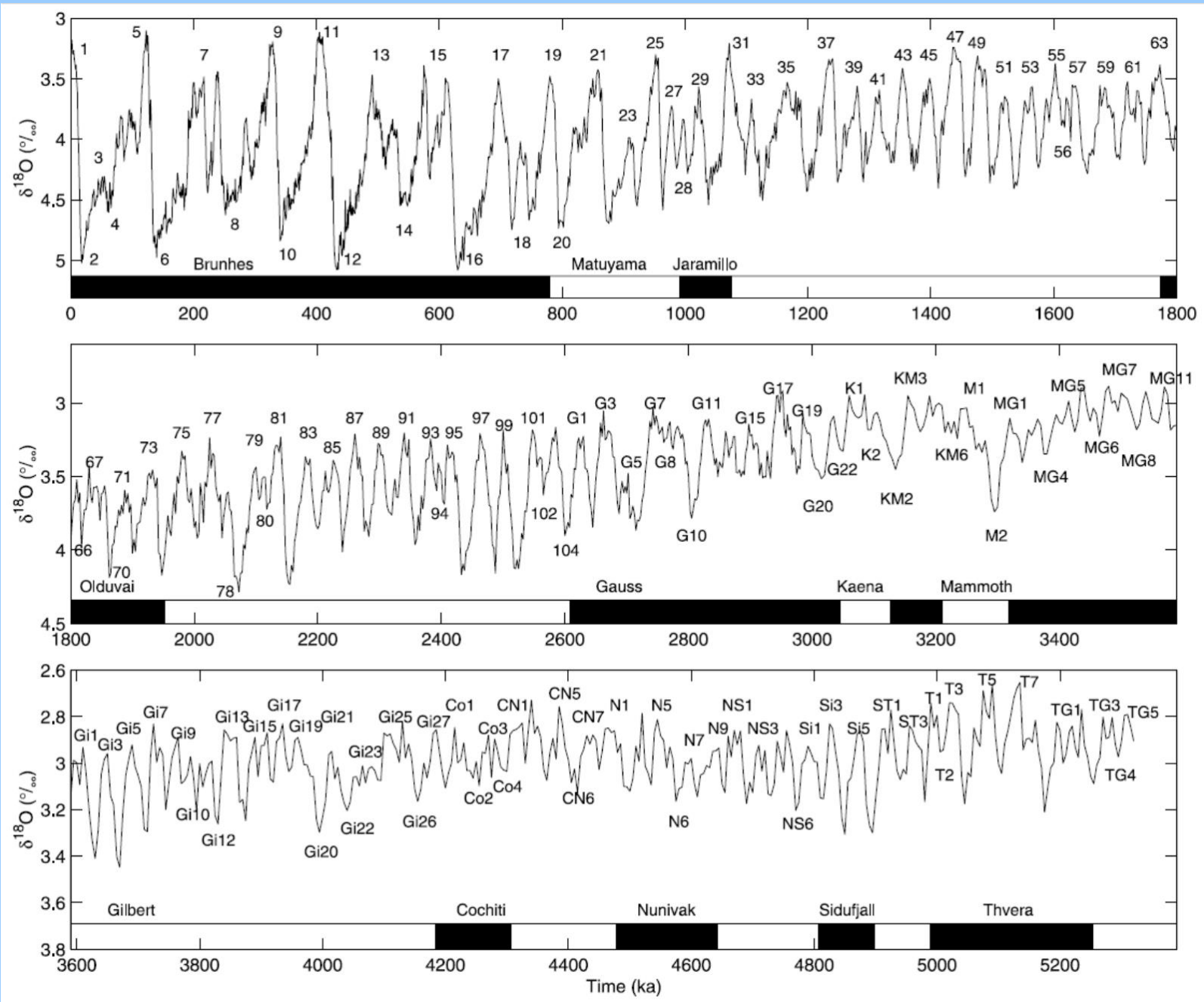




# Změny $\delta^{18}\text{O}$ během kenozoika (posledních 65 Ma)

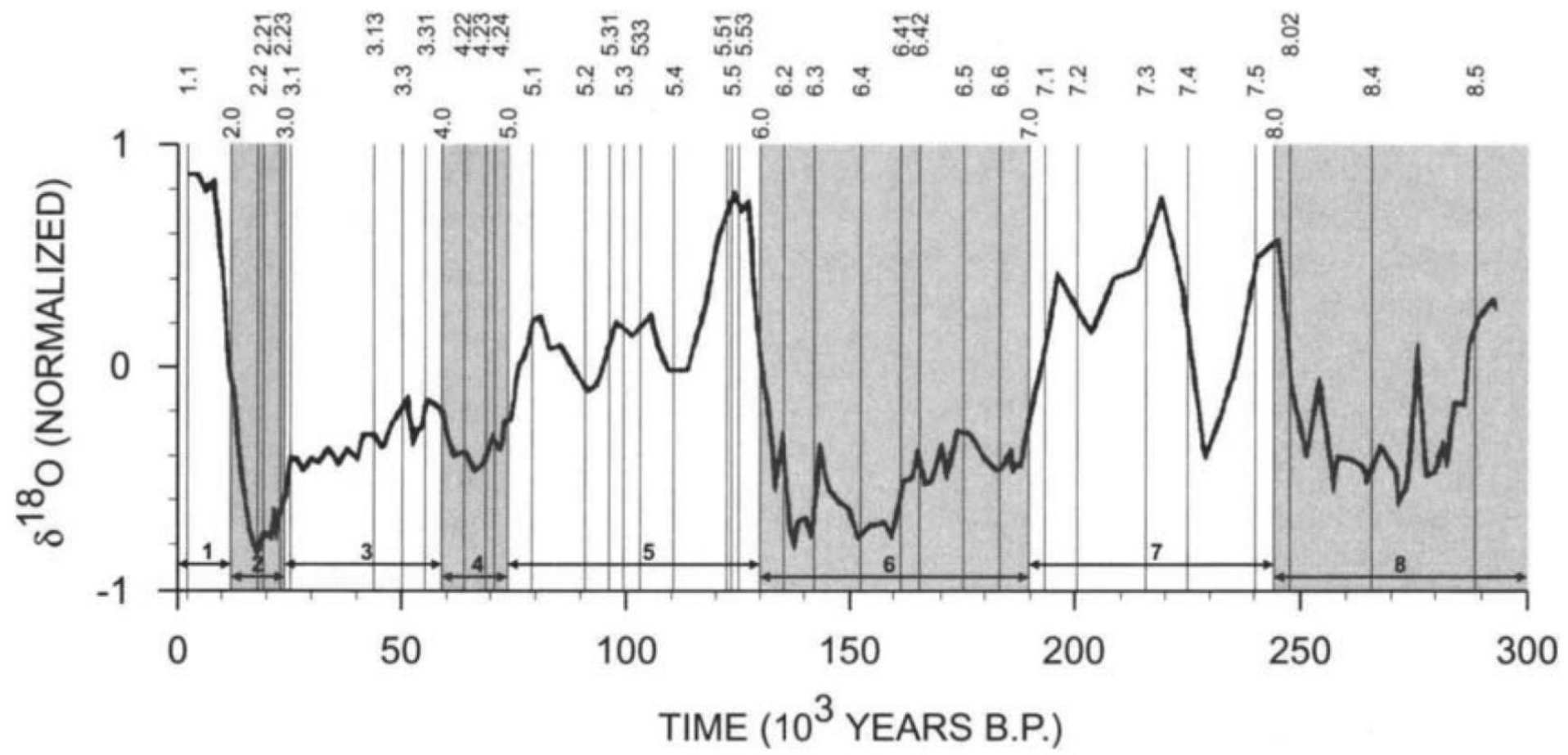


# LR04 stack $\delta^{18}\text{O}$ (pliocén-pleistocén; posledních 5,3 Ma)

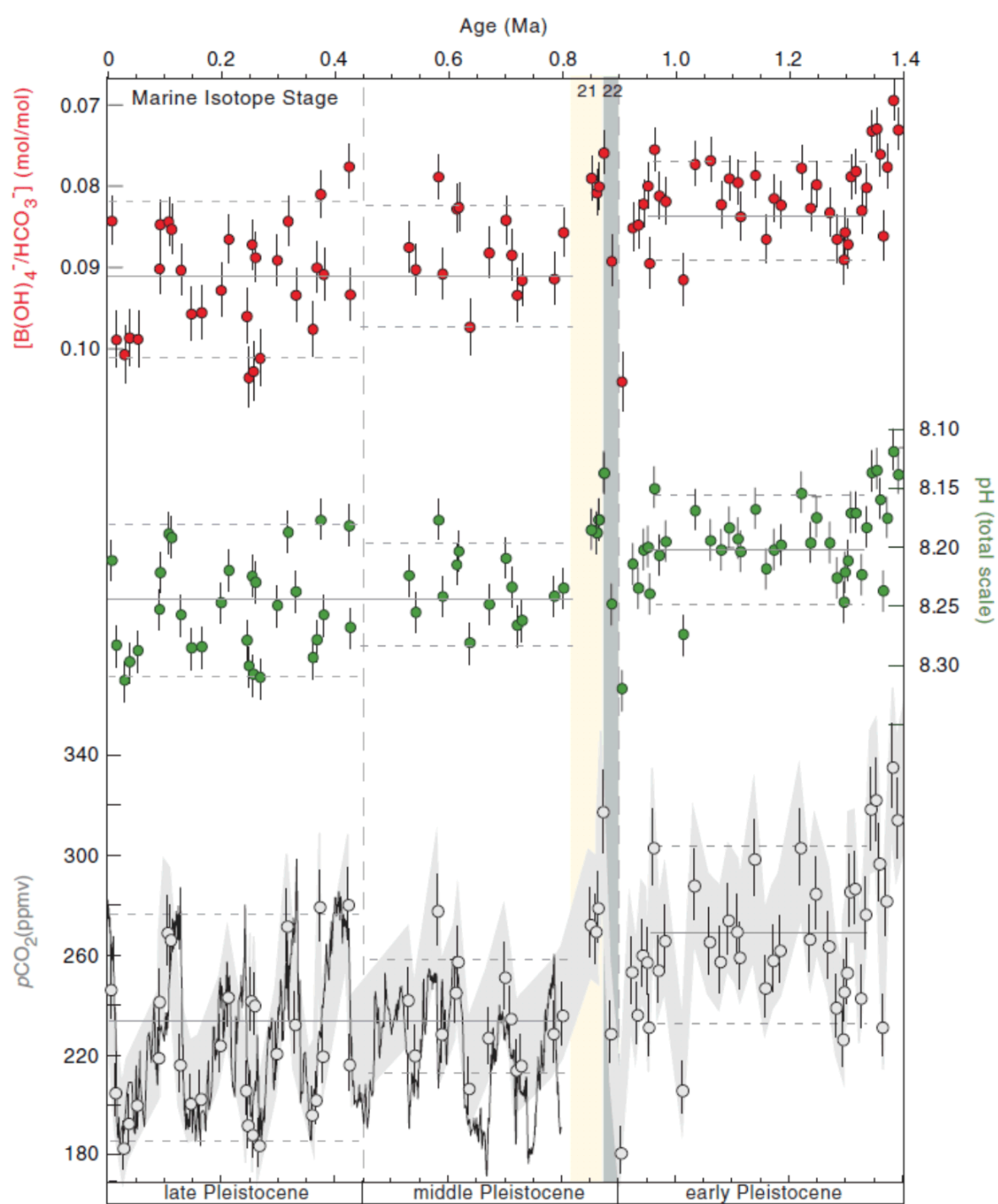




# SPECMAP $\delta^{18}\text{O}$ (300 ka), definice MIS (poslední klimatický cyklus – detail)



# Stanovení $\text{CO}_2$ v dřívější atmosféře na základě mořských sedimentů

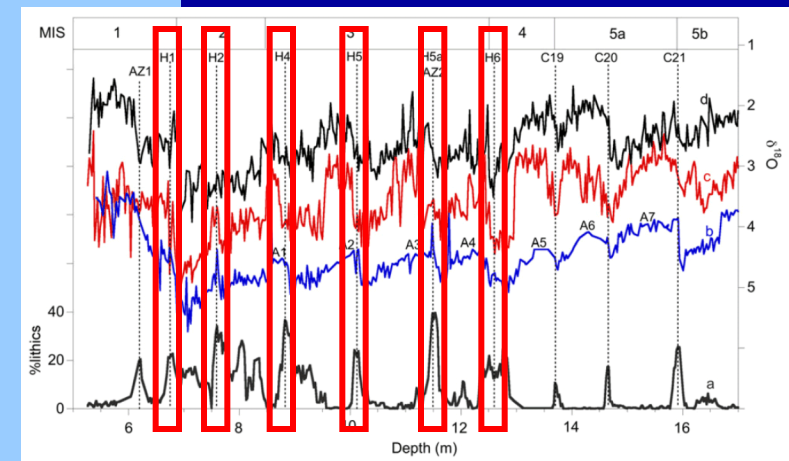
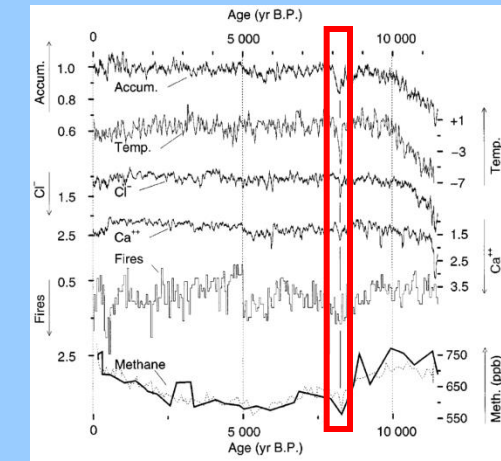
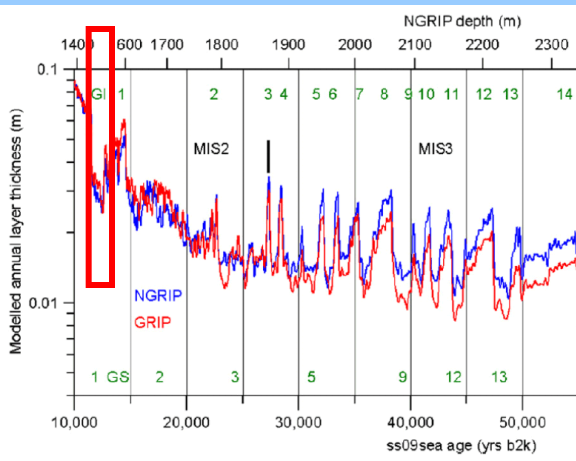
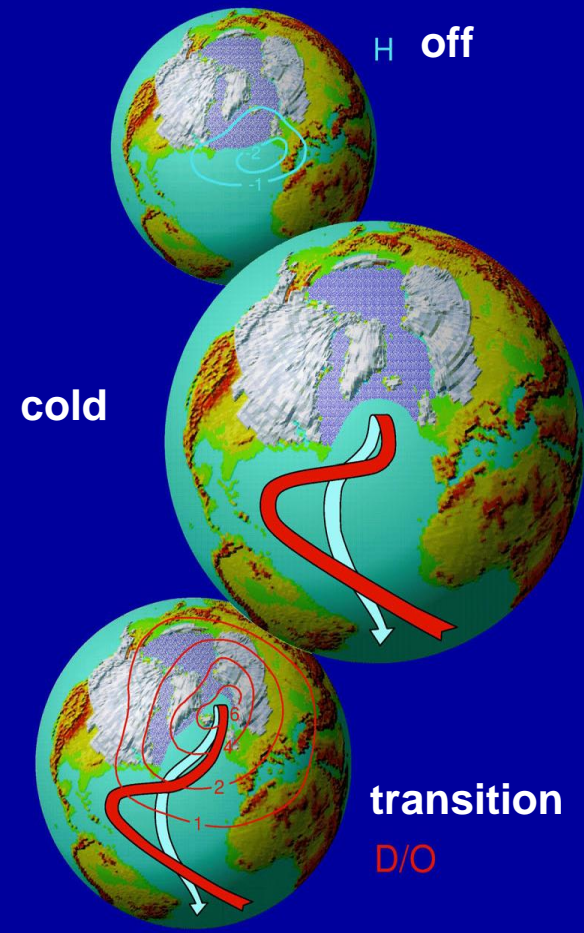




# THC v pleistocénu

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 eventu** nebo během **Heinrichových událostí** posledního glaciálu.



# THC v pleistocénu

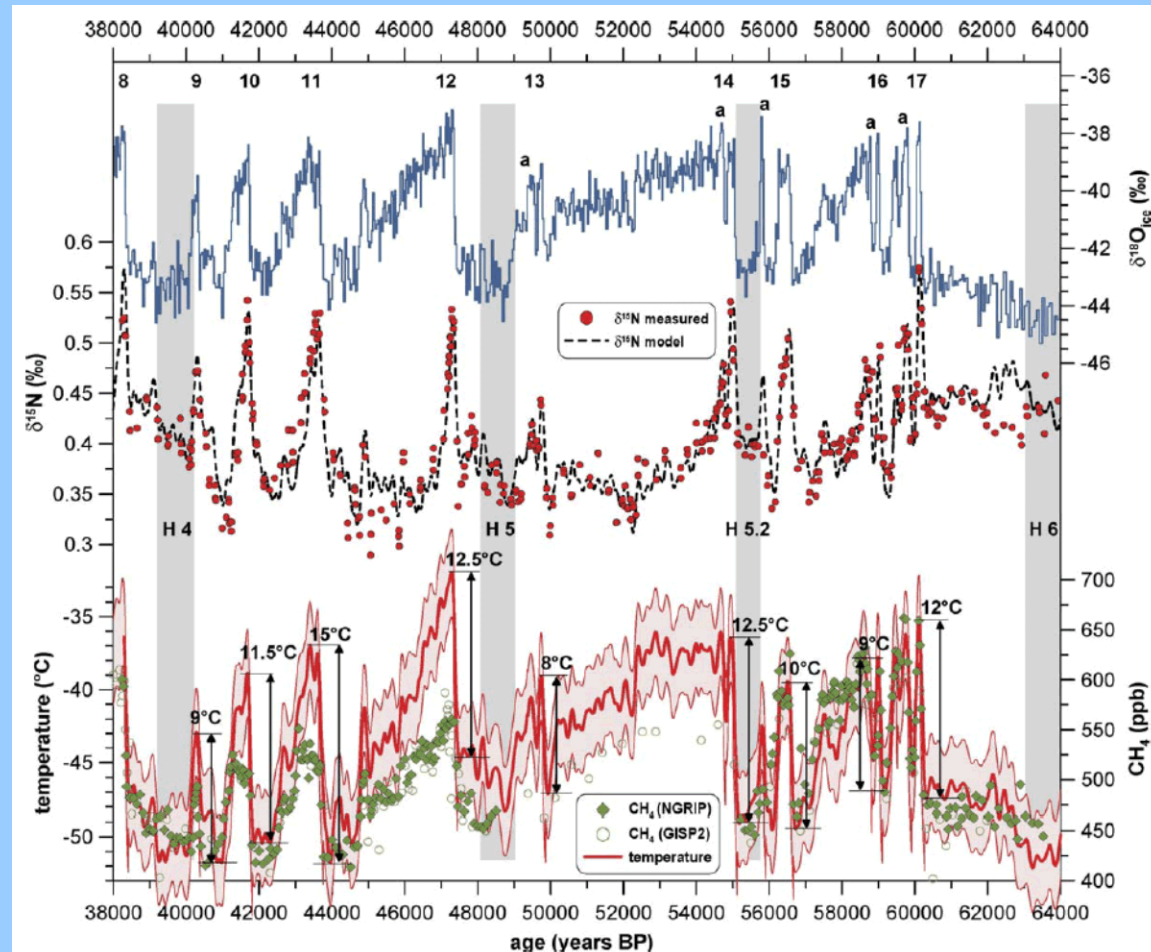
Klimaticky nejvýznamnější rychlé glaciální události (**grónské stadiály a interstadiály** – dříve **Dansgaard-Oeschgerovy cykly**; změny teplot o **8–15°C za 50–200 let!!!**) vznikaly díky S–J změně pozice konvekce - jsou **přechodem mezi teplým a chladným módem**.

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

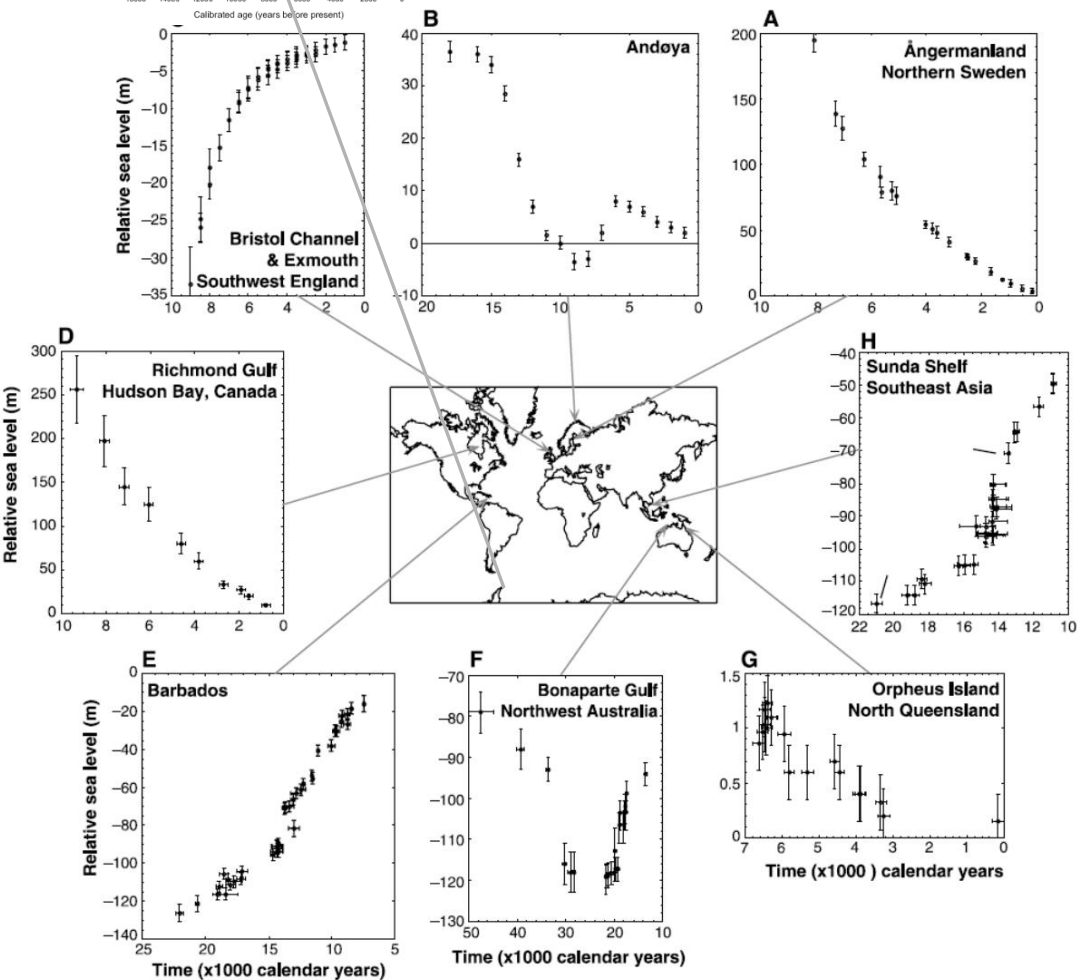
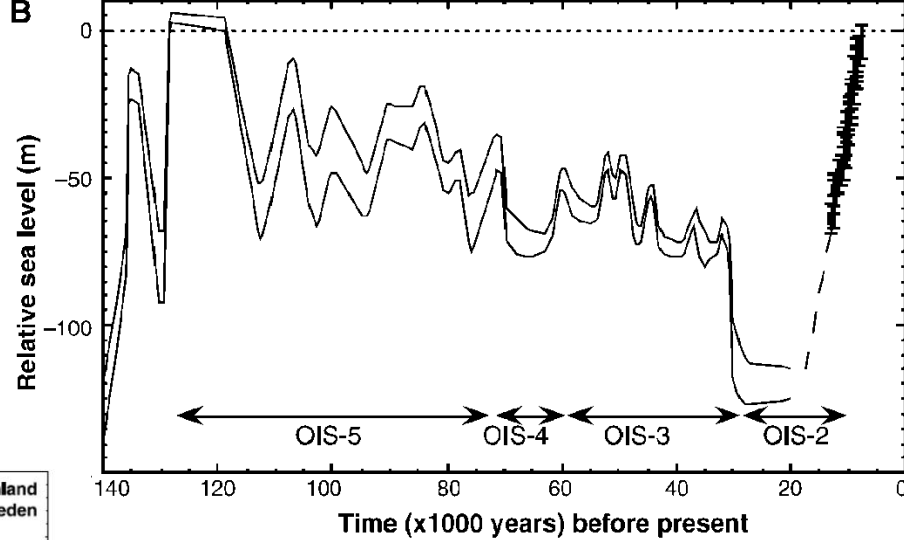
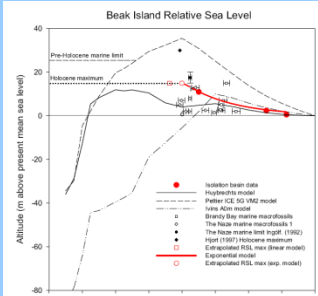
Někteří oceánologové uvažují o obdobném **zastavení nebo změně stavu THC** díky současnému oteplování a **přísunu sladké vody v Arktidě** z tajícího grónského ledovcového štítu a řekami z tajícího ruského a kanadského permafrostu.

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<sup>-1</sup>**.

## 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  $\text{CO}_2$  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.