

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

# **Zalednění a změny permafrostu v kvartéru**



# Typy ledovců, základní klasifikace

klasifikace podle rozměrů a vztahu k okolní topografii:

## Visutý ledovec

Zahrnuje nejmenší formy ledovců, které vznikají na příkrých svazích a mohou tvořit iniciální ledovcové akumulace pro další níže uvedené typy ledovců.

## Karový ledovec

Vzniká často jako visutý ledovec a dalším vývoje a větší akumulací ledu modeluje svoje podloží za vzniku ledovcového karu. Ten má obvykle stupňovitý profil a dochází zde k akumulaci ledovcové hmoty a k dalšímu prohlubování dna.

## Horský ledovec (údolní ledovec)

Jedná se ledovce, které jsou sevřené horskými údolními, obvykle vytékají z karového ledovce jako splazy a tvoří boční a čelní morény.

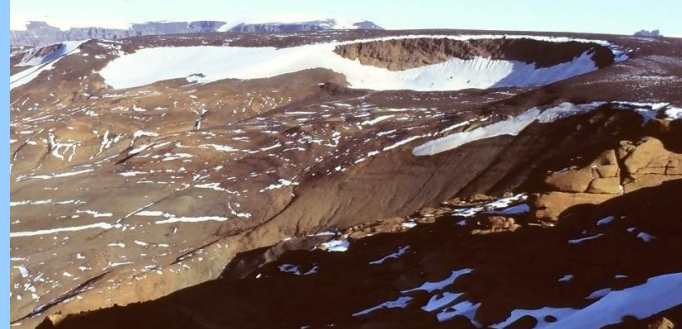
## Piedmontní ledovec

Piedmontní ledovce vznikají pod úpatím hřbetů spojením několika ledovcových splazů vytékajících z různých karů a lemují potom celé úpatí.

Lachman Crags, ostrov Jamese Rosse



Johnson Mesa, ostrov Jamese Rosse



Whisky Glacier, ostrov Jamese Rosse



Alpha Glacier, ostrov Jamese Rosse





## Náhorní ledovec (dómový ledovec)

Náhorní ledovce vznikají na plochých vyvýšených částech reliéfu, na svých okrajích mohou tvořit jednotlivé splazy stékající z náhorní části. Pohybují se obvykle velmi pomalu. Mají rozměry do prvních tisíců km<sup>2</sup>. Např. **Jotunheimen** nebo **Columbia icefield**.

## Ledovcová čapka

Je tvořena rozsáhlou masou ledu pokrývající horu nebo celé pohoří do rozlohy ~50 000 km<sup>2</sup>. Na okrajích stékají jednotlivé splazy a mohou se telit až do moře. Např. **Jihopatagónská ledovcová čapka** nebo **Vatnajökull**.



Vatnajökull, Island

## Ledovcový štít (kontinentální ledovec)

Nejrozsáhlejší ledovce, které dnes pokrývají pouze Antarktidu a Grónsko s plochou větší než ~50 000 km<sup>2</sup>. Dnes čtyři ledovcové štíty:

**Východoantarktický** (EAIS), **Západoantarktický** (WAIS) a **Antarktického poloostrova** (APIS) a **Grónský**. Během glaciálů **Euroasijský** (Severoevropský, Britský, Barents-Karelský a Západosibiřský), **Patagónský** a **Severoamerický** (Kordillerský a Laurentinský) ledovcový štít.



Antarktický poloostrov

## Ledovcový splaz a proud

Ledovcové čapky a ledovcové štíty tvoří na svých okrajích splazy, které díky podložní morfologii postupují mnohem rychleji než ostatní části ledovce, označujeme je ledovcové proudy. Dosahují až k okrajům pevniny nebo mohou živit šelfové ledovce. Největším je **Lambertův ledovec**, v glaciálu byl pro Evropu významný **Baltský ledovcový proud**.

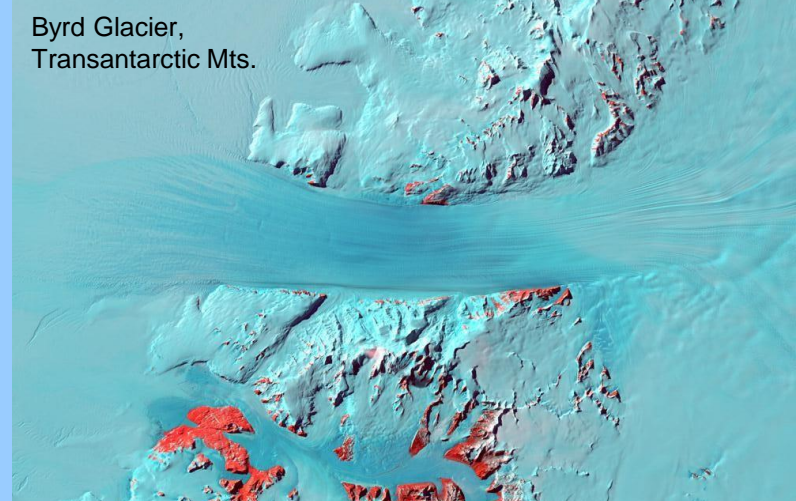
## Šelfový ledovec

Šelfové ledovce začínají v místě, kde stékající ledovec začne plout po mořské hladině (bazální linie). Na jeho bázi vzniká namrzáním podmořský led. Od čela se odlamují ledovcové kry a v zimě se kolem tvoří mořský zámraz. Největší **Rossův šelfový ledovec**.

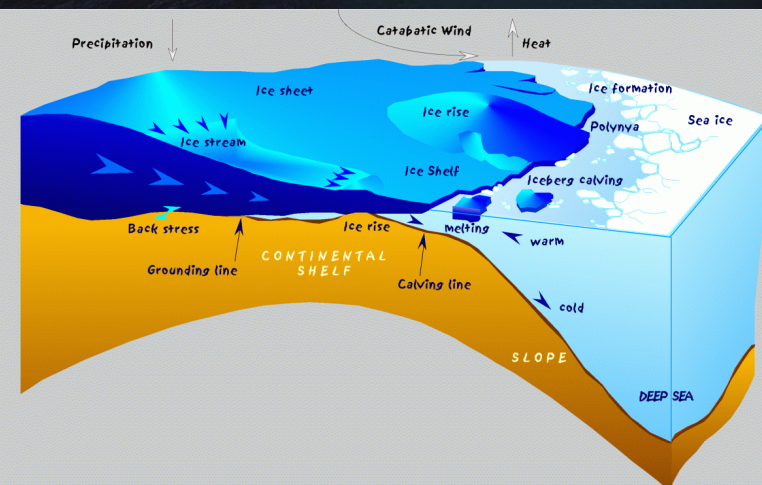
## Ledovcový výšvih (ice rise)

Ledovcové výšvihy vznikají v místech, kde postupující šelfový ledovec překračuje vyvýšené podloží (ostrov). Na naprosto plochém povrchu tak vznikají kopulovité vyvýšeniny obvykle 100–200 m vyvýšené nad okolním povrchem šelfového ledovce. Velké množství se jich vyskytuje např. na **šelfovém ledovci E. Ronneové**.

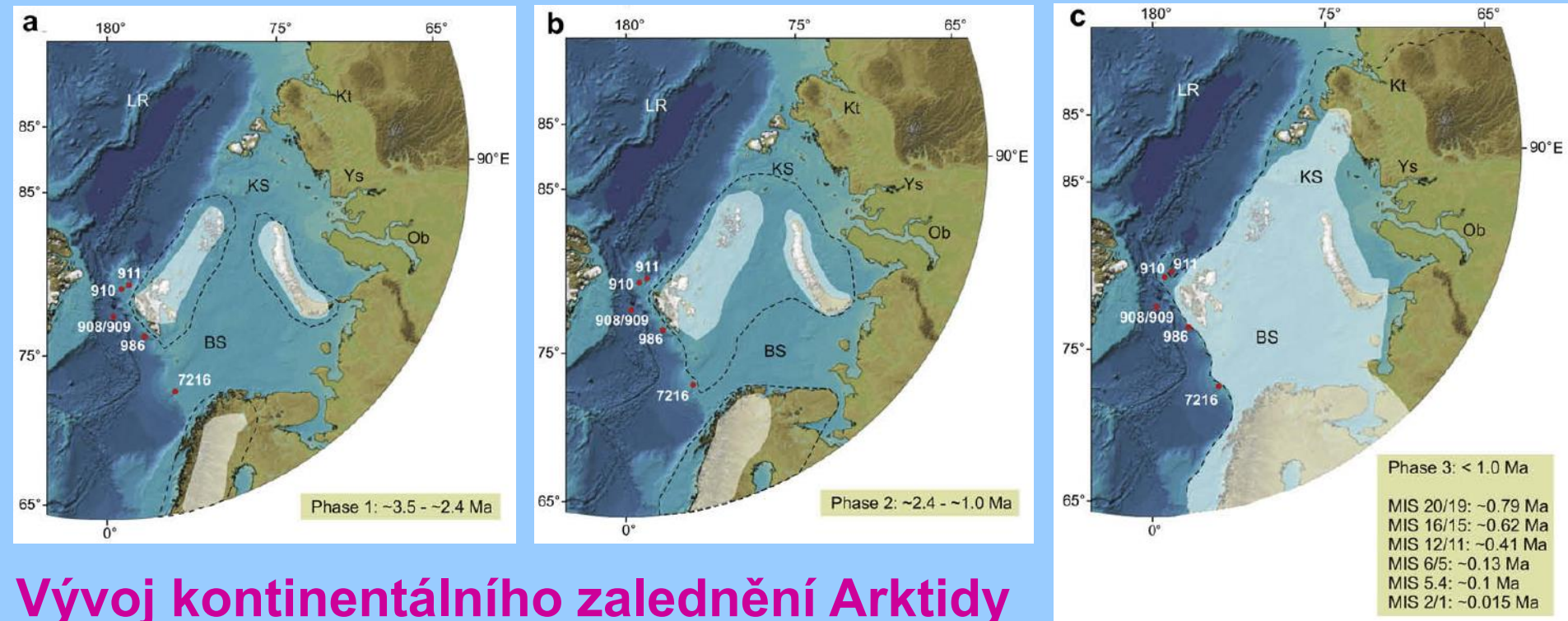
Byrd Glacier,  
Transantarctic Mts.



Ross Ice Shelf



# Paleogeografická rekonstrukce zalednění v kvartéru

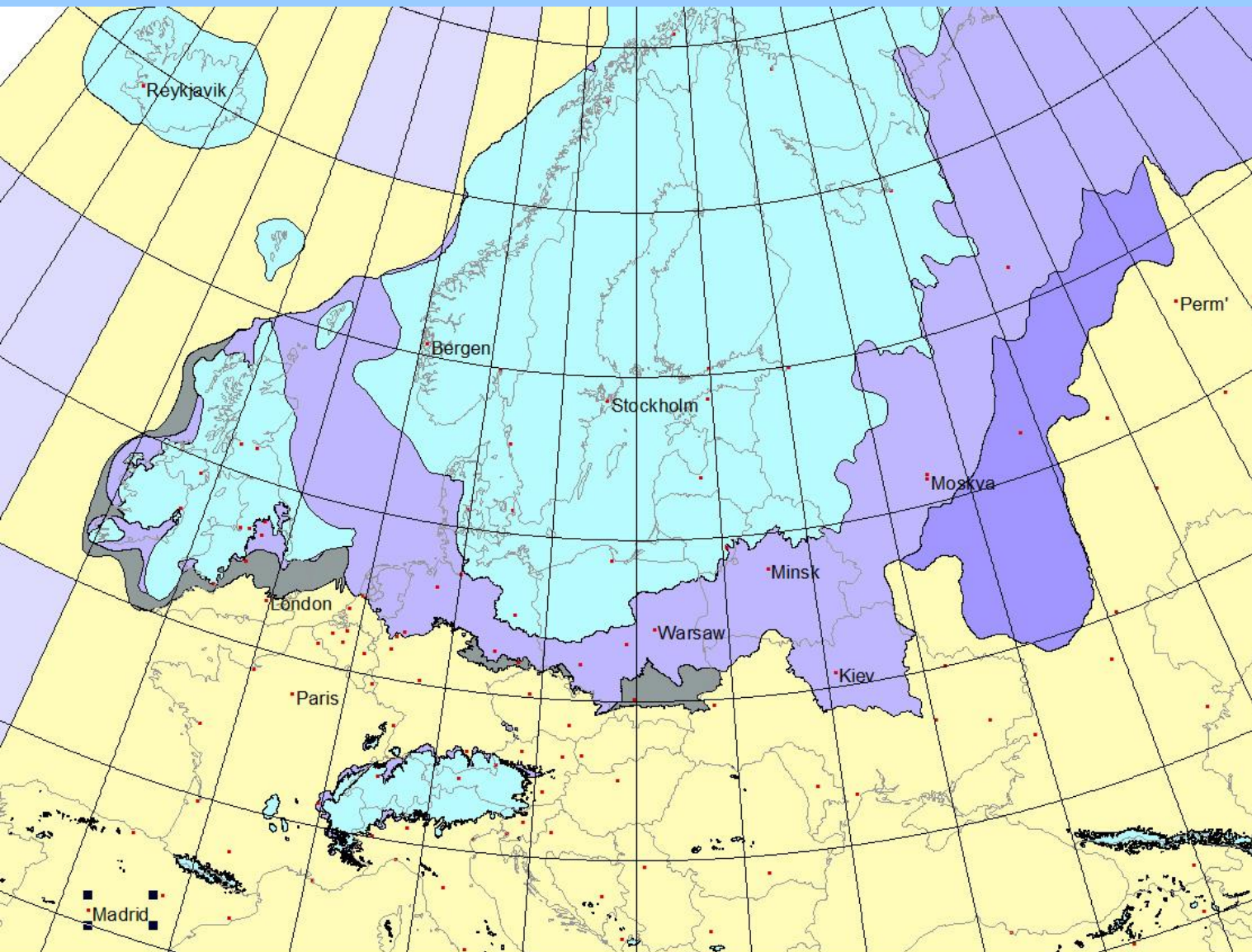


## Vývoj kontinentálního zalednění Arktidy

Maximální a minimální rozsahy zalednění během **a) pliocenních glaciálů;**  
**b) glaciálů spodní pleistocénu;** **c) středního a svrchního pleistocénu**

Progresivní rozvoj kontinentálního zalednění během déle trvajících středopleistocenních glaciálů je dobře patrný.

# Maximální rozsahy severoevropských ledovcových štítů během pleistocénu



**donský glaciál**

(před 630 tisíci let)

**elsterský gl.**

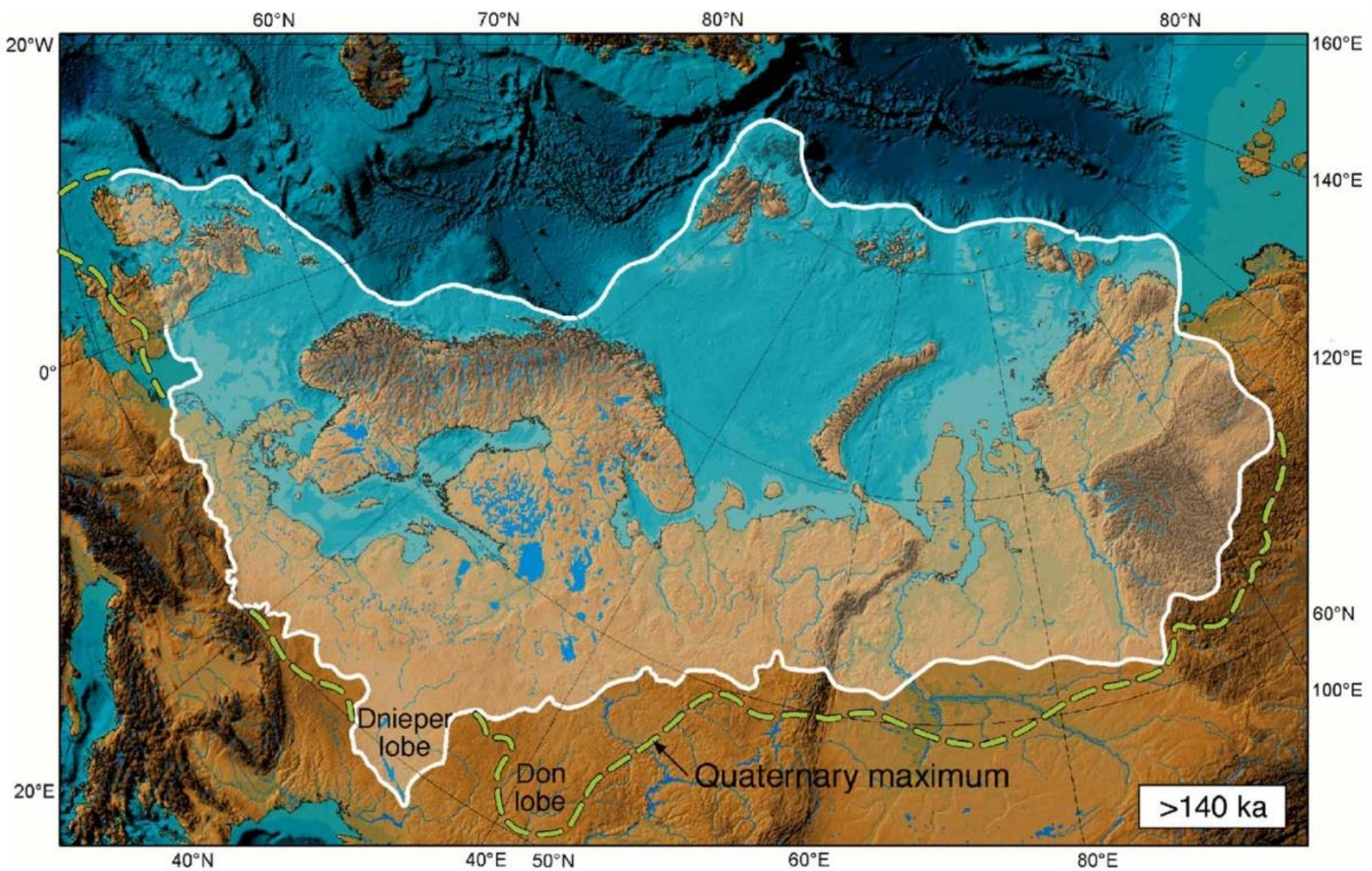
(před 435 tisíci let)

**sálský gl.**

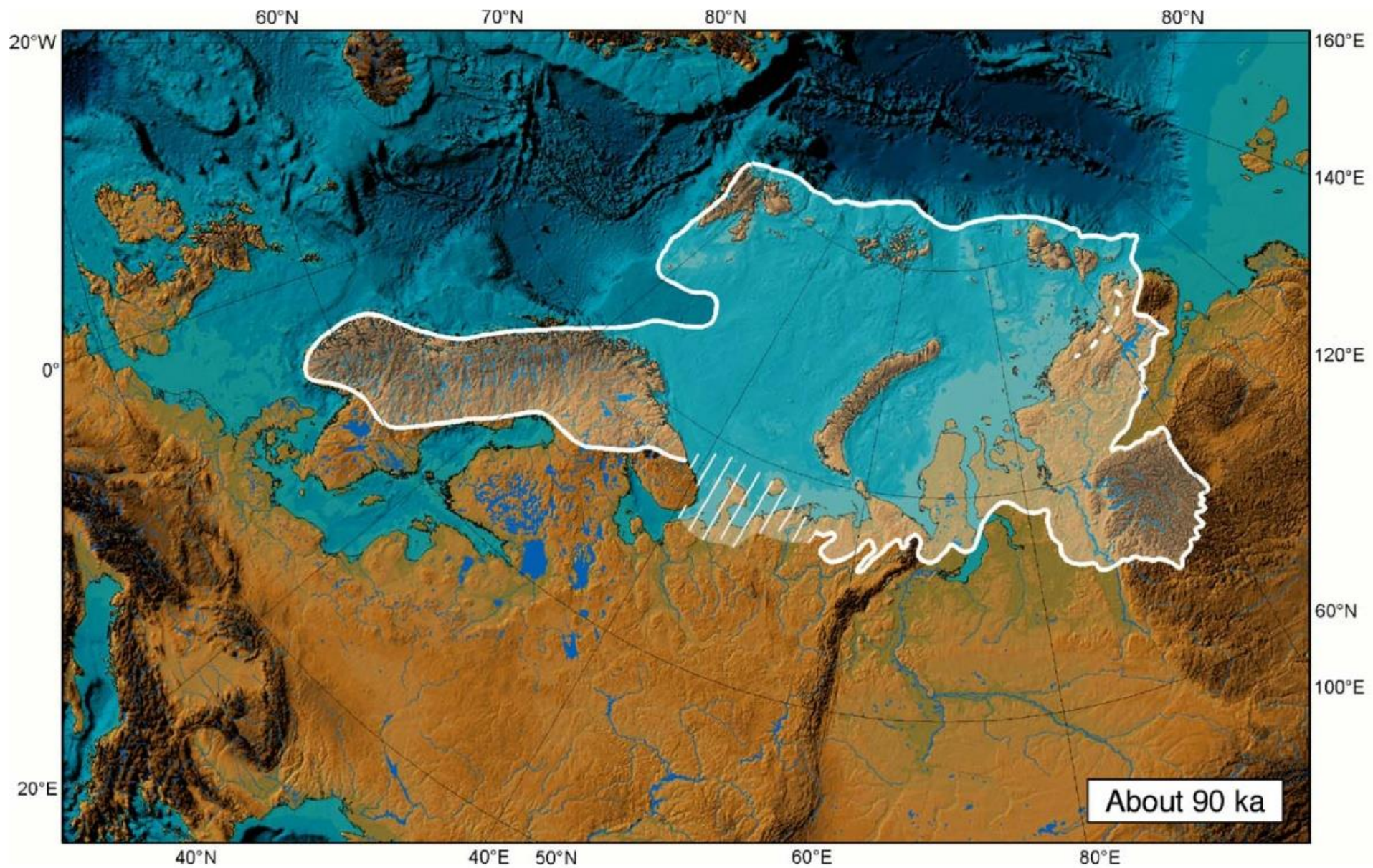
(před 170 tisíci let)

**viselský gl.**

(před 20 tisíci let)

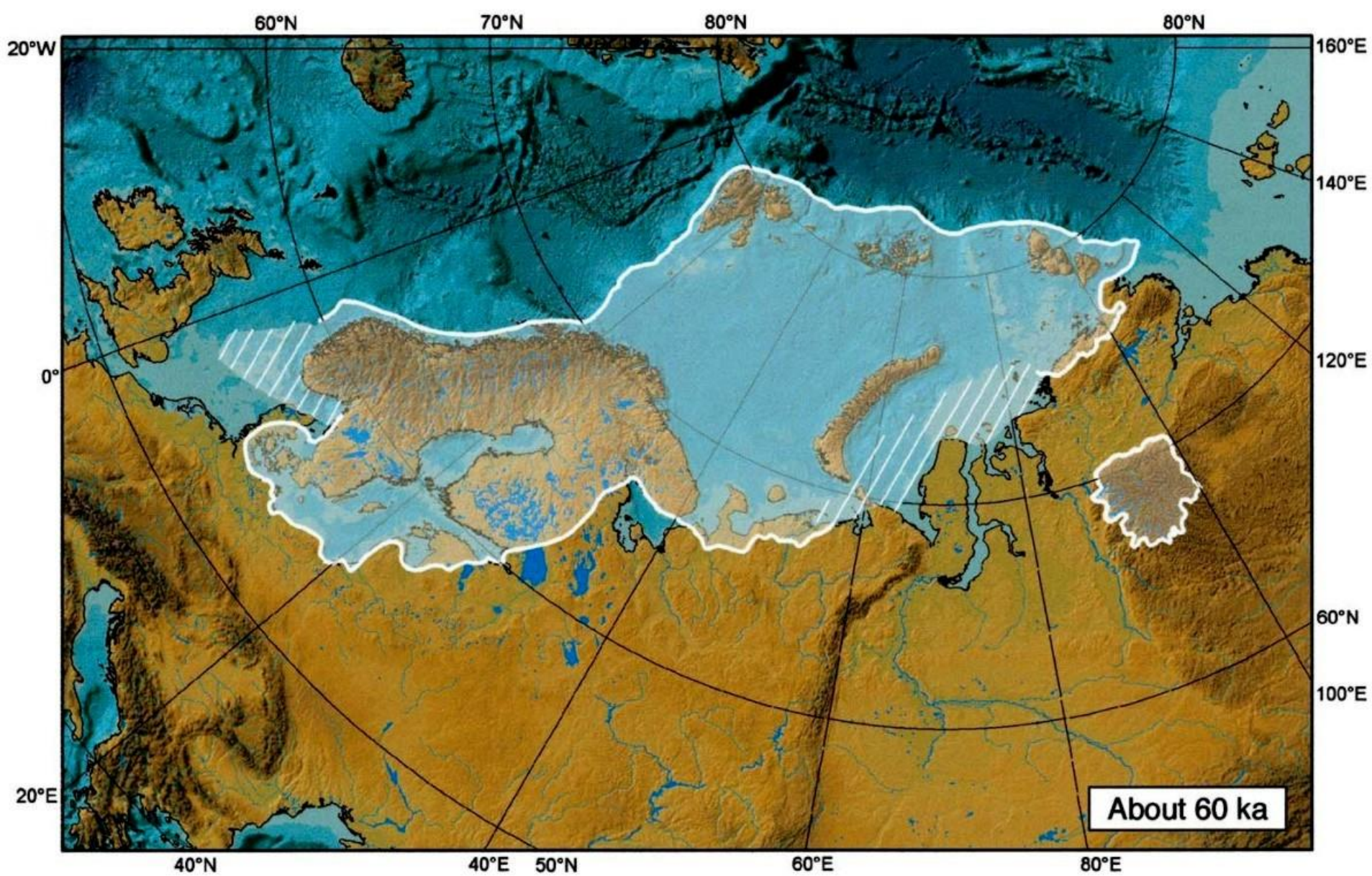


**Maximální rozsah Eurosibiřského zalednění během sálského glaciálu**

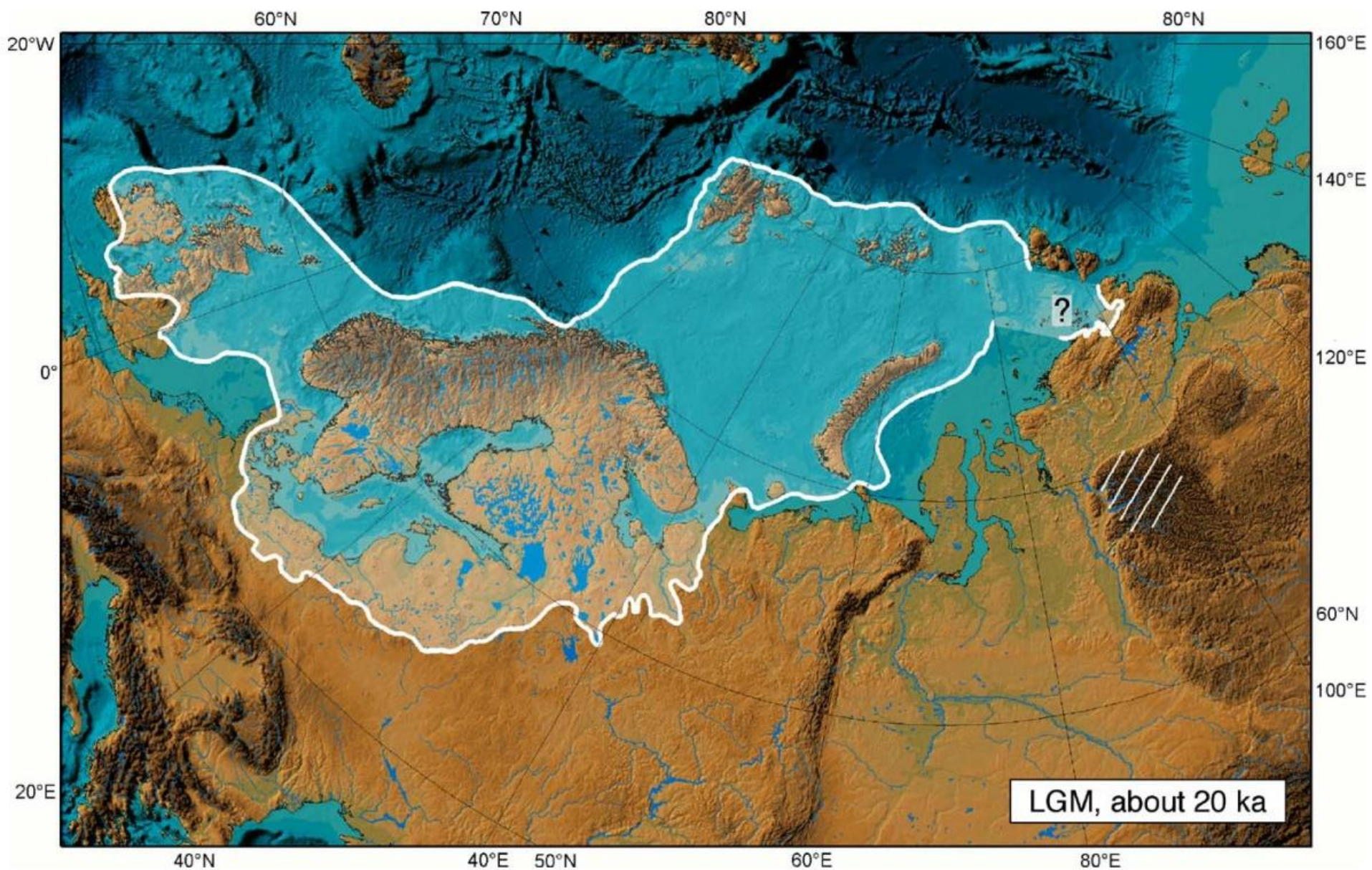


**Rozsah Eurosibiřského zalednění na počátku viselského glaciálu (MIS 5b)**



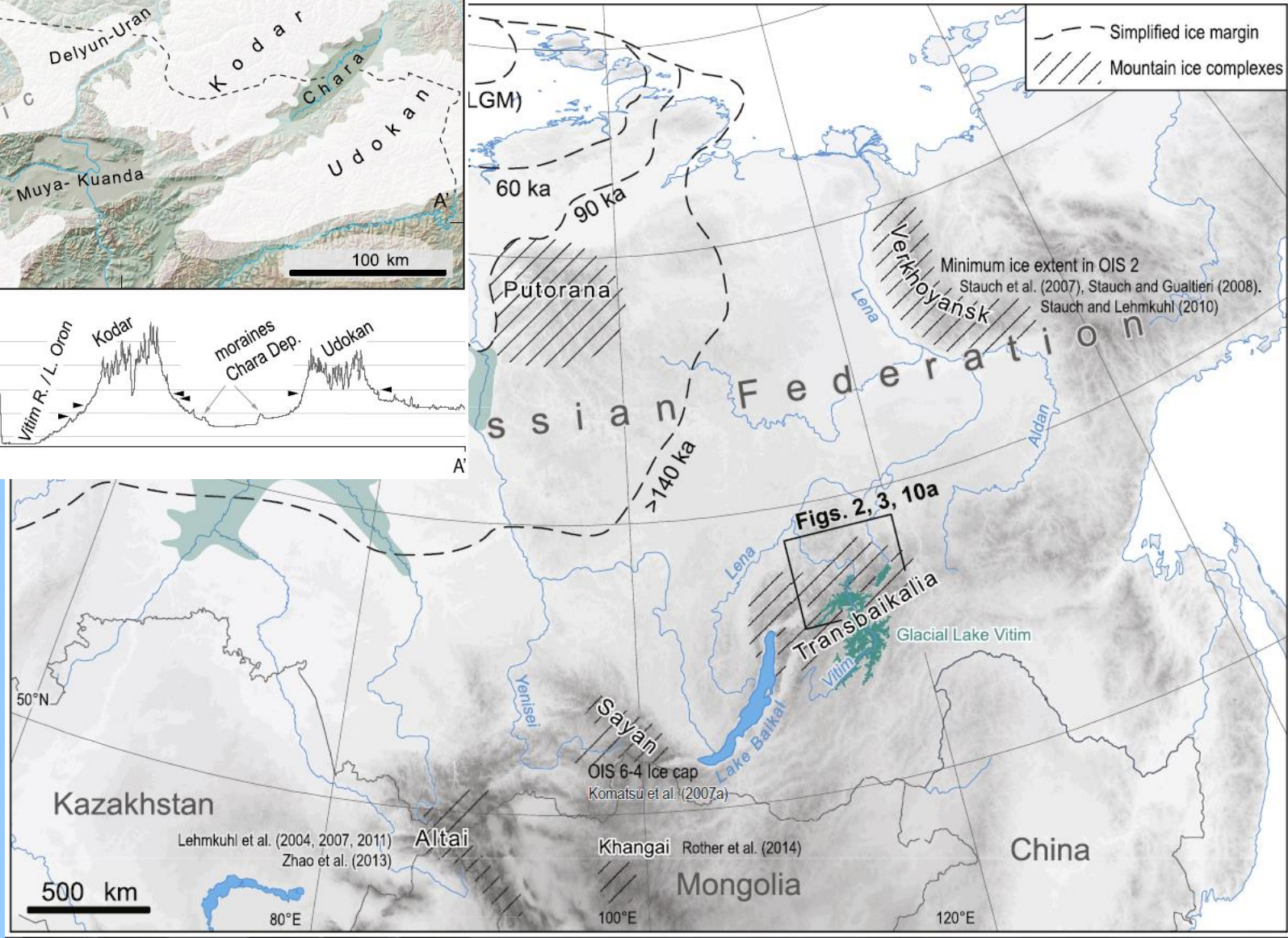
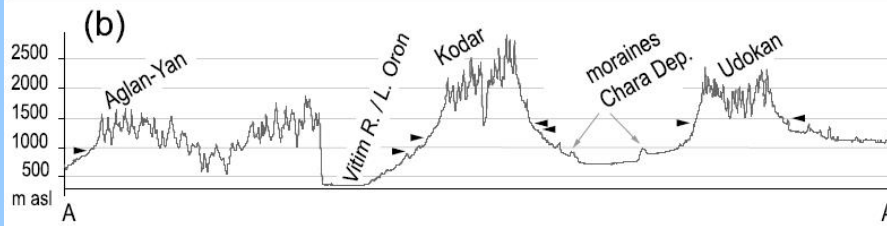
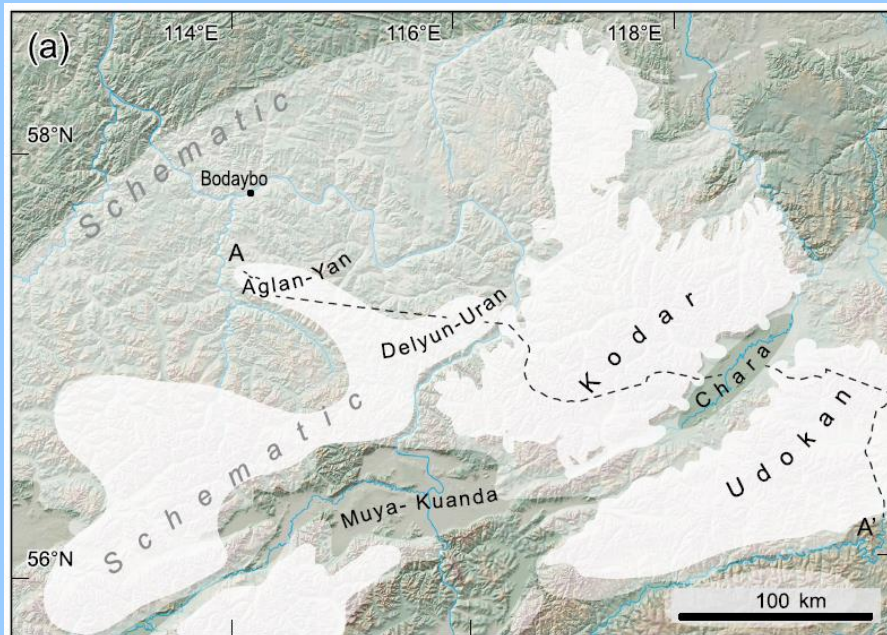


**Rozsah Eurosibiřského zalednění během MIS 4**



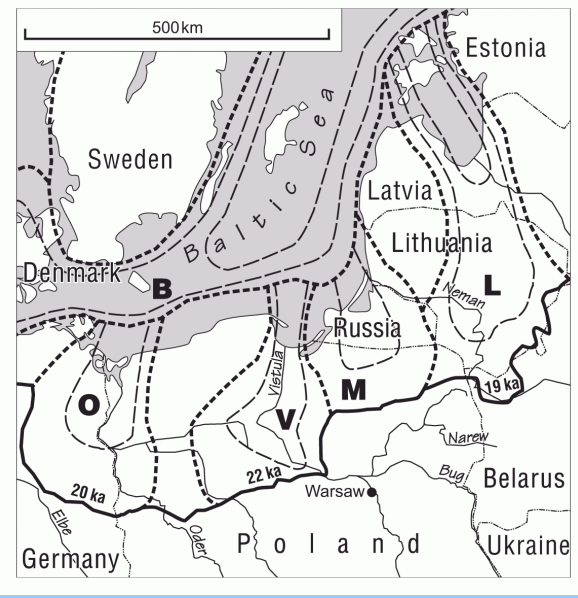
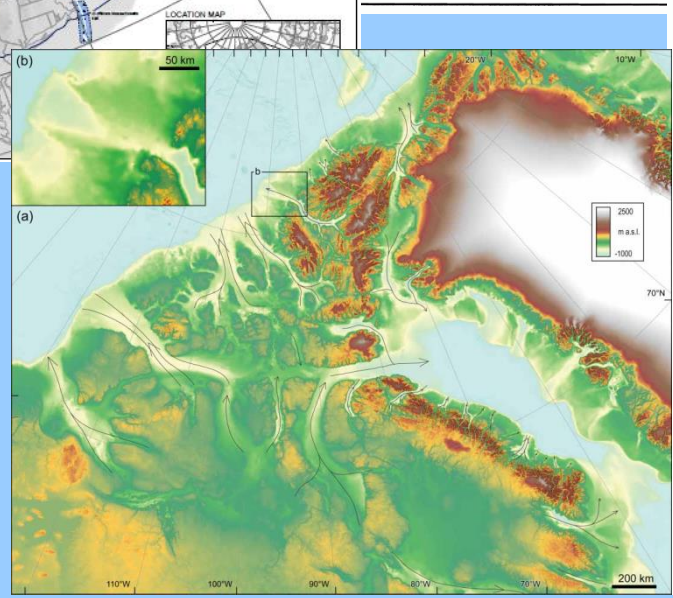
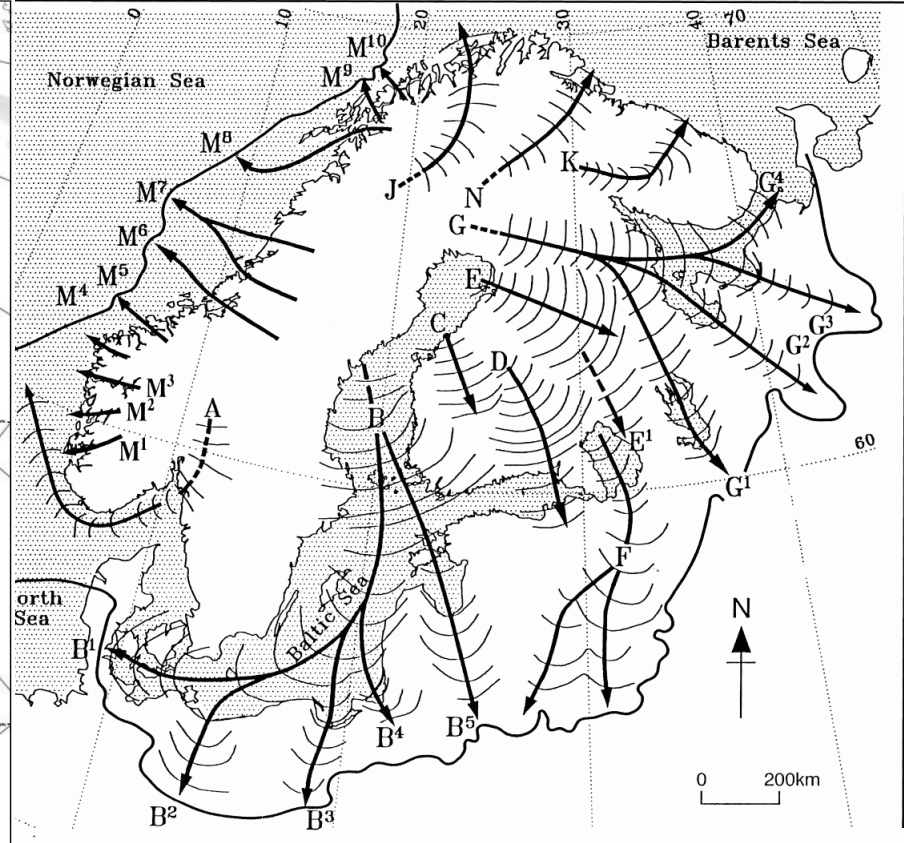
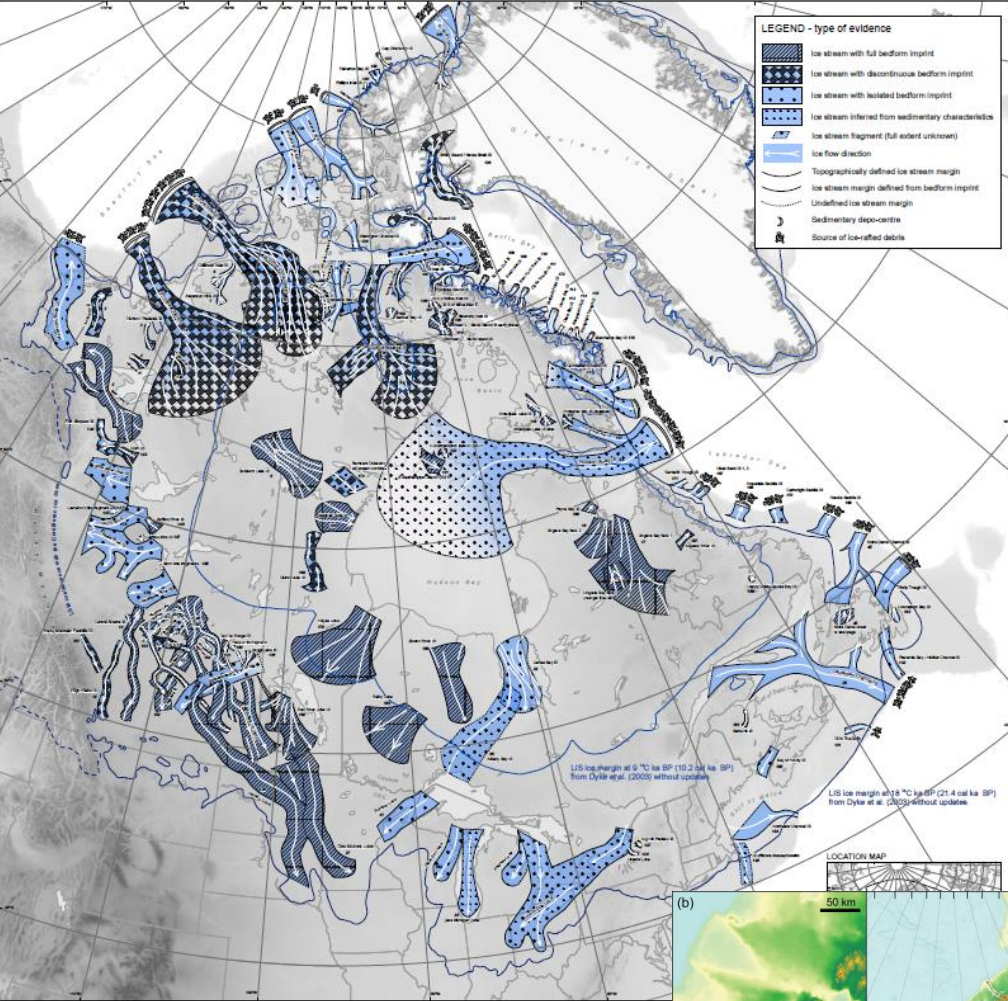
**Rozsah Eurosibiřského zalednění během LGM (MIS 2)**

# Rozsah zalednění na Sibiři a v Mongolsku

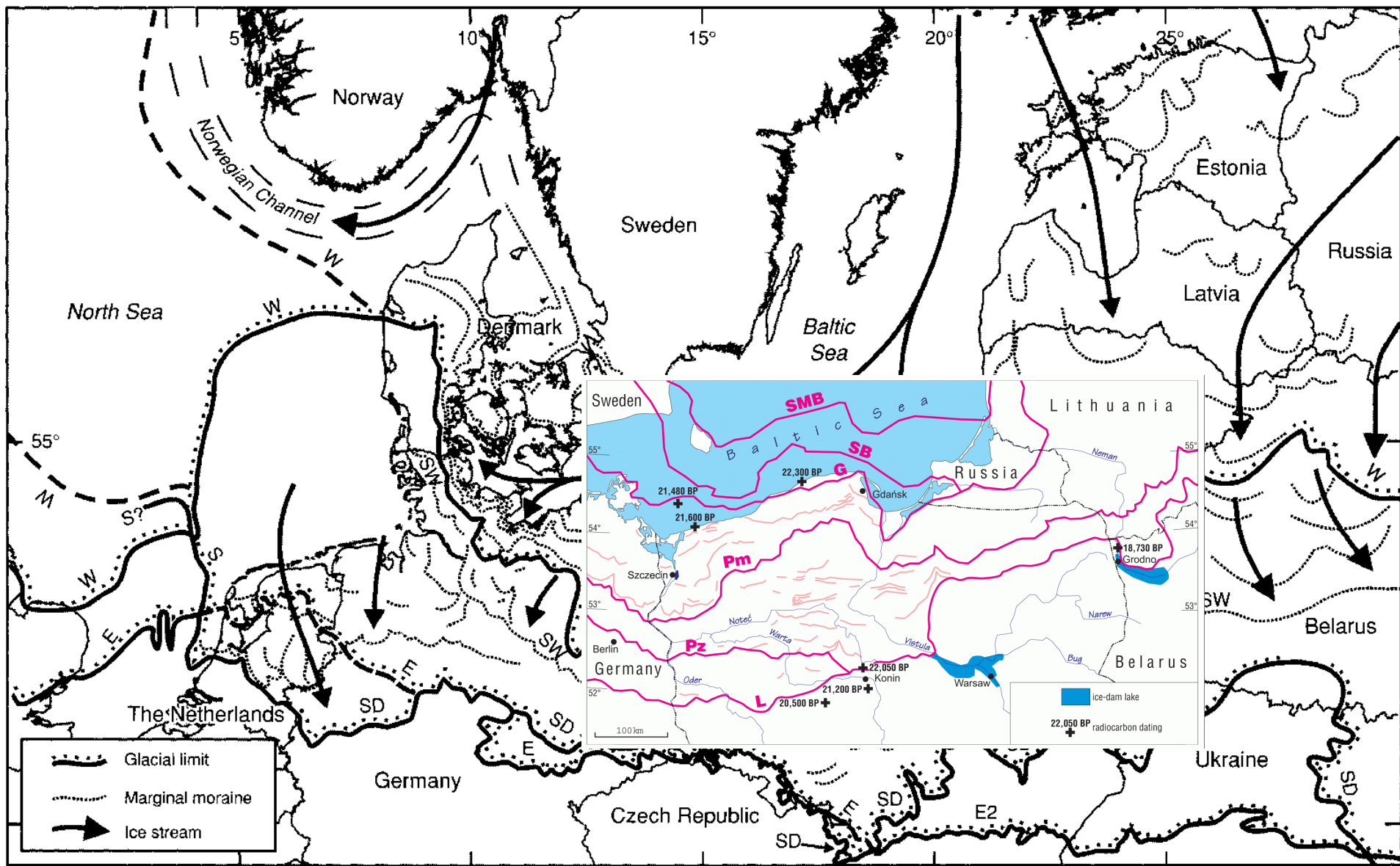


**...takhle nějak to vypadalo během vrcholu poslední doby ledové...**



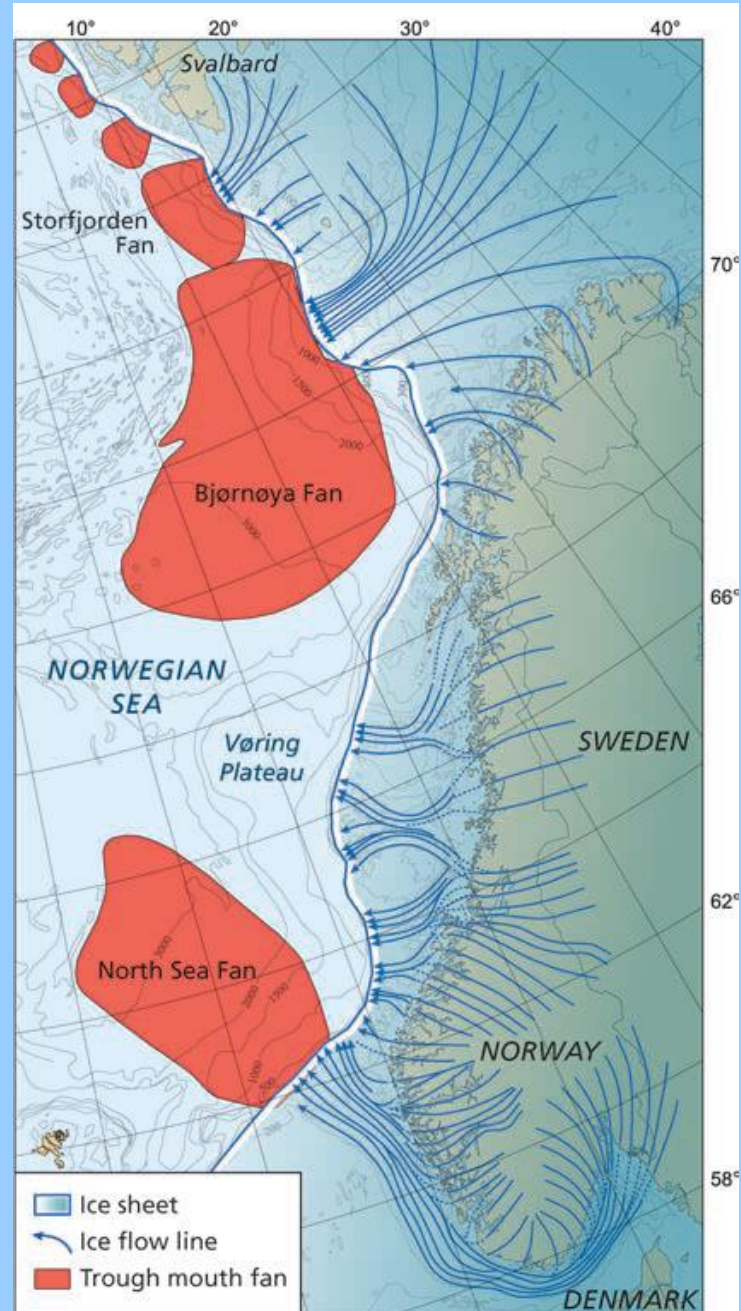
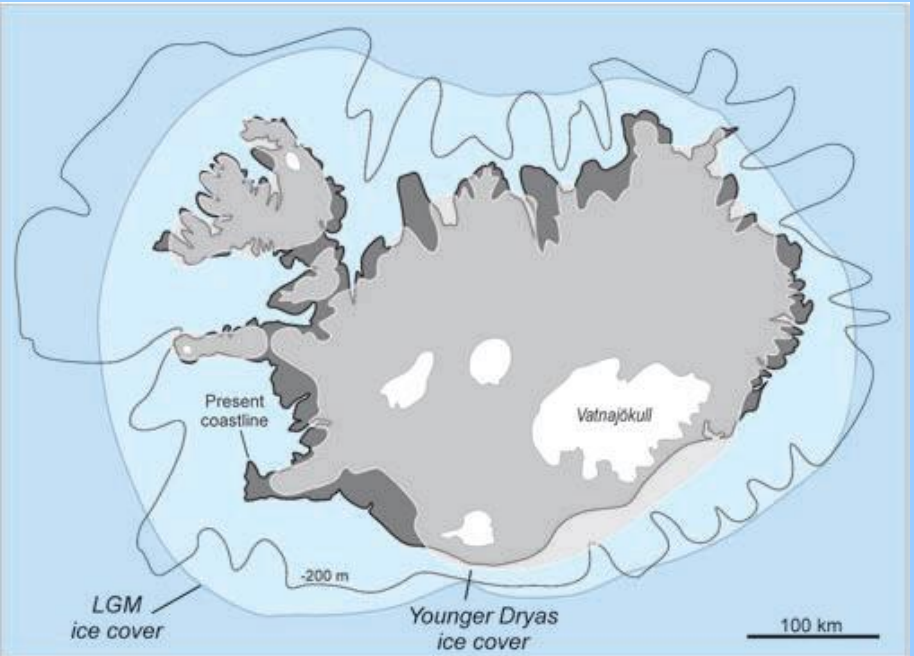
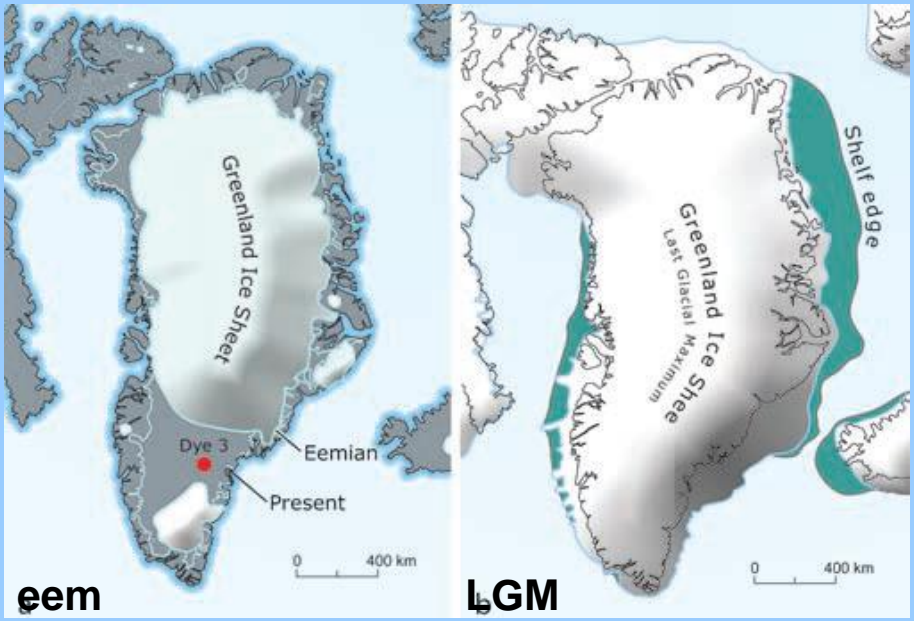


**Hlavní ledovcové proudy severoevropského a severoamerického ledovcového štítu během LGM**

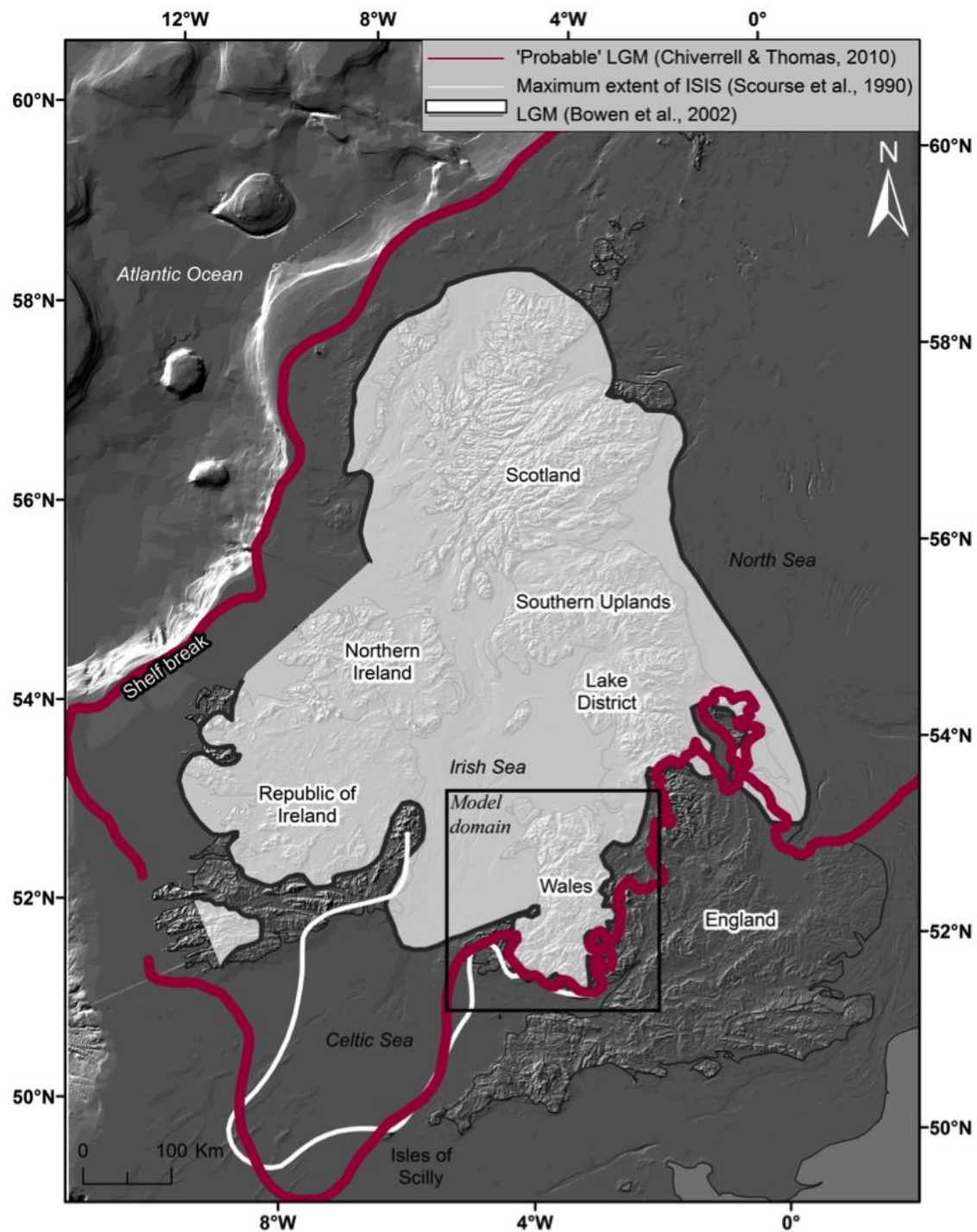


**Maximální rozsahy jednotlivých zalednění v Evropě**

# Peri-atlantský prostor během LGM (Grónsko, Island, podmořské vějíře)



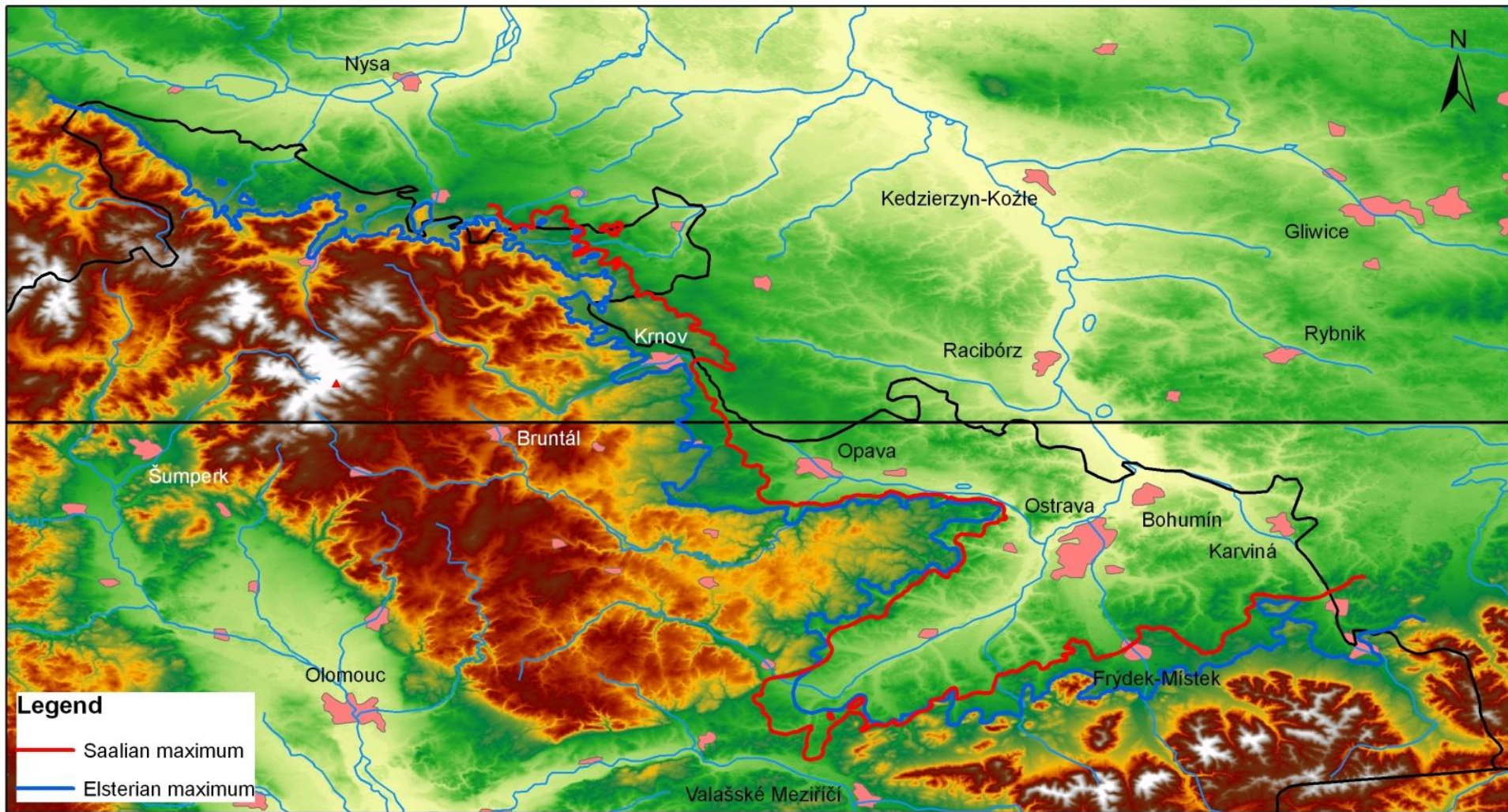
**Maximální rozsah  
devenského zalednění na  
Britských ostrovech**





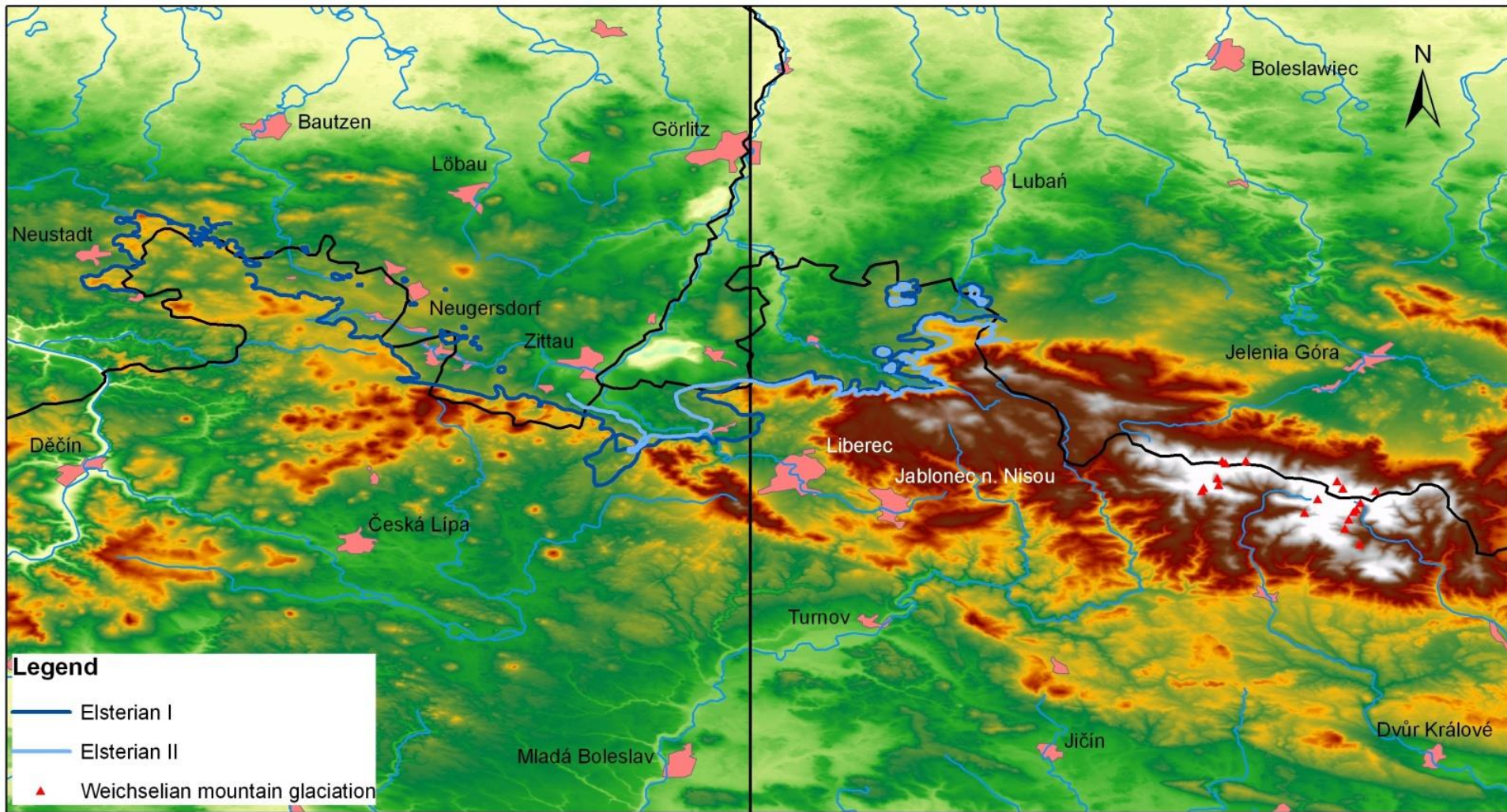
# Maximální rozsah kontinentálních zalednění v Česku (Nývlt et al., 2011)

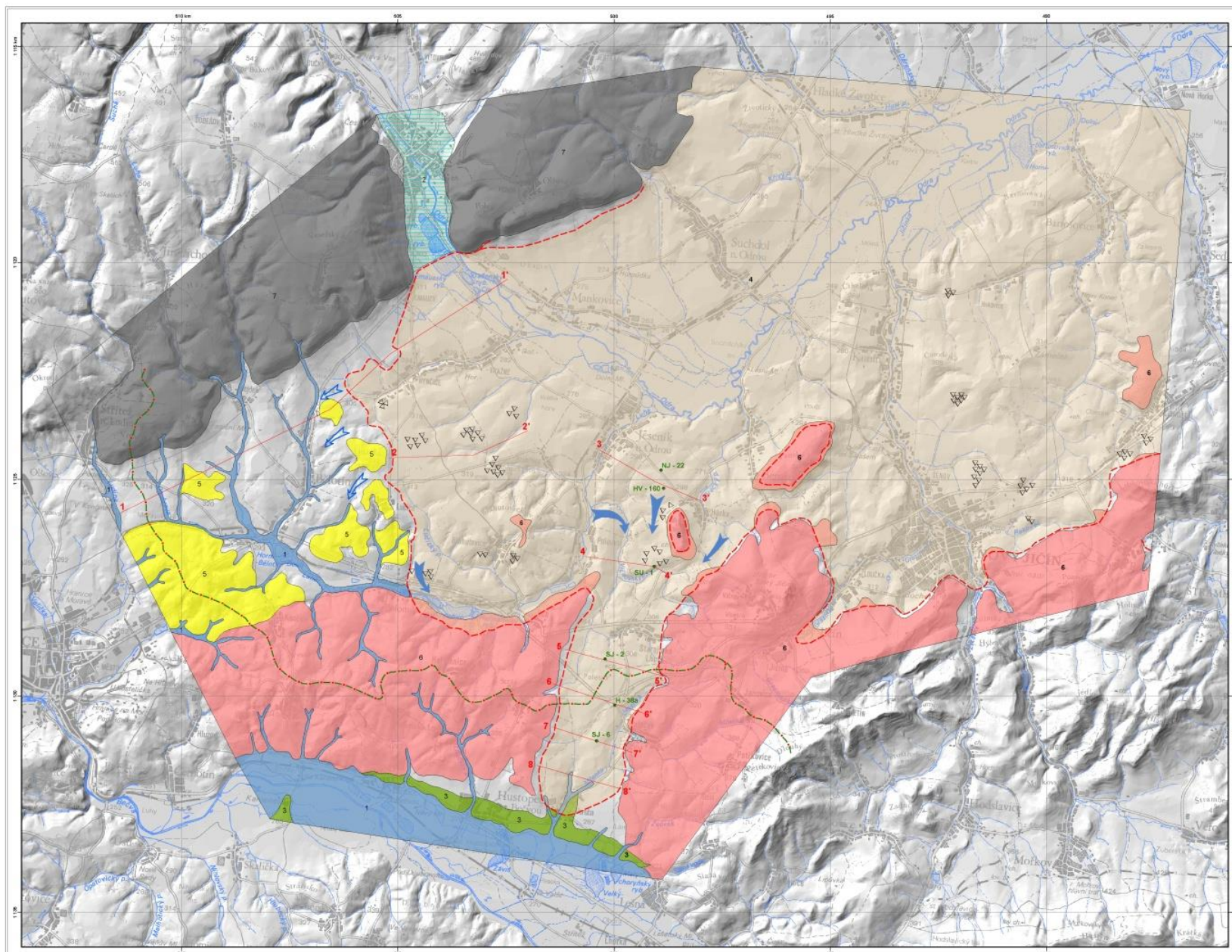
## Maximální rozsah kontinentálního zalednění na Moravě a ve Slezsku



# Maximální rozsah kontinentálních zalednění v Česku (Nývlt et al., 2011)

## Maximální rozsah kontinentálního zalednění v severních Čechách





- Legenda**
- 1 holocenní fluvialní sedimenty
  - 2 ledovcem hrazené jezero v Oděnské kotlině
  - 3 hlavní terasa
  - 4 ledovcové sedimenty
  - 5 neogén Karpatů předhlubně
  - 6 flyš Západních Karpat
  - 7 spodní karbon České masivu
  - ∇ ∇ ∇ stly
  - prokázaný směr odtoku tavných vod
  - teoreticky možný, avšak neprokázaný odtok tavných vod
  - hranice geologických jednotek
  - - - rozsah kontinentálního zalednění
  - hranice evropské rozvody
  - SJ-2 významné vřty
  - f' geologický řez

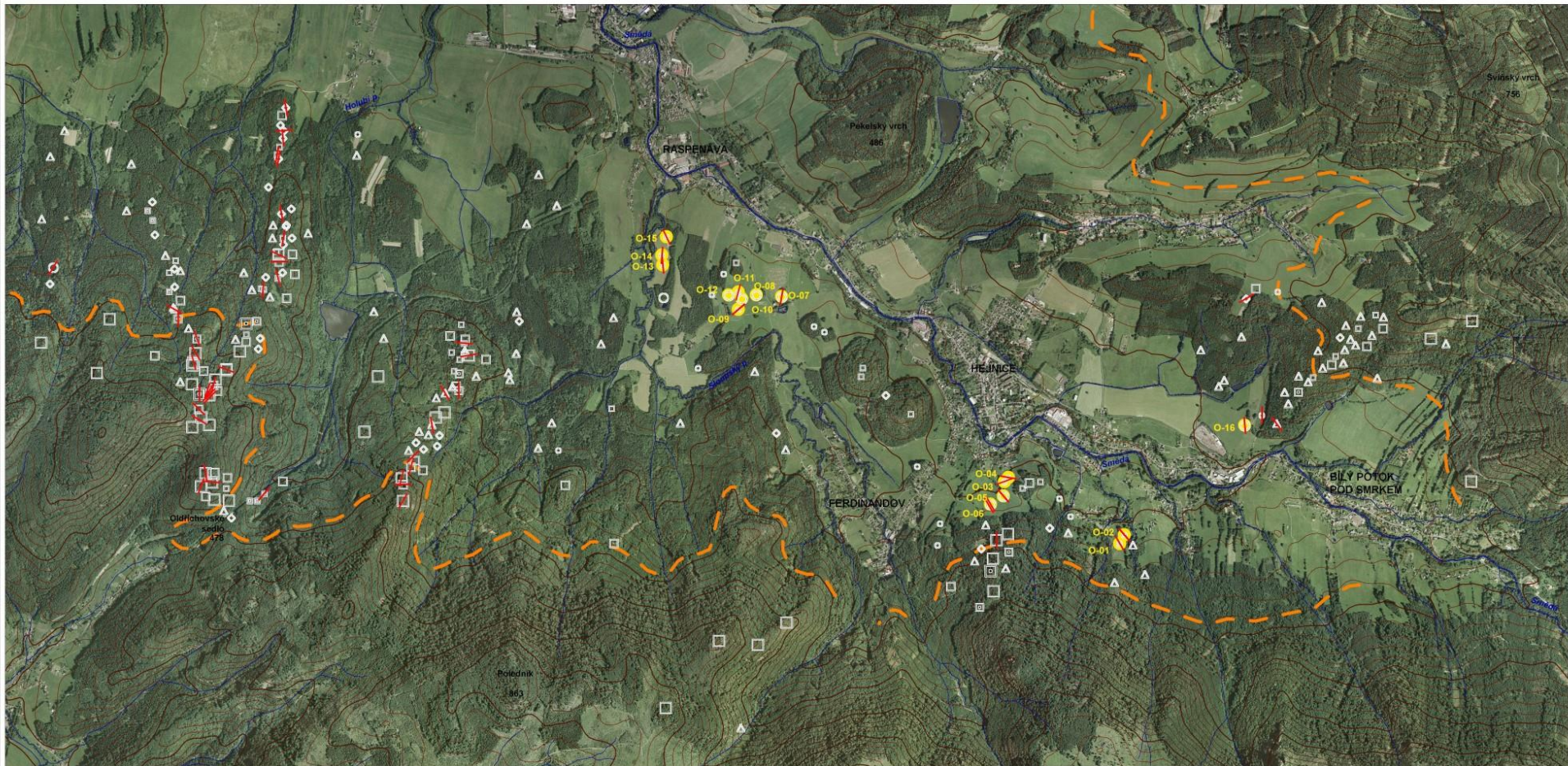
Autor: J. Týřáček  
 Vedoucí projektu: D. Nytl  
 Technický redaktor: M. Zemková  
 Originál zpracování: autor a středisko GIS a DŘ ČGS  
 1. vydání, 2007

1 : 50 000



Souřadnicový systém S-JTK. Křivkovo (obecně konformní) křivkovi  
 zobrazení. Besselova elipsoidu do roviny  
 Tato mapa je chráněna autorským právem. Veškeré reprodukce, přepracování  
 nebo digitizace mají být povoleny pouze s předchozím  
 písemným souhlasem České geologické služby  
 Tematický obsah: © Česká geologická služba  
 Mapový podklad: © Český úřad zeměměřičský a katastrální





LEGENDA

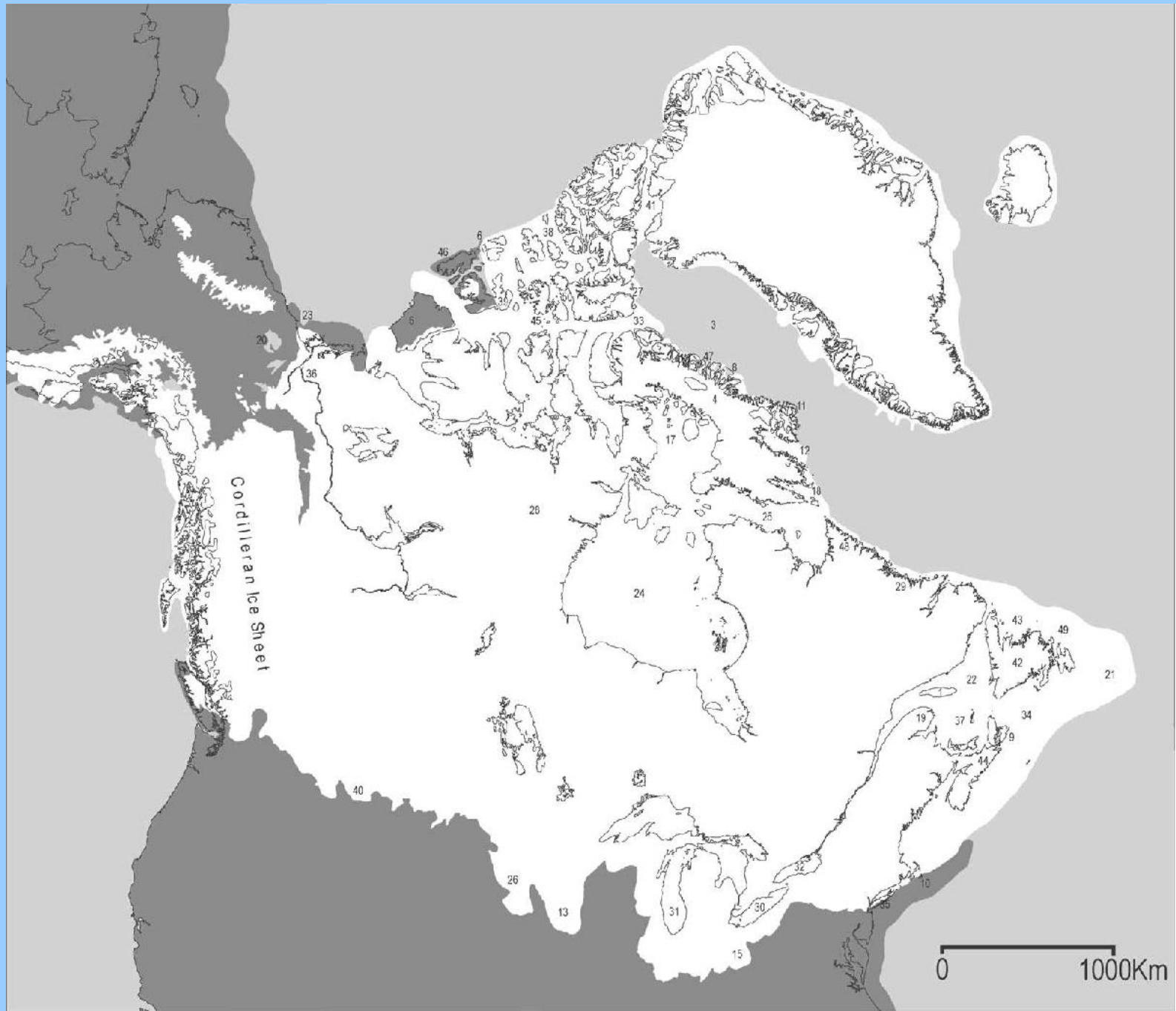
- VYSOKÉ TORÝ (VÝŠKA NAD 5 M)
- STŘEDNÍ TORÝ (VÝŠKA 3 AŽ 5 M)
- NÍZKÉ TORÝ (VÝŠKA DO 3 M)
- BALVANITÉ VÝCHOZY
- NÍZKÉ VÝCHOZY
- MRAZOVÉ SRUBY (VÝŠKA NAD 5 M)
- MRAZOVÉ SRUBY (VÝŠKA 3 AŽ 5 M)
- MRAZOVÉ SRUBY (VÝŠKA DO 3 M)
- MALÉ OBLÍKY (VÝŠKA DO 2 M)
- OBLÍKY (VÝŠKA NAD 2 M)

- SMĚRY PROTAŽENÍ SKALNÍCH VÝCHOZŮ
- OBLÍKY, NA KTERÝCH BYLA PROVEDENA MĚŘENÍ SMĚRŮ PUKLIN A SKLONŮ
- NÁZVY OBLÍKŮ S PROVEDENÝM MĚŘENÍM
- HRANICE ZÁSAHU KONTINENTÁLNÍHO ZALEDNĚNÍ PODLE VÝSLEDKŮ TVRDOMĚRNÝCH MĚŘENÍ A ANALÝZ VLASTNOSTI VÝCHOZŮ
- VODNÍ TOKY
- VRSTEVNICE PO 20 M
- VRSTEVNICE PO 100 M

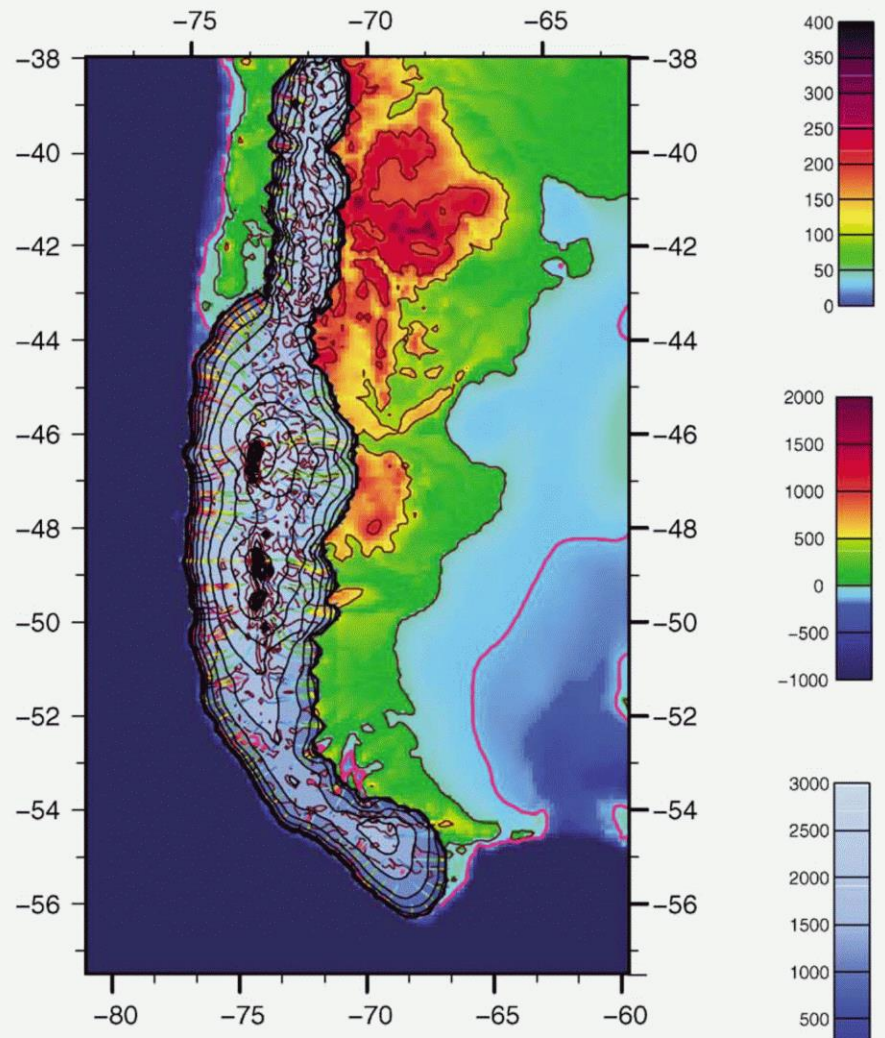


1 : 20 000

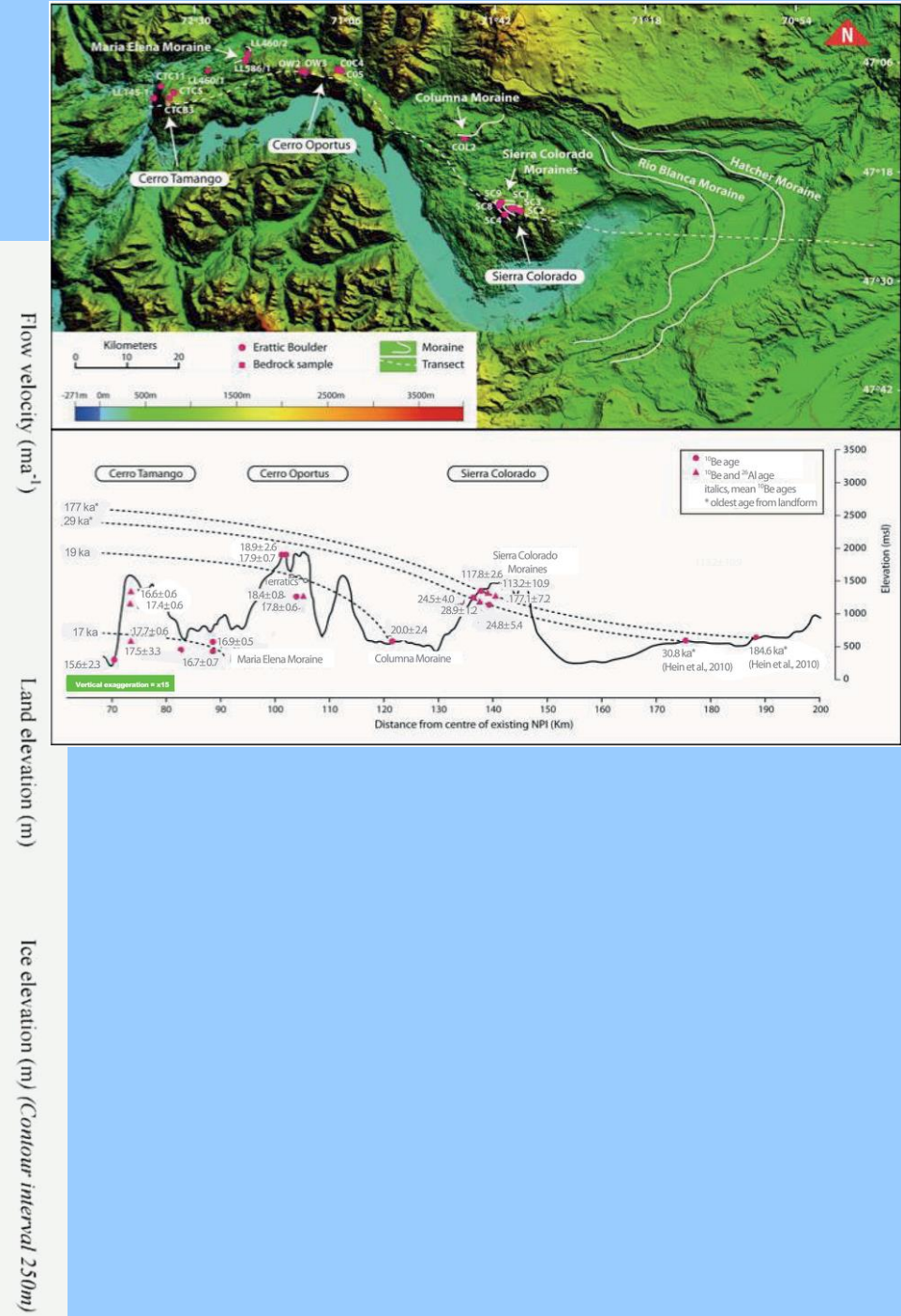
# Maximální rozsah wisconsinského zalednění v Severní Americe



# Maximální rozsah během LGM v oblasti Patagónského ledovcového štítu



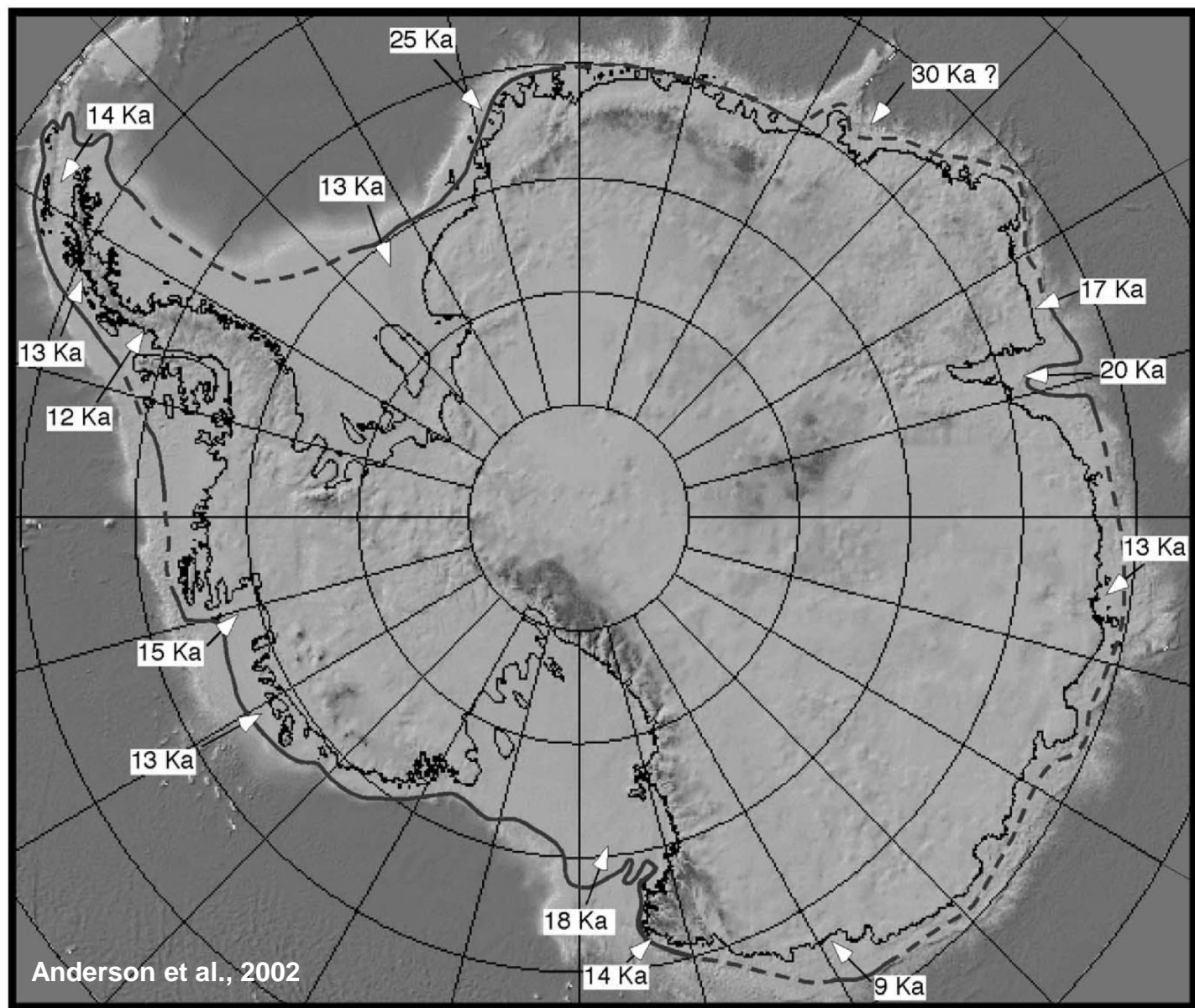
(a)



## Rozsah Antarktického ledovcového štítu během LGM a počátek ústupu jeho okraje

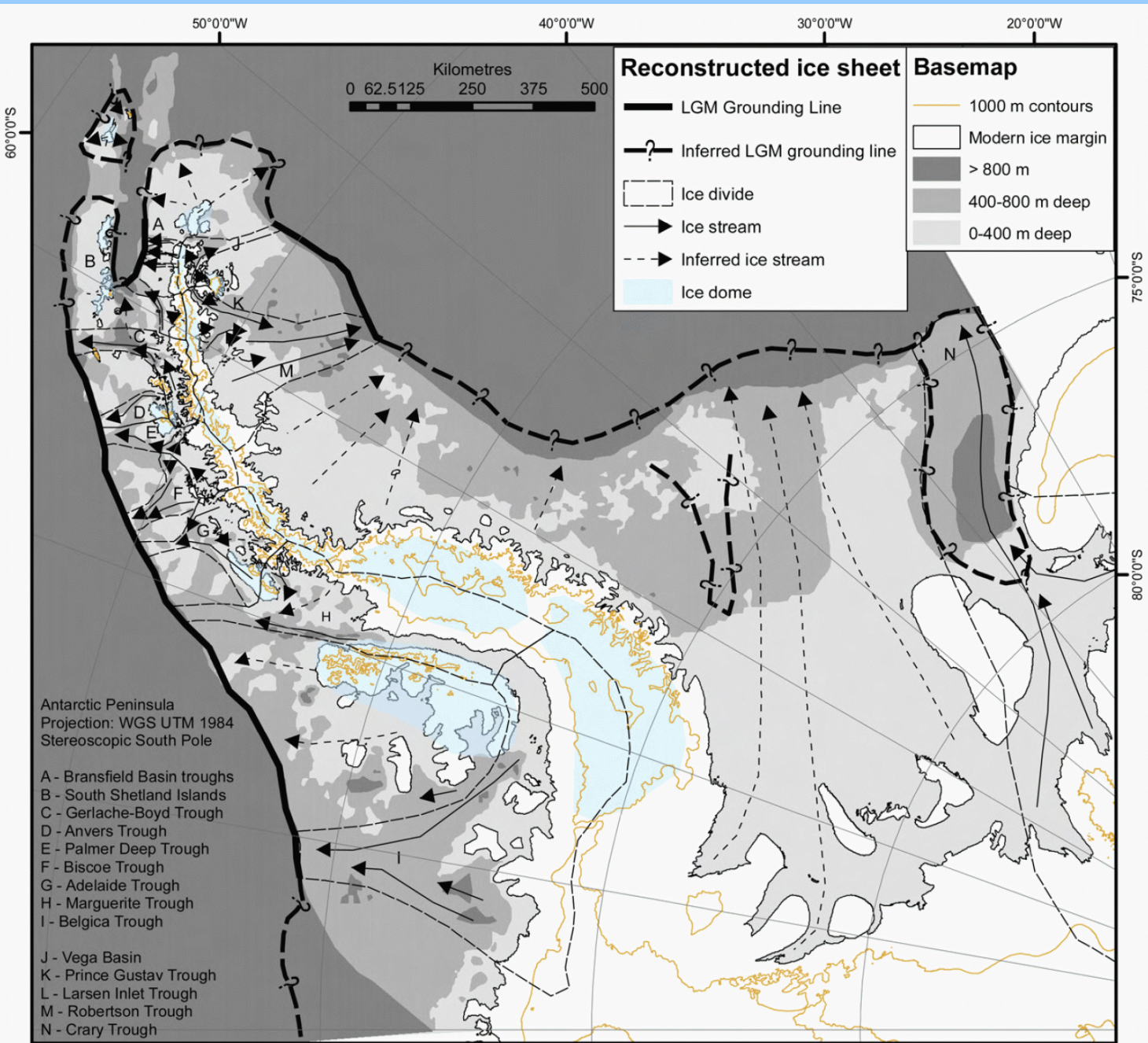
Během glaciálů zasahoval **Antarktický ledovcový štít** až k okrajům pevninského šelfu, hladina světového oceánu byla o 120–160 m níže než dnes. S nárůstem mořské hladiny v důsledku tání nejen Antarktického ledovce, ale

především ledovců na severní polokouli se na sklonku každého glaciálu (v pozdním glaciálu pro poslední klimatický cyklus) tyto **pozemní ledovcové splazy** změnily v oblastech šelfů na **plovoucí šelfové ledovce**.





# Rozsah APIS během posledního glaciálního maxima (LGM)

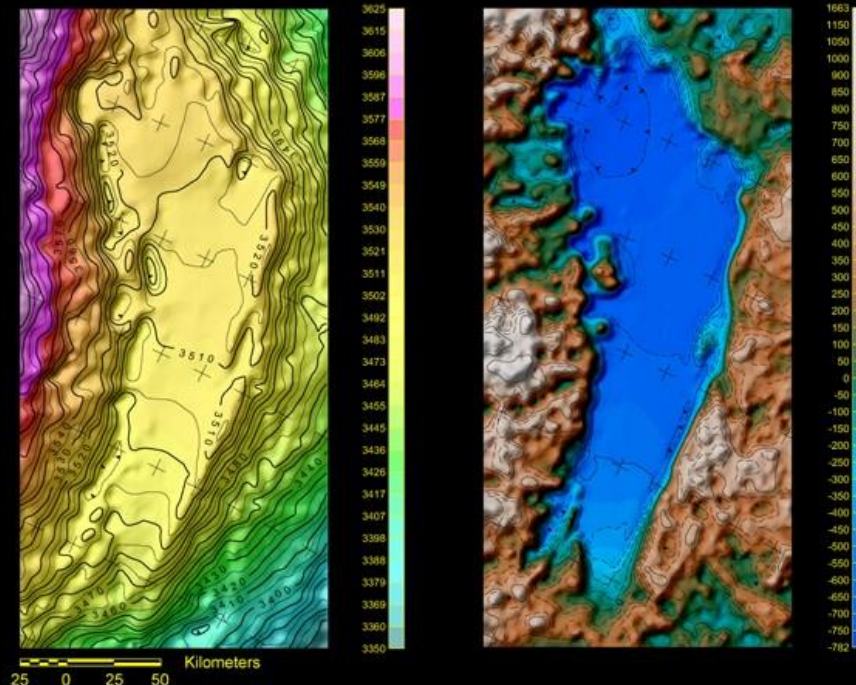
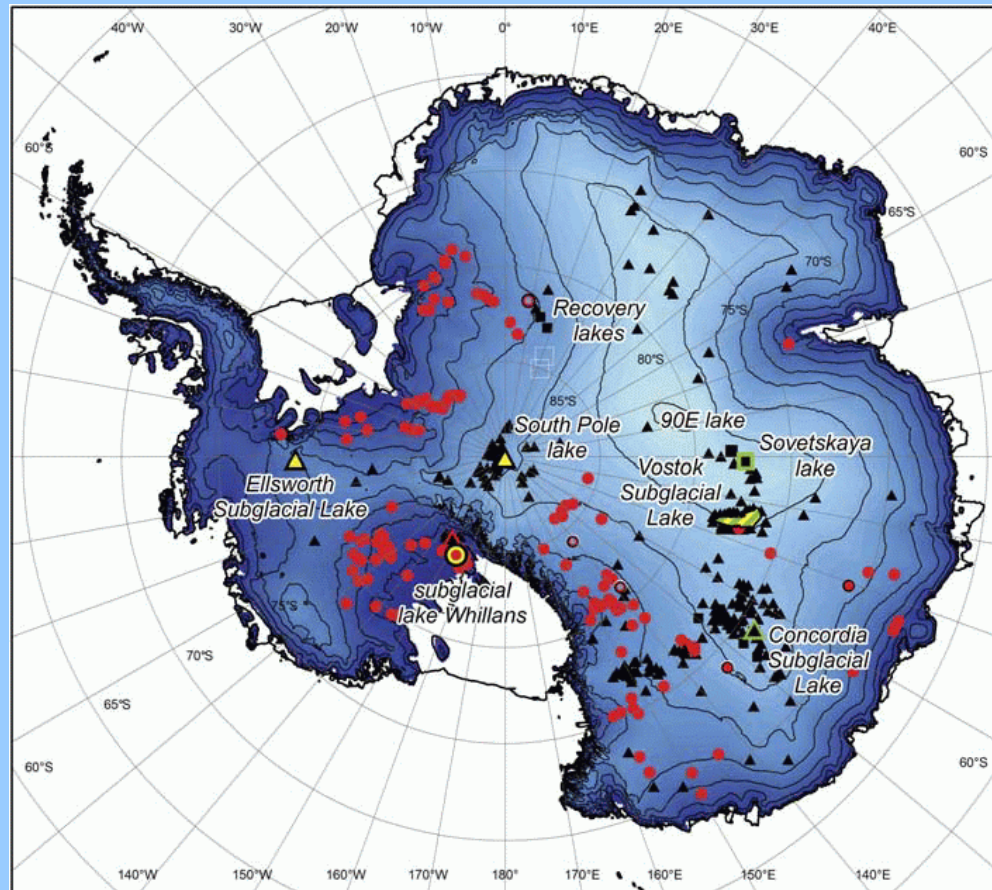


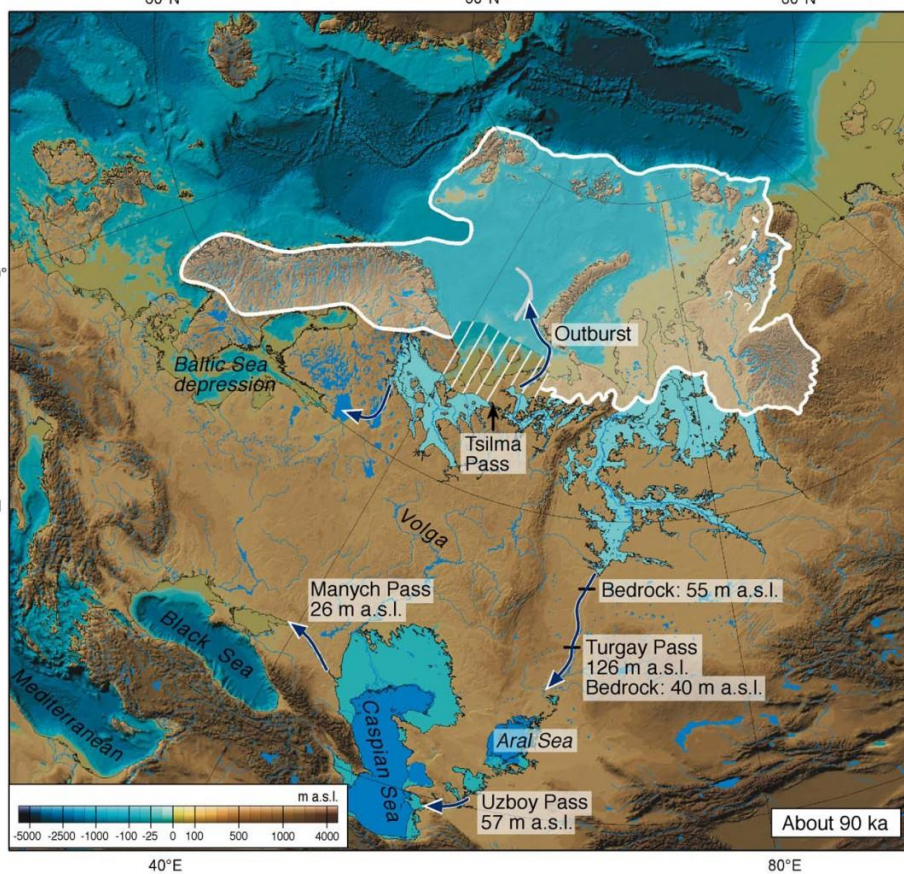
- jednotlivé ledovcové proudy stékaly z centrální části;
- grounding line se nacházela poblíž hrany kontinentálního šelfu;
- počátek ústupu APIS z vnějšího pevninského šelfu SZ Weddellova moře je datován na ~18–19 ka BP
- i na okolních ostrovech (např. JRI) ležely ledovcové čapky

# Subglaciální a hrazená proglaciální jezera

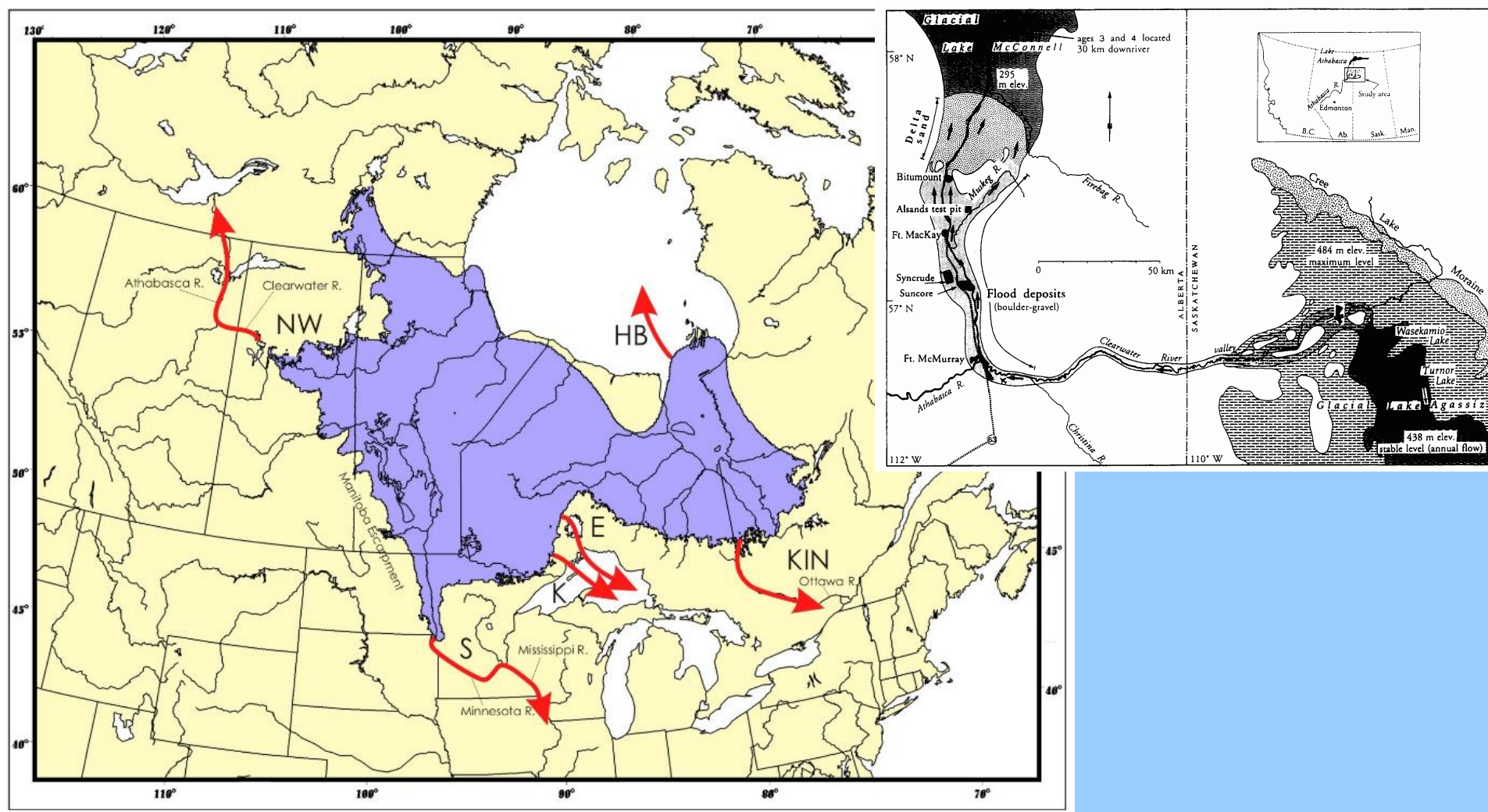
Dnes je např. z Antarktidy známo téměř **400 subglaciálních jezer**. Všechna se nacházejí poblíž rozledí. Obdobná jezera existovala během glaciálů pod Severoamerickým, Severoevropským i Západosibiřským ledovcovým štítem. Před čely kontinentálních ledovců se tvořila rozsáhlá ledovcem hrazená proglaciální jezera.

Největším subglaciálním jezerem je **jezero Vostok s rozměry ~250 x 50 km a plochou 15.690 km<sup>2</sup>**. Leží prakticky pod ruskou stanicí Vostok pod ~4 km ledu. Maximální hloubka vody v jezeře je ~800 m a odhadnutý objem zadržované vody je ~5.400 km<sup>3</sup>.



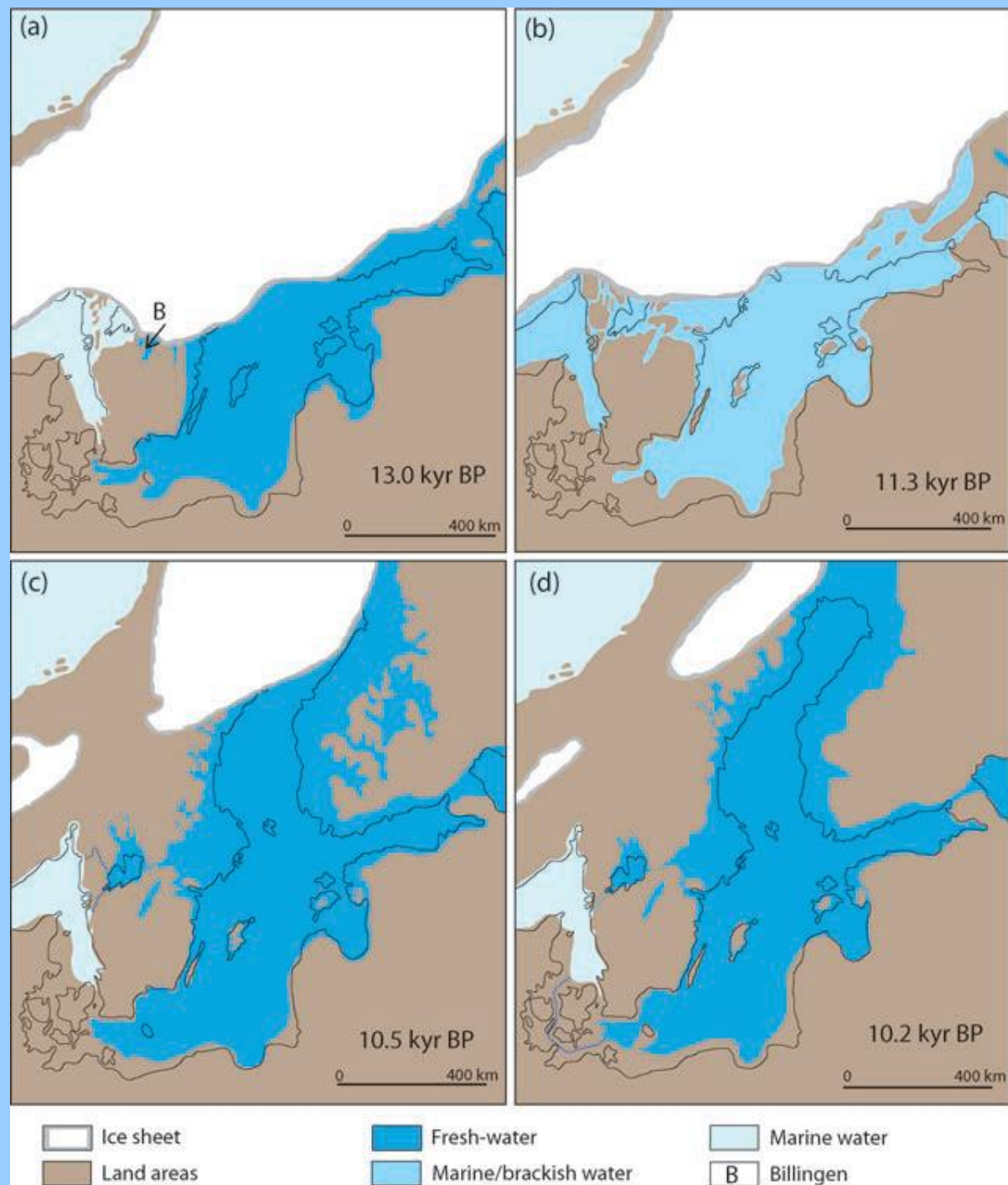


Vývoj systému **proglaciálních a subglaciálních jezer** vázaných na Euroasijský ledovcový štít během posledního glaciálu (90–20 ka BP)



Ledovcová jezera **Agassiz-Ojibway** (až 285.000 km<sup>2</sup>) a **McConnell** (až 215.000 km<sup>2</sup>) vzniklá během Termination I (13,5–8,5 ka BP) odtáváním Laurentinského ledovcového štítu

# Ústup ledovců, vznik hrazených ledovcových jezer ve Skandinávii a vývoj Baltu během termination I

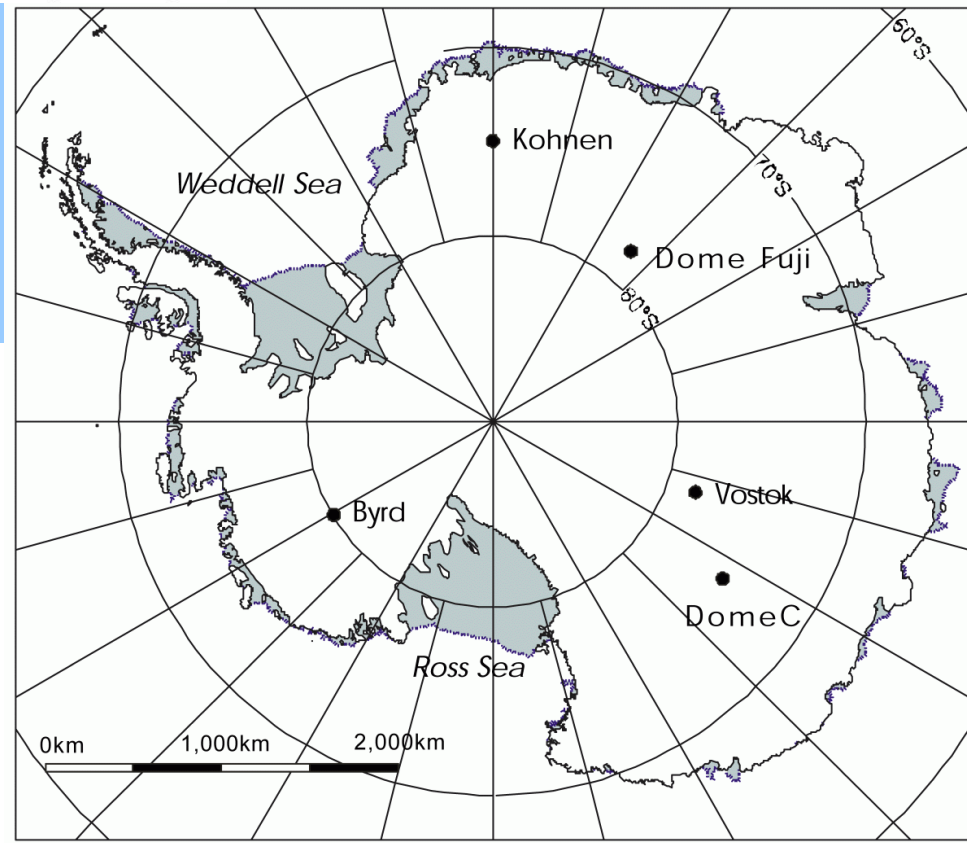
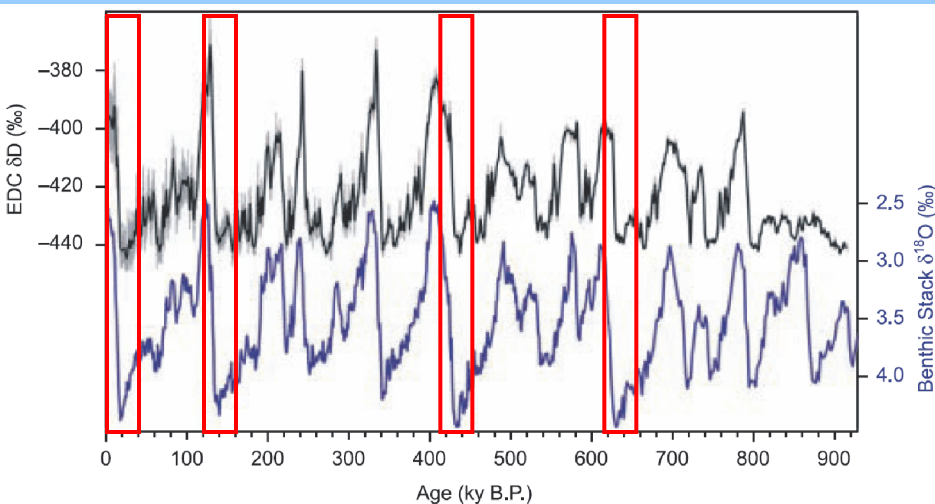
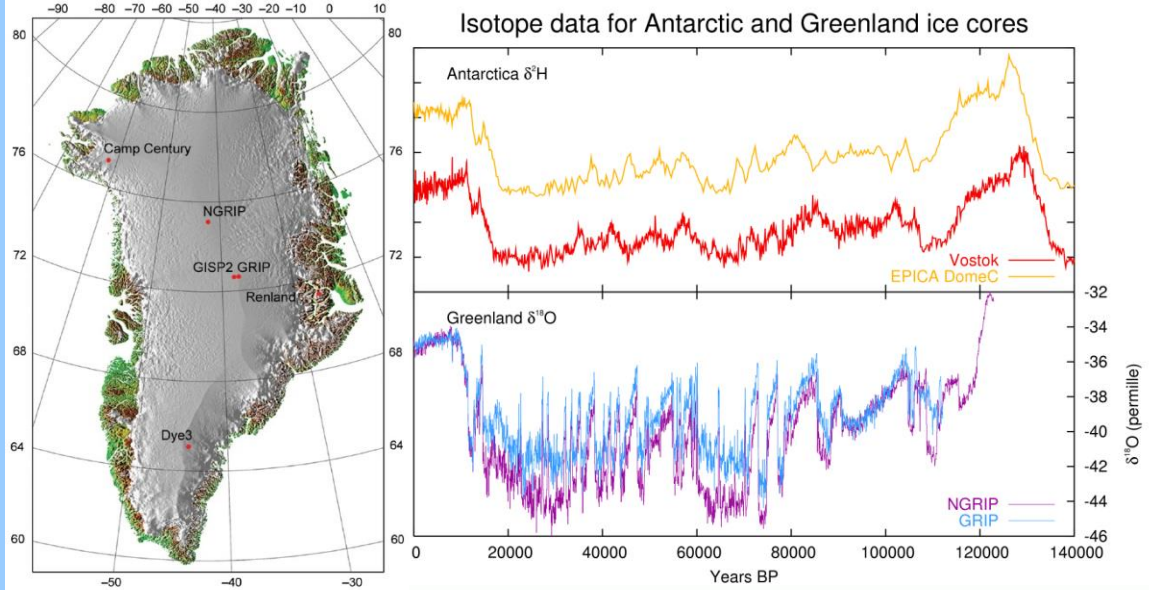


# Vývoj zalednění – kvartér

**Grónsko** – GRIP, GISP2, NGRIP

**Antarktida** – Vostok, Dome Fuji, Dome C (EPICA-EDC – European Project for Ice Coring in Antarctica) – 3260 m, >900 ka

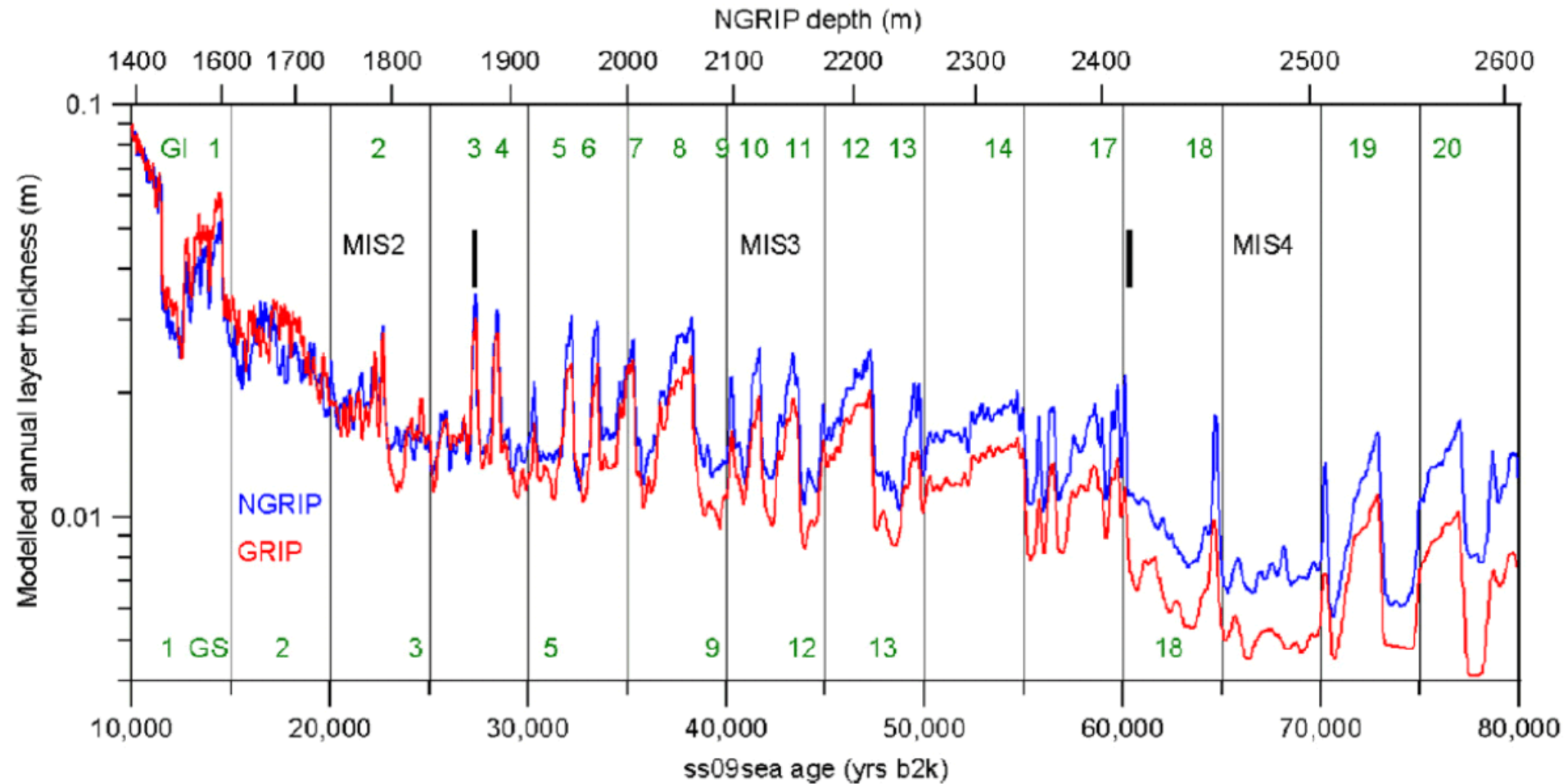
**Hlavní globální zalednění:**  
**MIS 2** (~20 ka BP), **6** (~140 ka BP),  
**12** (~435 ka BP), **16** (~630 ka BP)



# Vývoj zalednění – poslední glaciálně-interglaciální cyklus

## Grónsko (GRIP, NGRIP)

Definovány **Greenland stadials (GS) / interstadials (GI)** – dříve *Dansgaard-Oeschger events*



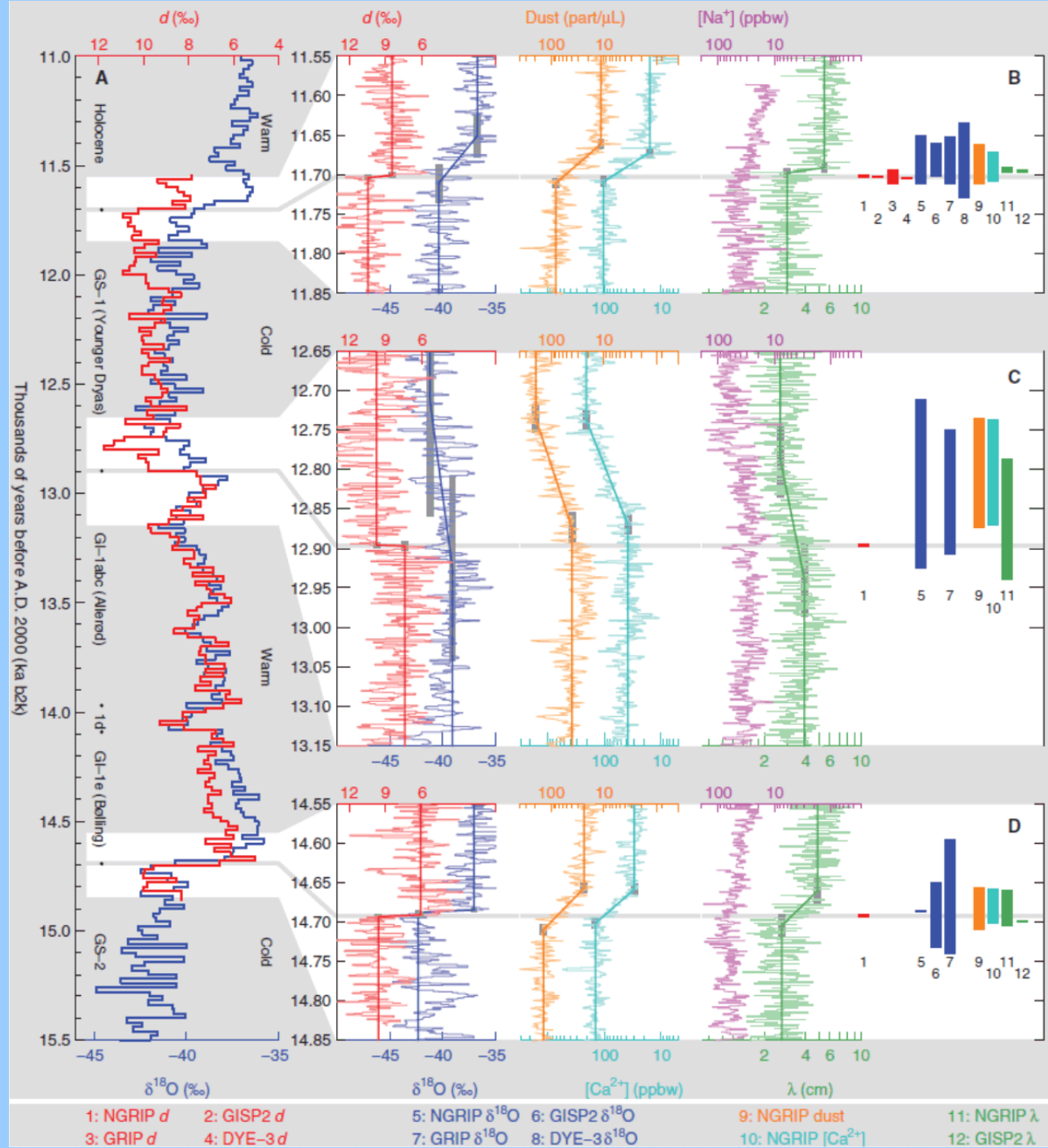
# Grónsko (NGRIP)

## deuterium excess –

Izotopický parametr druhého řádu podávající informaci o frakcionačním efektu v důsledku výparu zdrojové vody, který nejrychleji reaguje na změny (během 2–5 let!).

$$d (\text{‰}) = \delta D - 8 * \delta^{18}O$$

Nadbytku deuteria lze použít jako proxy pro povrchovou teplotu oceánu (SST), odkud se odpařovala zkoumaná voda (severní Atlantik) a ukazuje tak na změny Severoatlantské oscilace (NAO), která přímo souvisí se SST a atmosférickou vlhkostí.



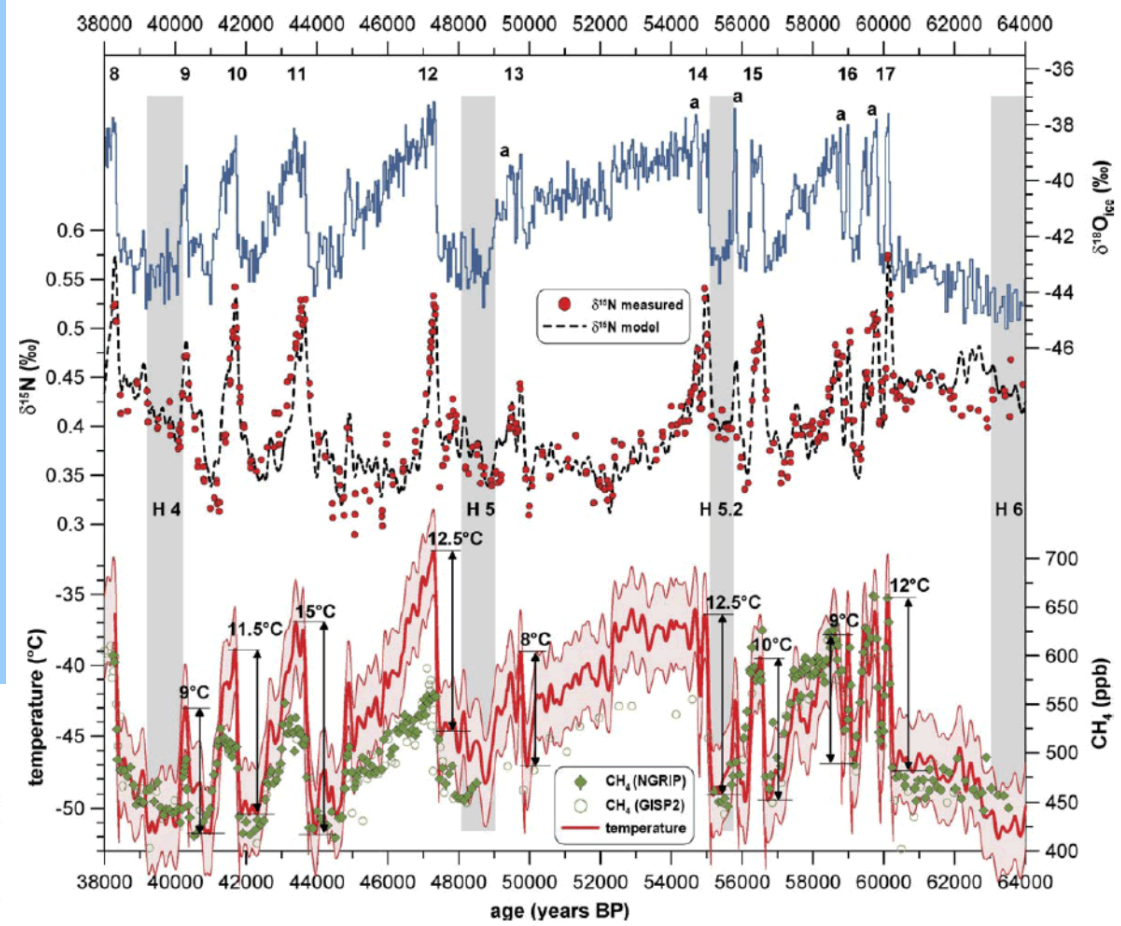
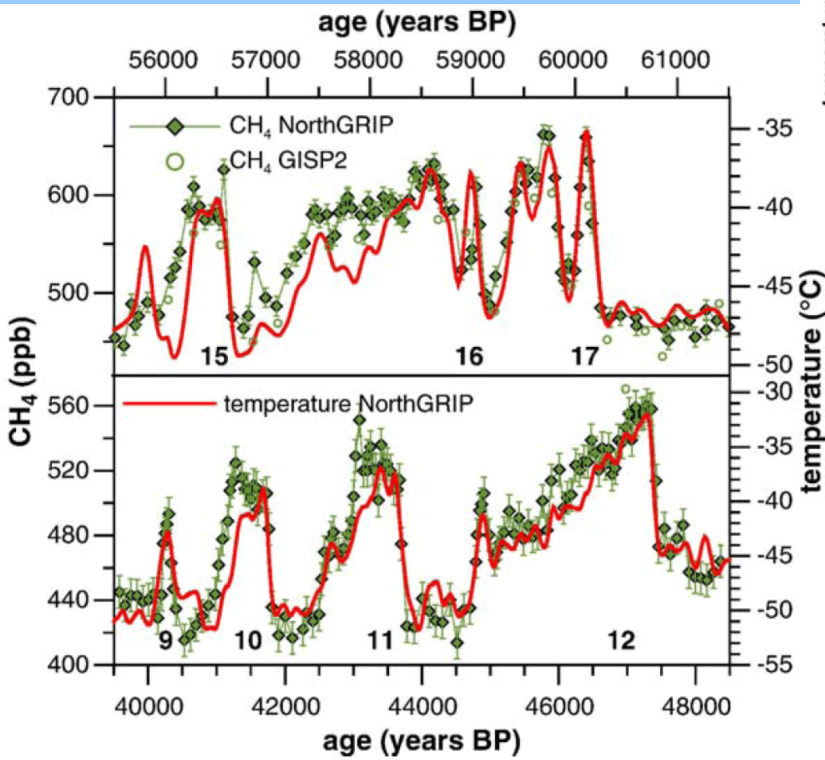


# Grónsko (GISP2, NGRIP)

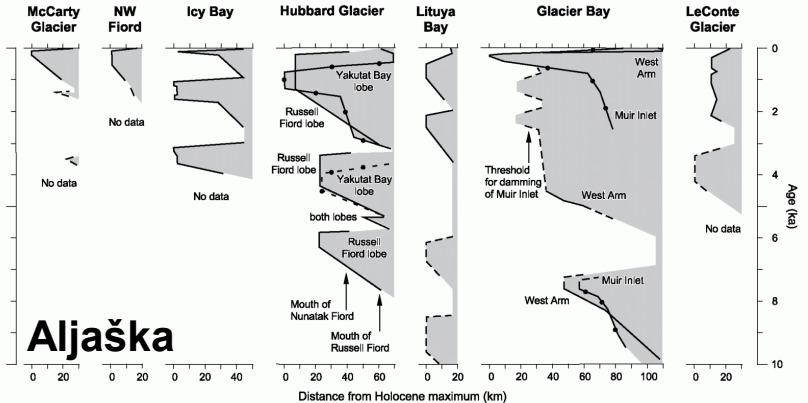
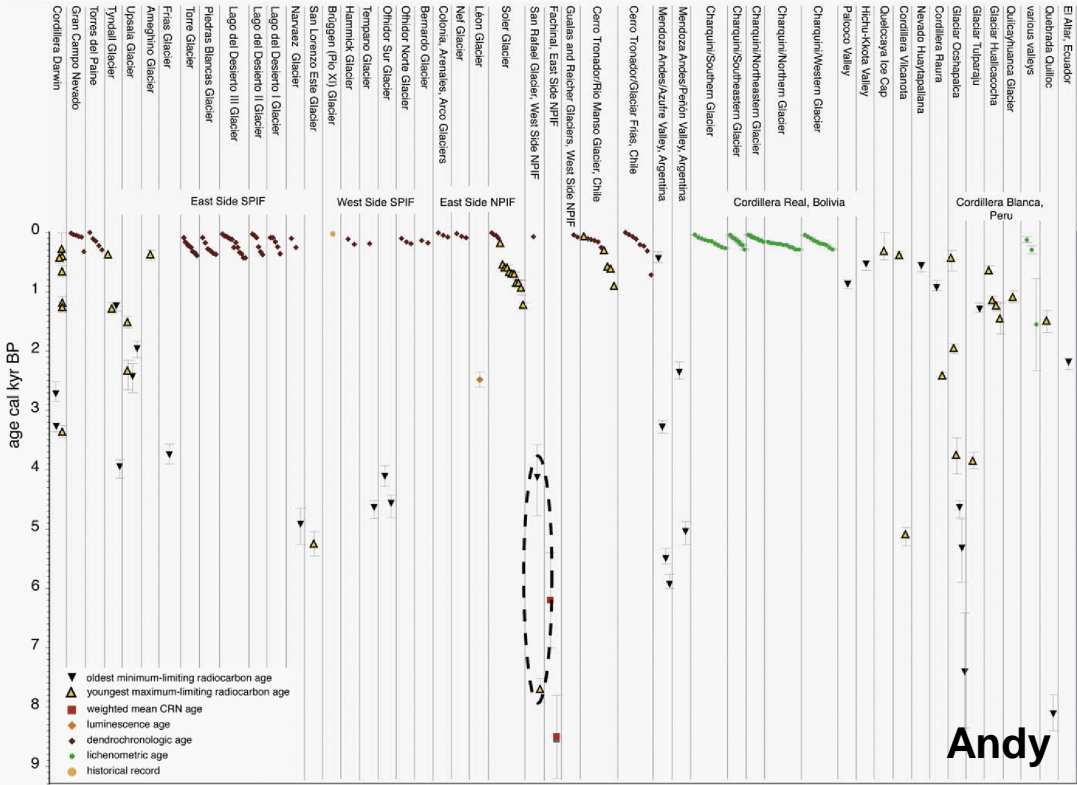
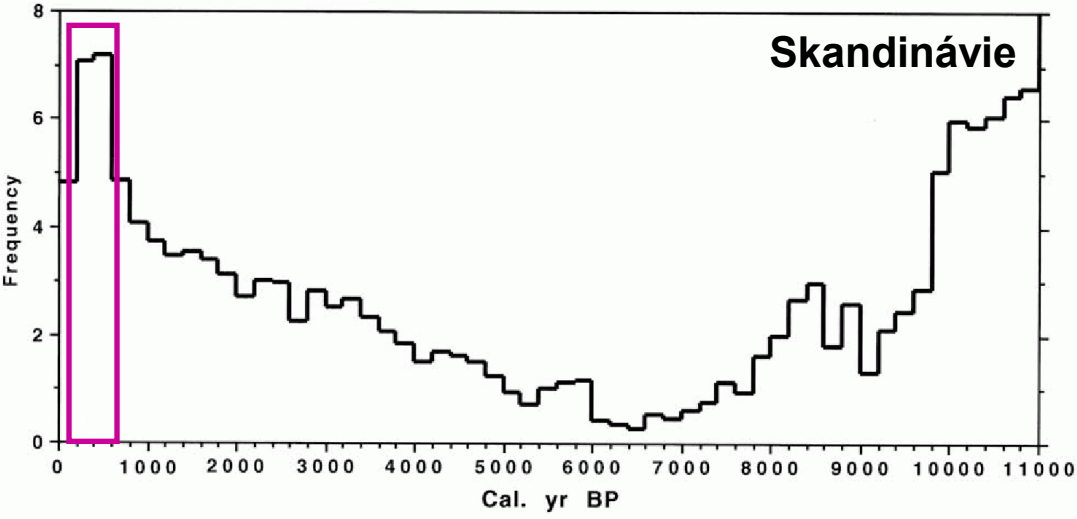
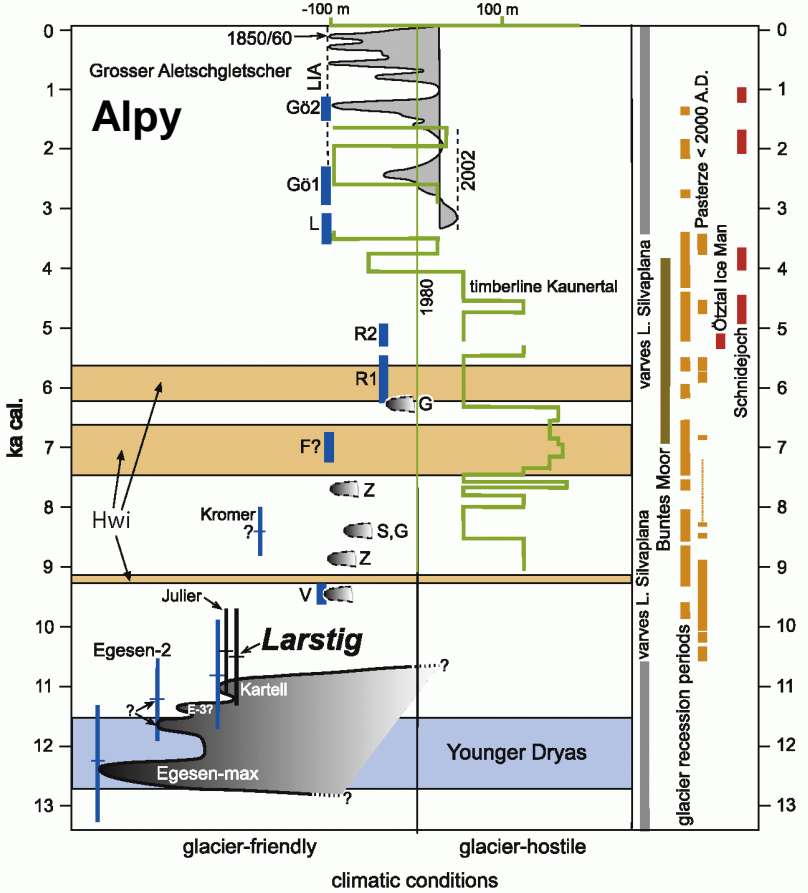
## výpočet paleoteplot

CH<sub>4</sub> – rozdíly teplot během GS/GI transition o 8–15 °C, které trvají obvykle desítky let až max. 200 let.

Nárůst teploty je 0,2–1,2 °C/10 let (průměr 0,5 ± 0,1 °C/10 let) !!!!!



# Neoglaciální postupy ledovců v různých částech světa



Andy

# Současné změny ledovců v různých částech světa

- ústupy horských ledovců (až na výjimky),
- zrychlování pohybu ledovcových proudů hlavně v Grónském ledovcovém štítu a ve WAIS → rychlý odnos ledovcové hmoty k okrajům,
- úbytky šelfových ledovců kolem Antarktického poloostrova,
- zmenšování plochy mořského ledu v Arktidě a kolem Antarktického poloostrova, naopak mírný nárůst podél Východní Antarktidy.

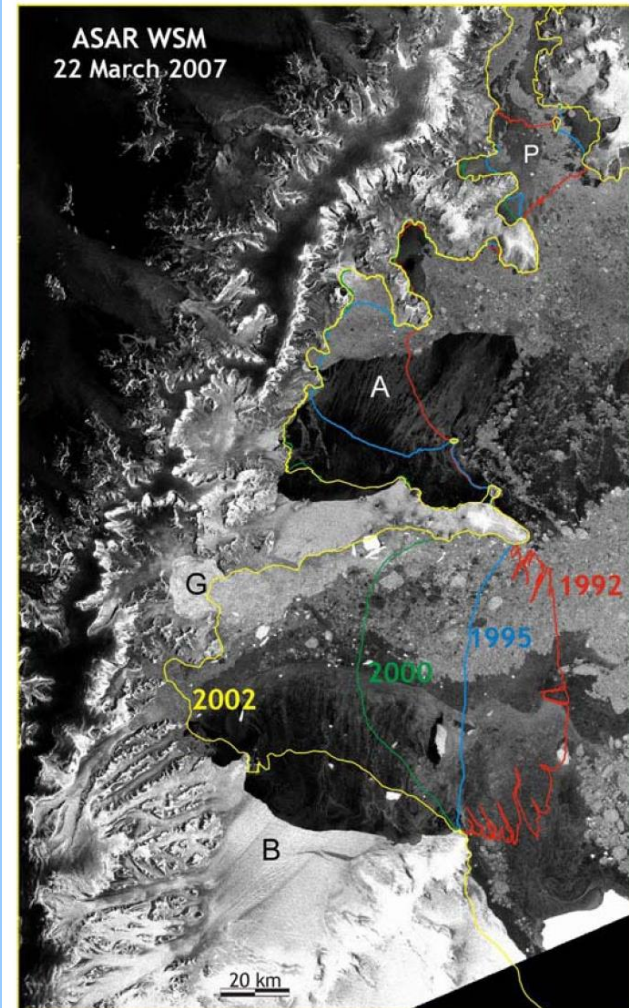
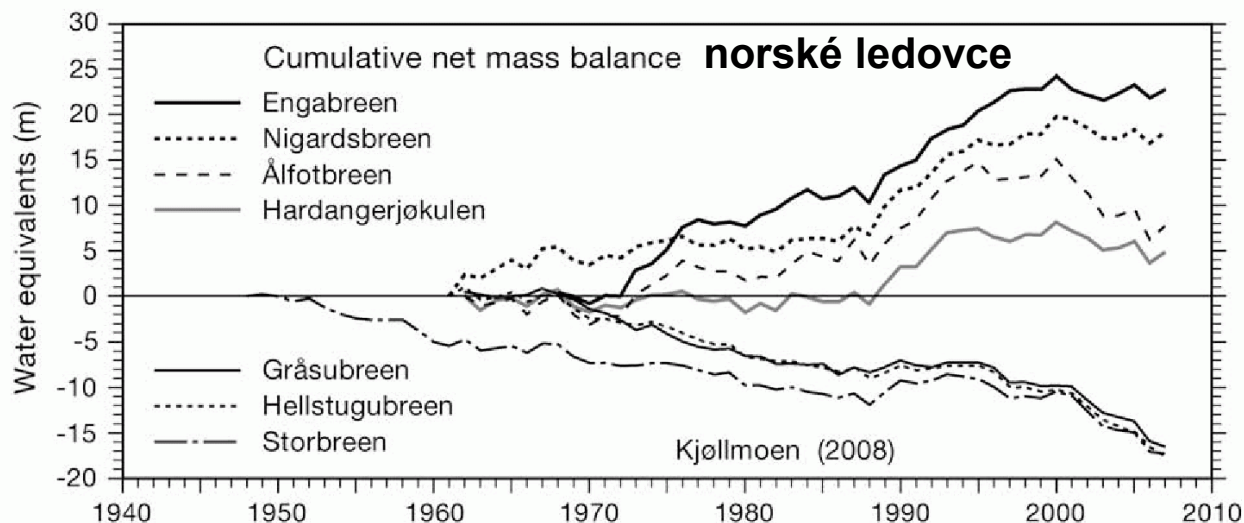


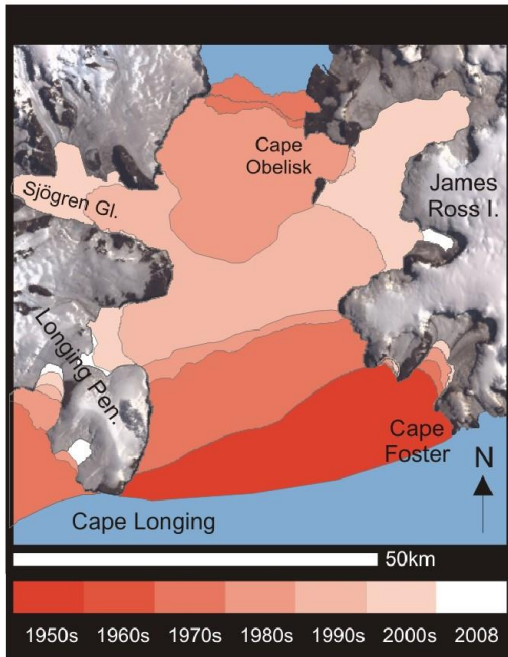
Figure 1. Envisat ASAR Wide Swath image of the northern Larsen Ice Shelf, 22 March 2007. Previous ice shelves: P – Prince Gustav Channel; A – Larsen A. B – remnant of Larsen B. G – bay of Hektor-Green-Evans glaciers. Red, blue, green, yellow line: Ice edge on 8 Dec. 1992, 30 Jan. 1995, 6 Oct. 2000, 18 March 2002.

TABLE I. Decrease of Larsen B ice shelf area

Date	Area km <sup>2</sup>	Image source
25 January 1995	11512	ERS SAR
30 January 1995	9192	ERS SAR
4 February 2002	6664	ERS SAR
6 March 2002	3887	Envisat ASAR
13 February 2004	3463	Envisat ASAR
6 March 2002	2633	Envisat ASAR
22 March 2007	1403	Envisat ASAR

# Rozpady šelfových ledovců na v. pobřeží Antarktického poloostrova

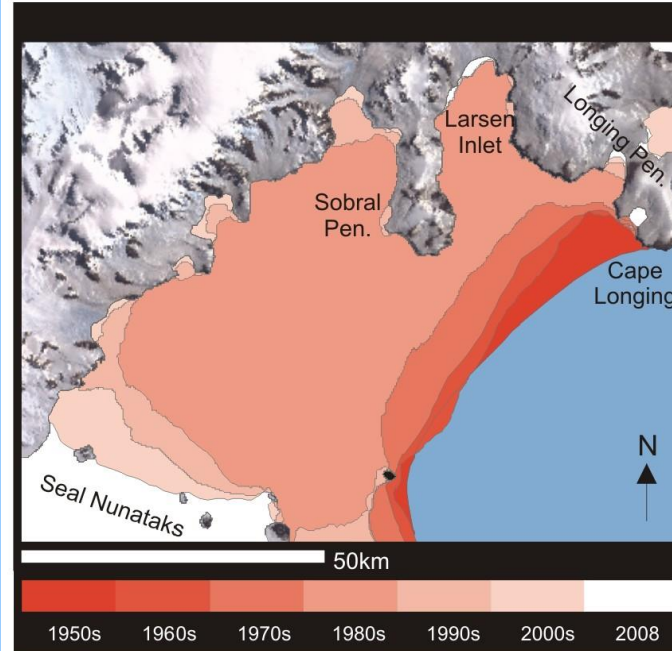
## Prince Gustav Ice Shelf



ústup min. od 40.  
let 20. století

**rozpad v 1995**

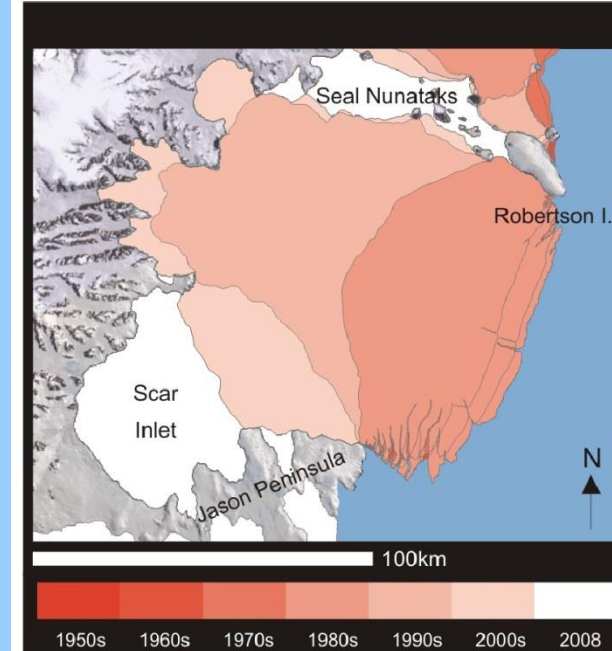
## Larsen A Ice Shelf



postupný ústup již před  
rokem 1960 a pak  
v 80. letech 20. století

**rozpad v 1995**

## Larsen B Ice Shelf



postupný ústup v 80.  
letech 20. Století,  
rozsáhlá kra se  
odlomila 1995

**rozpad v 2002**

# Zánik šelfových ledovců v Arktidě

Šelfový ledovec Ellesmere ležící na severním pobřeží ostrova Ellesmere objeven v roce 1875 s tehdejší plochou  $\sim 9.100 \text{ km}^2$ . Během 20. století se rozpadl na šest šelfových ledovců.

**Hunt Wardův šelfový ledovec** – největší současný arktický šelfový ledovec (původní plocha  $\sim 400 \text{ km}^2$ ), který se postupně rozpadá (2002, 2005, 2010)

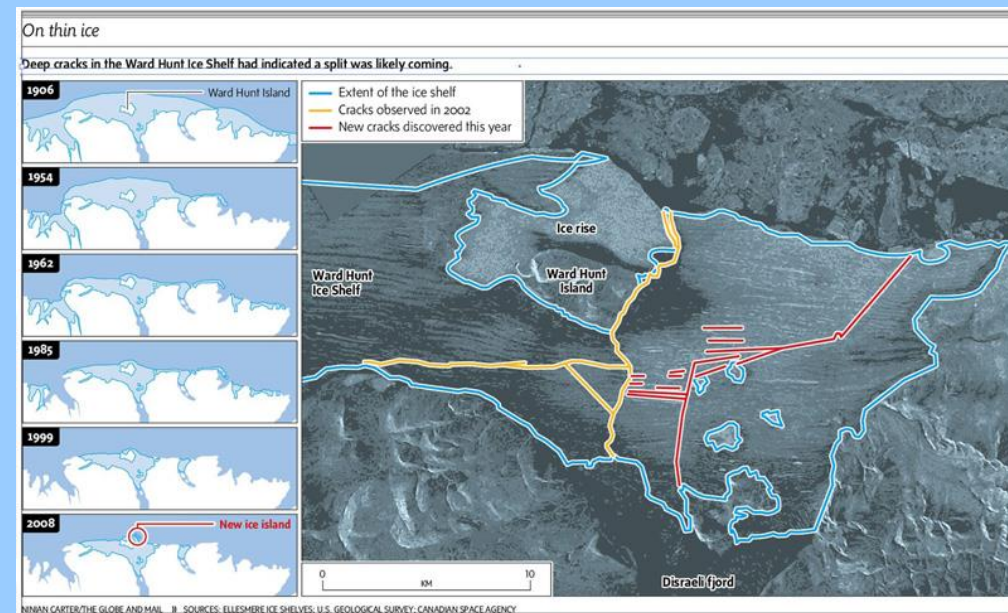
**Aylesův šelfový ledovec** se rozpadl 13.8.2005 oddělením ledové kry o ploše  $66 \text{ km}^2$ .



Before breakup, 00:55 UTC

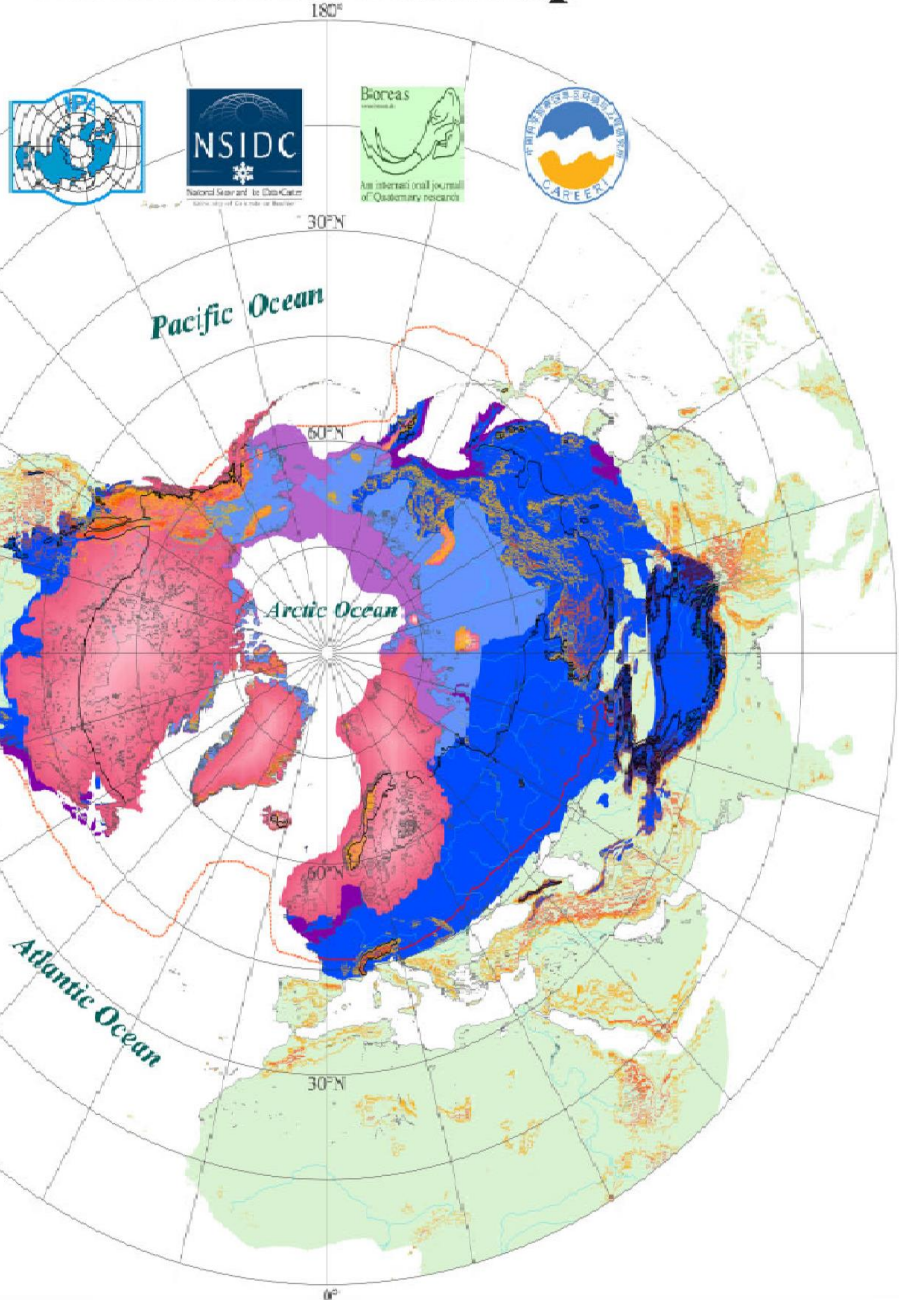


After breakup, 20:45 UTC






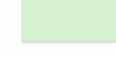


# Změny permafrostu během kvartéru (LPM – Last Permafrost Maximum)

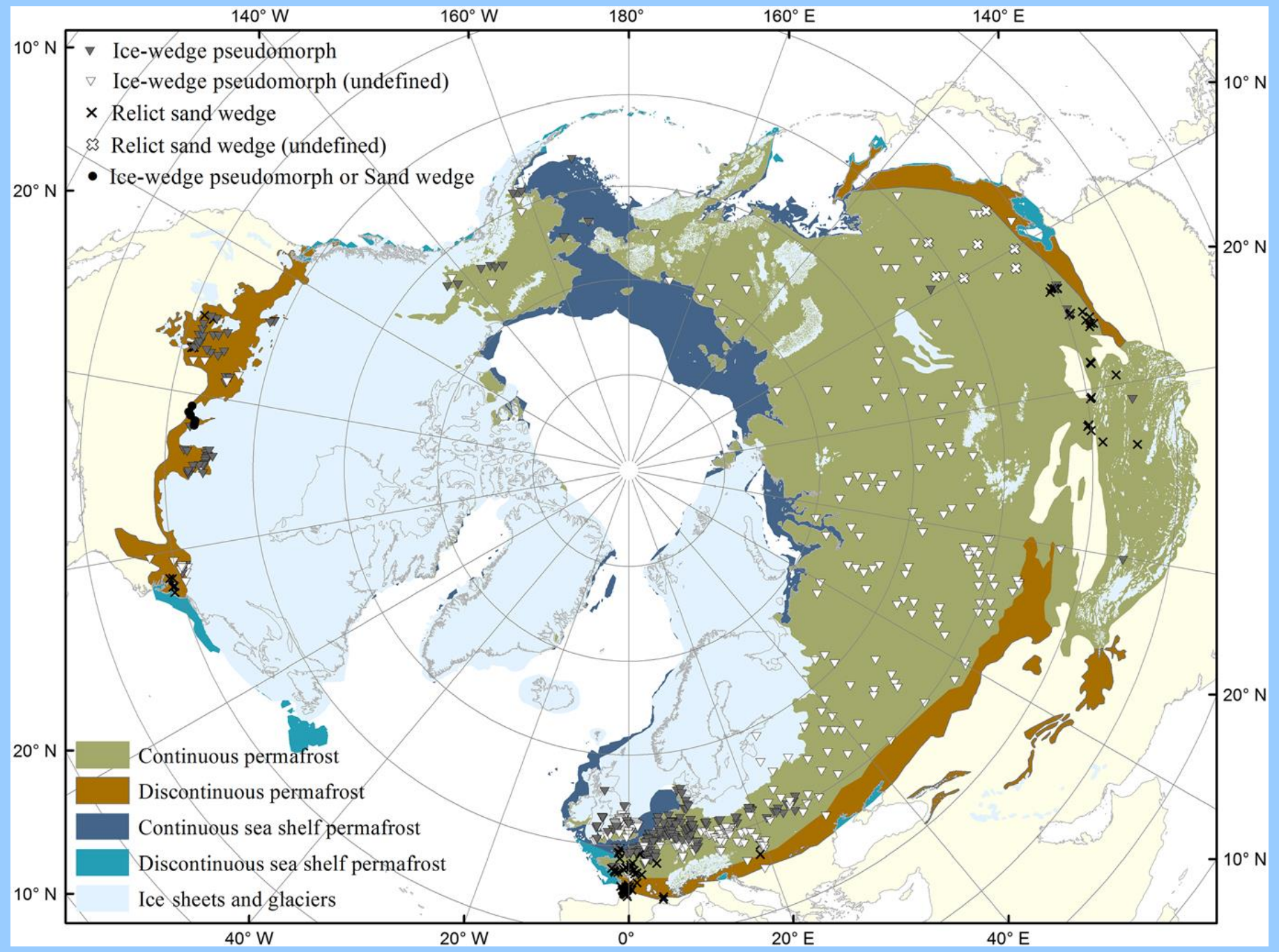
## LPM Permafrost Map



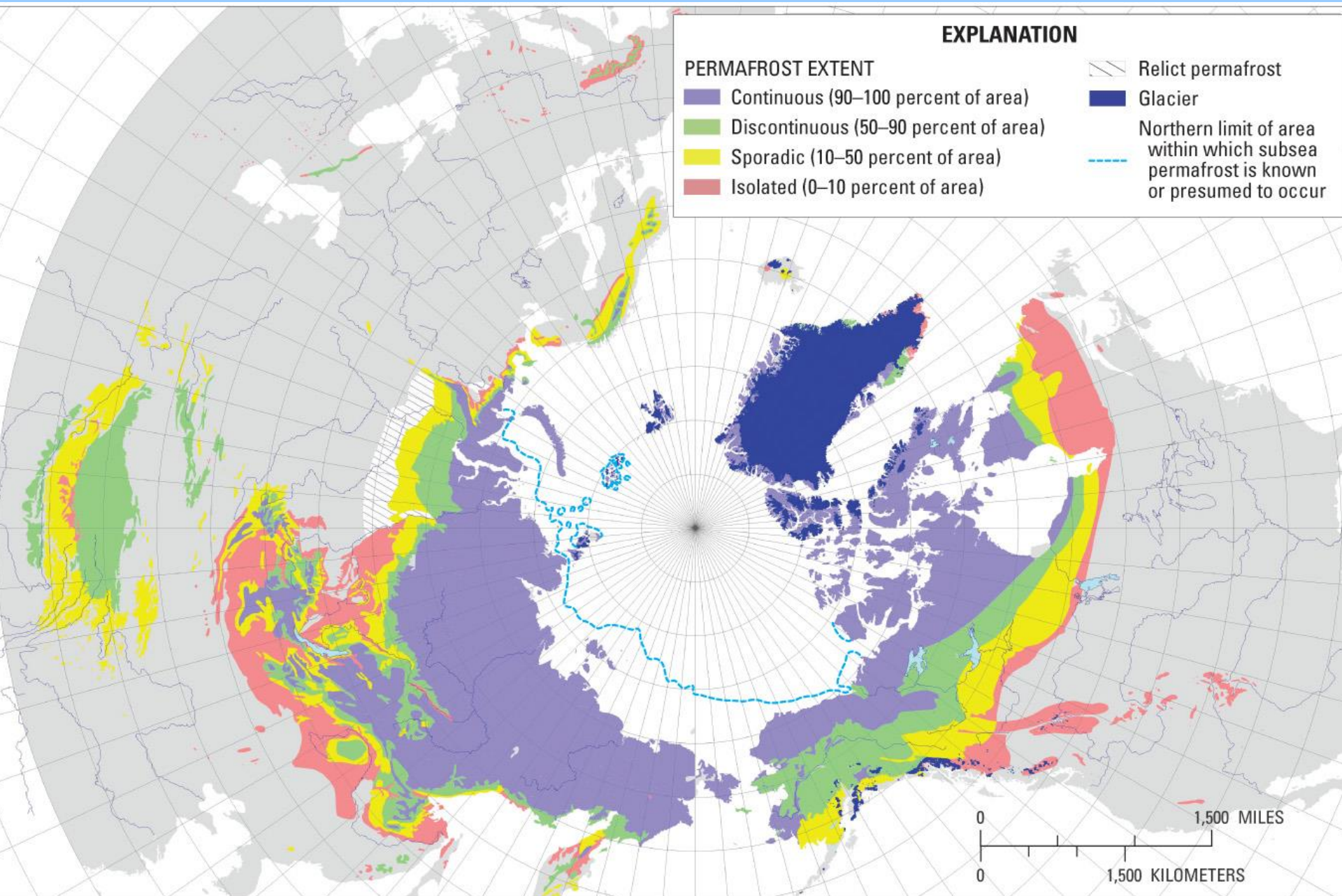
### Extent of LPM permafrost:

-  Equilibrium permafrost (climate-controlled)
  -  Land area under relict permafrost
  -  Exposed land under relict permafrost
  -  Exposed land at time of LPM (assumed to be permafrost)
  -  Extent of continental ice sheets at time of LGM
  -  Exposed land without permafrost at time of LPM
  -  Approximate boundary between LPM continuous and discontinuous permafrost
  -  Southern boundary of present-day permafrost
  -  Approximate limit of LPM winter sea ice extent
  -  Rivers
  -  Modern coastline
- Elevation contour lines (m a.s.l.)
-  1000
  -  2000
  -  4000

# Změny permafrostu během kvartéru (LPM – Last Permafrost Maximum)

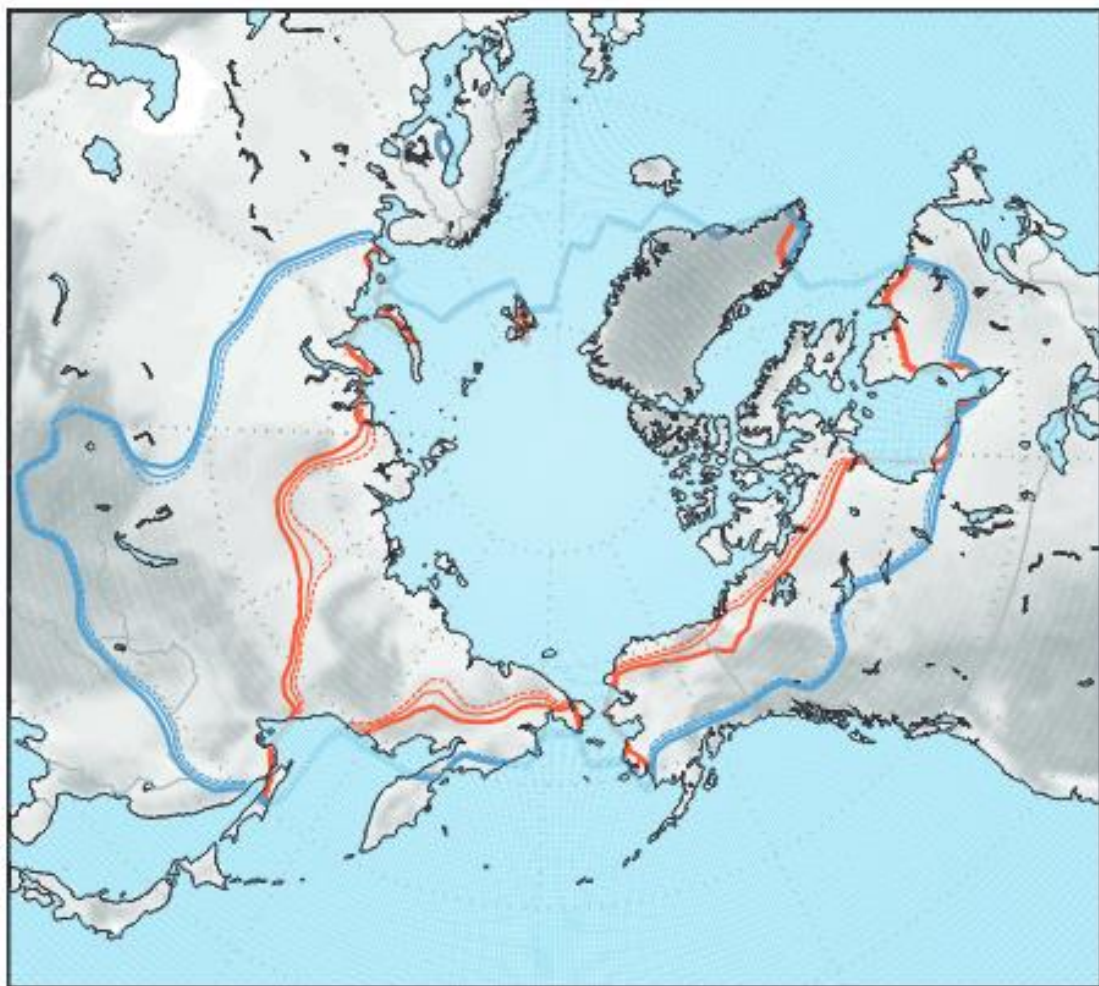


# Změny permafrostu během kvartéru (současnost)





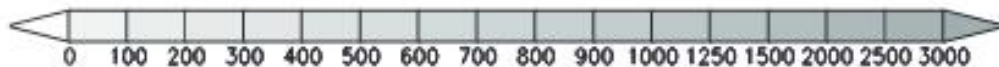
# Změny permafrostu během kvartéru (modely budoucího vývoje)



1961-1990

2071-2100

— Sporadic  
- - - Discontinuous  
..... Continuous



## K dalšímu čtení:

- Andersen, K.A. et al. (2006): The Greenland Ice Core Chronology 2005, 15–42 ka. Part 1: constructing the time scale. *Quaternary Science Reviews* 25, 3246–3257.
- Benn, D.I. & Evans, D.J.A. (2010): *Glaciers and Glaciation*. 2nd Edition, Arnold.
- Bennett, M.R. & Glasser, N.F. (2009): *Glacial Geology: ice sheets and landforms*. 2nd Edition, Wiley.
- Davis, P.T, Menounos, B. & Osborn, G., eds. (2009): Holocene and Latest Pleistocene Alpine Glacier Fluctuations: A Global perspective. *Quaternary Science Reviews* 28, 2021–2238.
- Ehlers, J., Gibbard, P.L. & Hughes, P.D., eds. (2011): *Quaternary Glaciations – Extent and Chronology, A closer look*. Developments in Quaternary Science 16, Elsevier.
- EPICA community members (2006): One-to-One coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature* 444, 195–198.
- Knies, J. et al. (2009): The Plio-Pleistocene glaciation of the Barents Sea–Svalbard region: a new model based on revised chronostratigraphy. *Quaternary Science Reviews* 28, 812–829.
- Lindgren, A. et al. (2016): GIS-based Maps and Area Estimates of Northern Hemisphere Permafrost Extent during the Last Glacial Maximum. *Permafrost and Periglacial Processes* 27, 6–16.
- Mangerud, J. et al. (2004): Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews* 23, 1313–1332.
- Margold, M. et al. (2015): Ice streams in the Laurentide Ice Sheet: a new mapping inventory. *Journal of Maps* 11, 380–395.
- Margold, M. et al. (2016): Extensive glaciation in Transbaikalia, Siberia, at the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 132, 161–174.
- North Greenland Ice Core Project Members (2004): High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature* 431, 147–151.
- Rasmussen, S. O. et al. (2008): Synchronization of the NGRIP, GRIP, and GISP2 ice cores across MIS 2 and palaeoclimatic implications. *Quaternary Science Reviews* 27, 18–28.
- Steffensen, J.P. et al. (2008): High-Resolution Greenland Ice Core Data Show Abrupt Climate Change Happens in Few Years. *Science* 321, 680–684.
- Svendsen, J.I. et al. (2004): Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews* 23, 1229–1271.
- Svensson, A. et al. (2006): The Greenland Ice Core Chronology 2005, 15–42 ka. Part 1: comparison to other records. *Quaternary Science Reviews* 25, 3258–3267.
- Teller, J.T. & Kehew, A.E., eds. (1994): Late Glacial history of large proglacial lakes and meltwater runoff along the Laurentide ice sheet. *Quaternary Science Reviews* 13, 795–981.
- Vandenberghe, J. et al. (2014): The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. *Boreas* 43, 652–666.
- Wright, A. & Siegert, M. (2012): A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. *Antarctic Science* 24, 659–664.