

Kvarterní prostředí (podzimní semestr 2019)

Zalednění a změny permafrostu v kvartéru

MUNI

Daniel Nývlt (daniel.nyvlt@sci.muni.cz)

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.

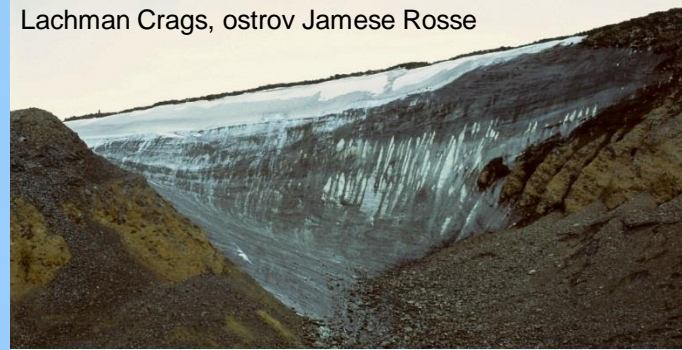
Horský ledovec (údolní ledovec)

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

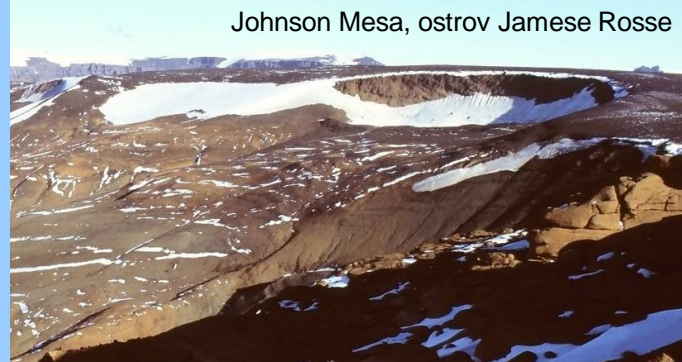
Piedmontní ledovec

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

Lachman Crags, ostrov Jamese Rosse



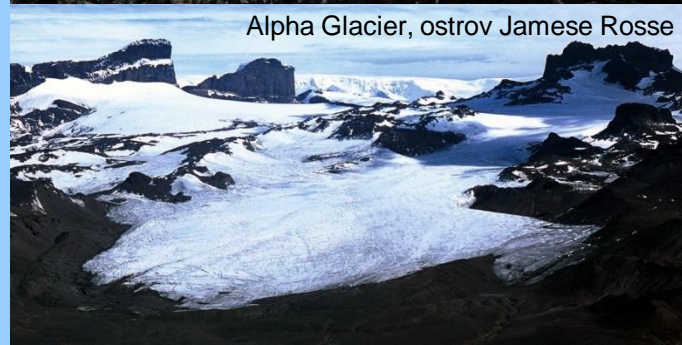
Johnson Mesa, ostrov Jamese Rosse



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 km². Např. **Jotunheimen** nebo **Columbia icefield**.

Ledovcová čapka

Je tvořena rozsáhlou masou ledu pokrývající horu nebo celé pohoří do rozlohy ~50 000 km². Na okrajích stékají jednotlivé splazy a mohou se telit až do moře. Např. **Jihopatagónská ledovcová čapka** nebo **Vatnajökull**.

Ledovcový štít (kontinentální ledovec)

Nejrozsáhlejší ledovce, které dnes pokrývají pouze Antarktidu a Grónsko s plochou větší než ~50 000 km². 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.



Vatnajökull, Island



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**.

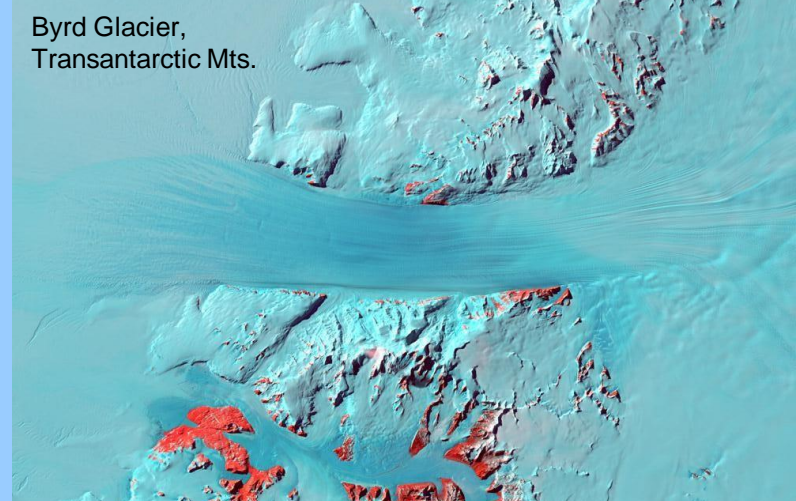
Šelfový ledovec

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 zámrz. Největší **Rossův šelfový ledovec**.

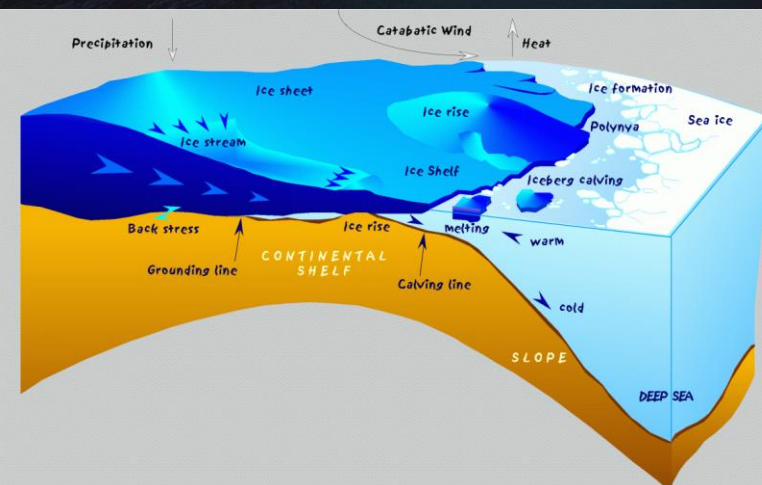
Ledovcový výšvih (ice rise)

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**.

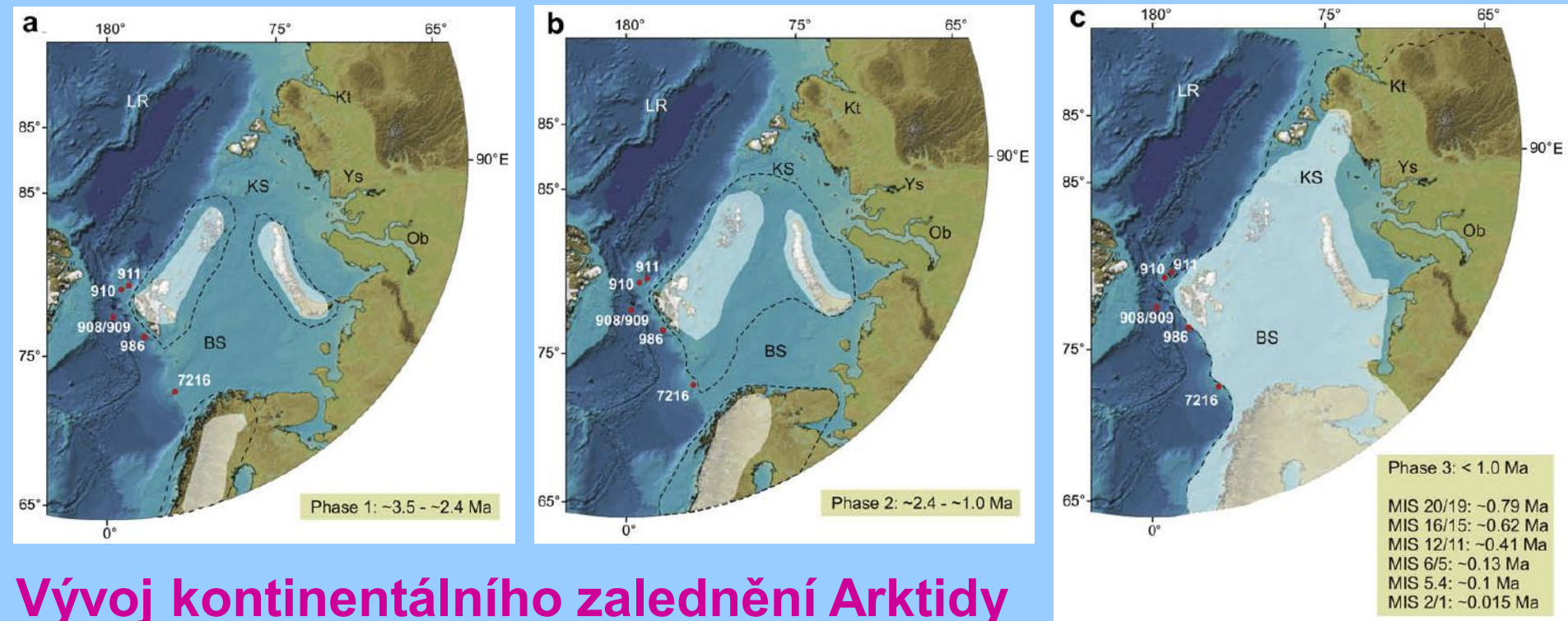
Byrd Glacier,
Transantarctic Mts.



Ross Ice Shelf



Paleogeografická rekonstrukce zalednění v kvartéru

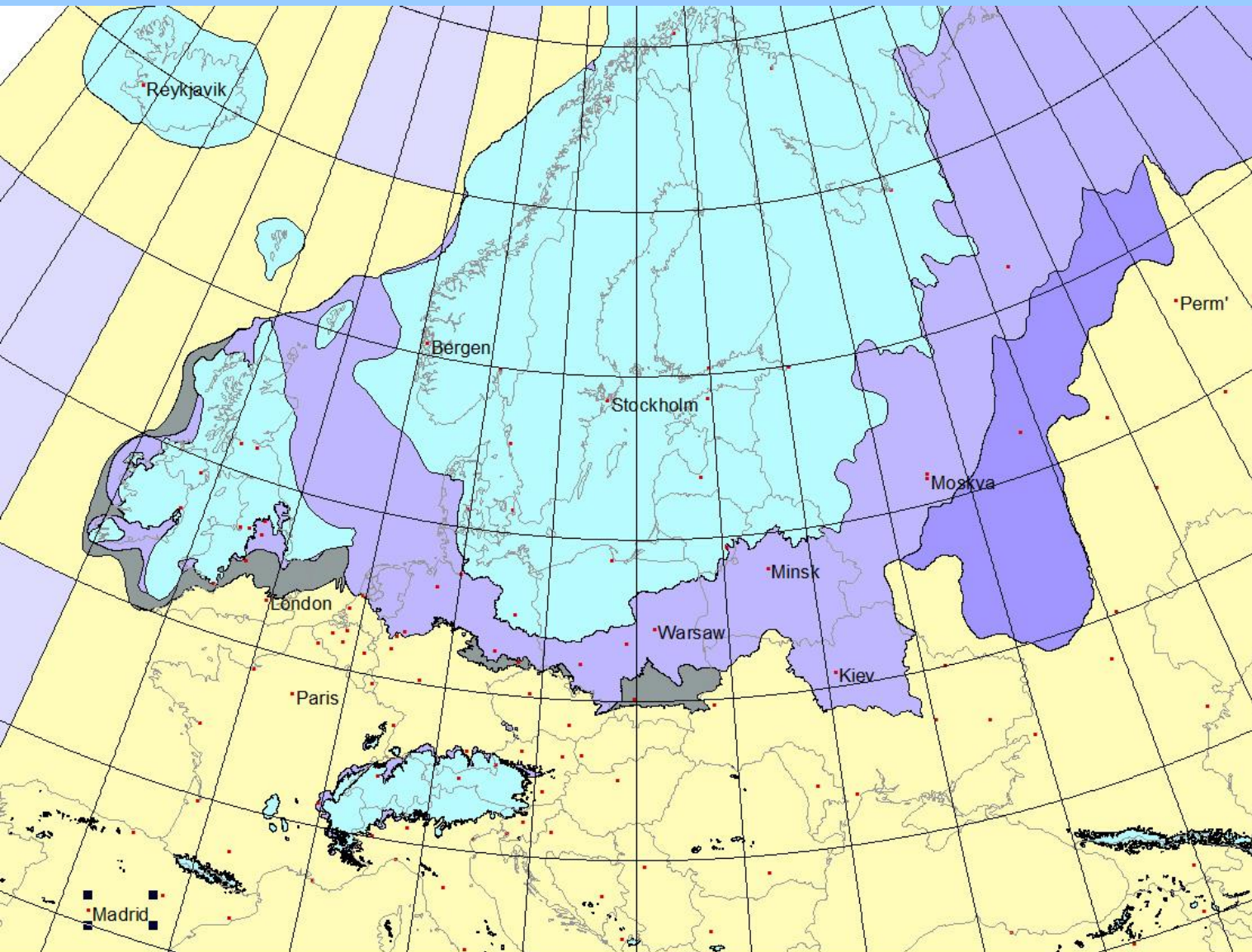


Vývoj kontinentálního zalednění Arktidy

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.

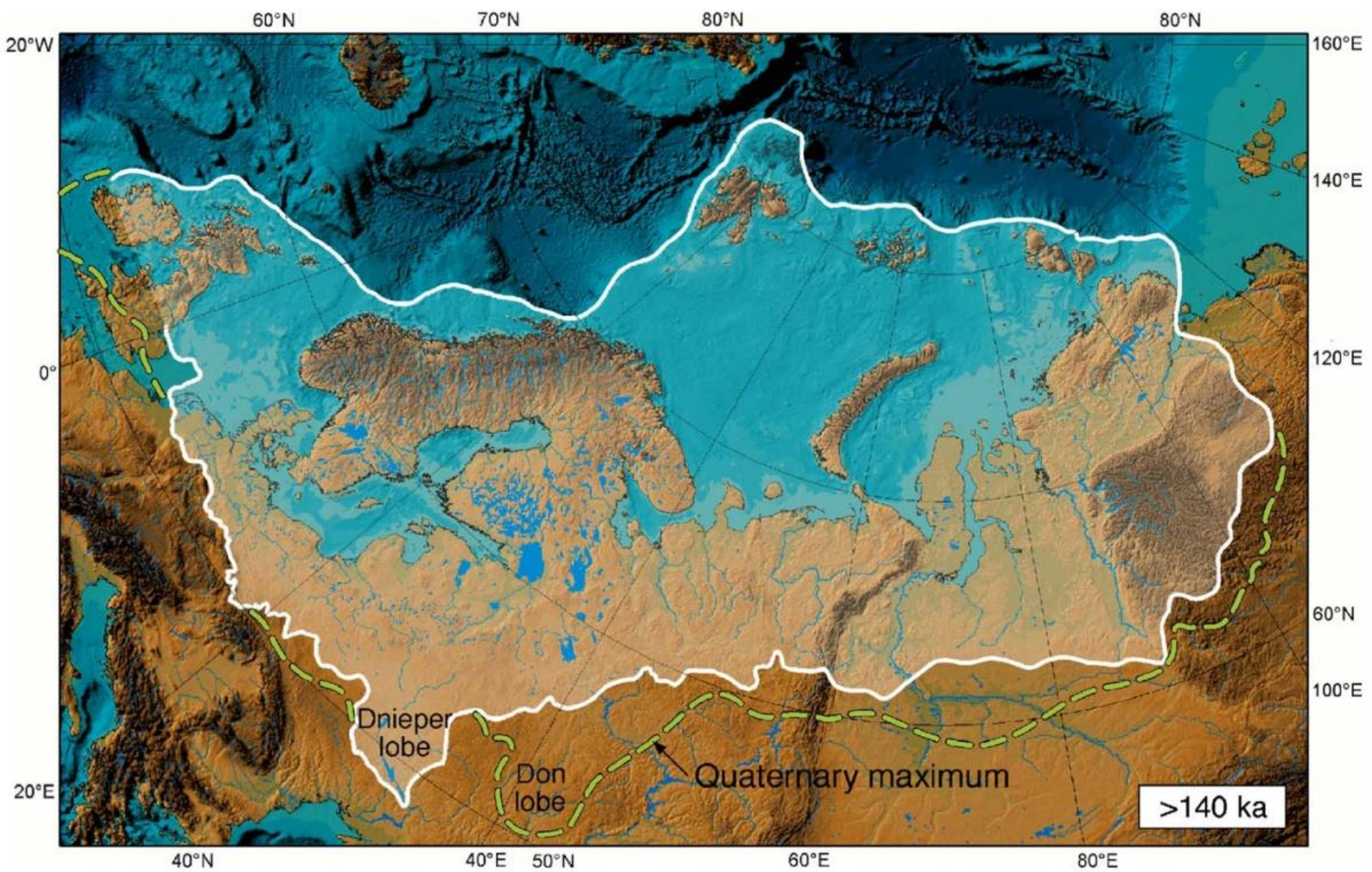
(před 435 tisíci let)

sálský gl.

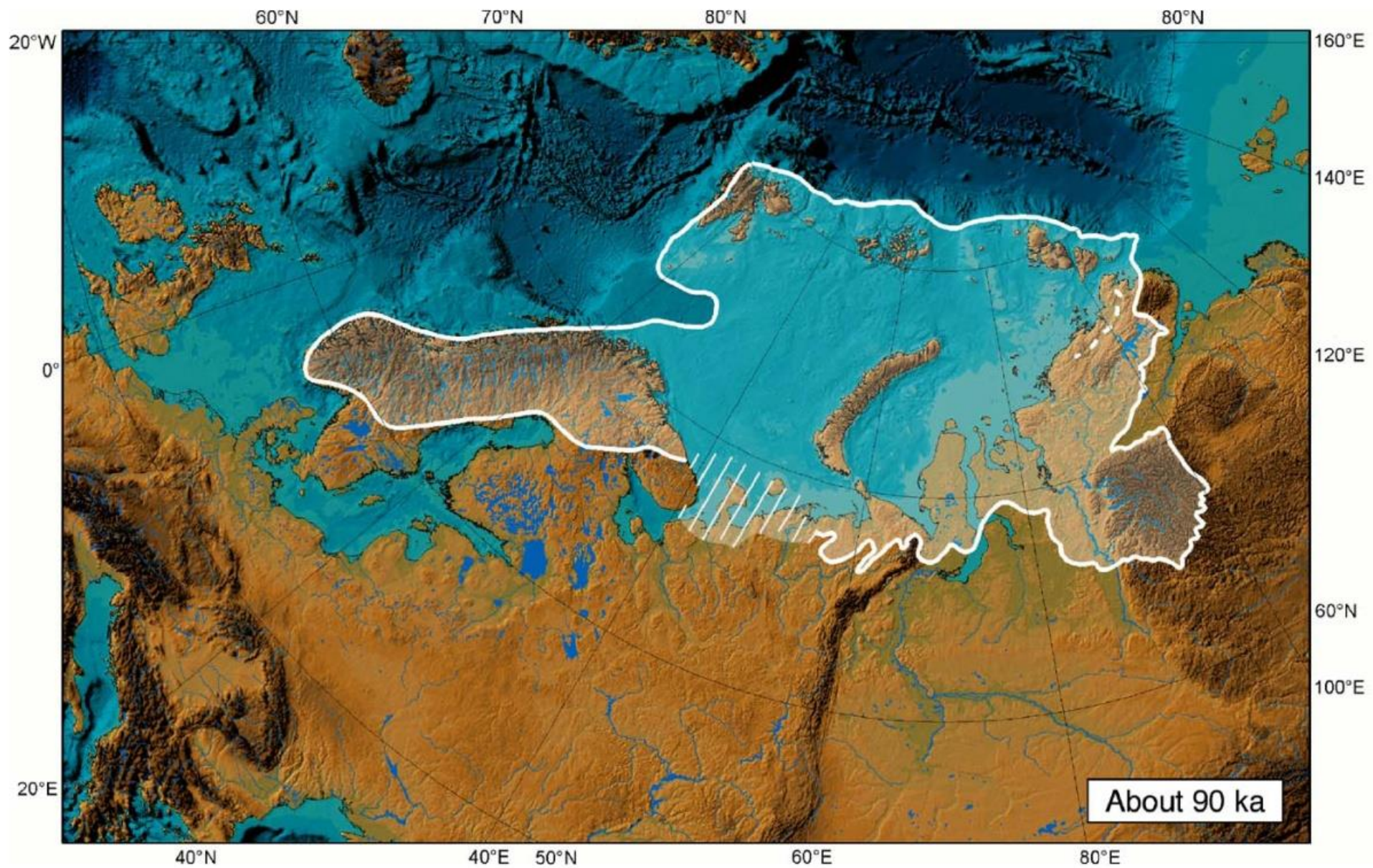
(před 170 tisíci let)

viselský gl.

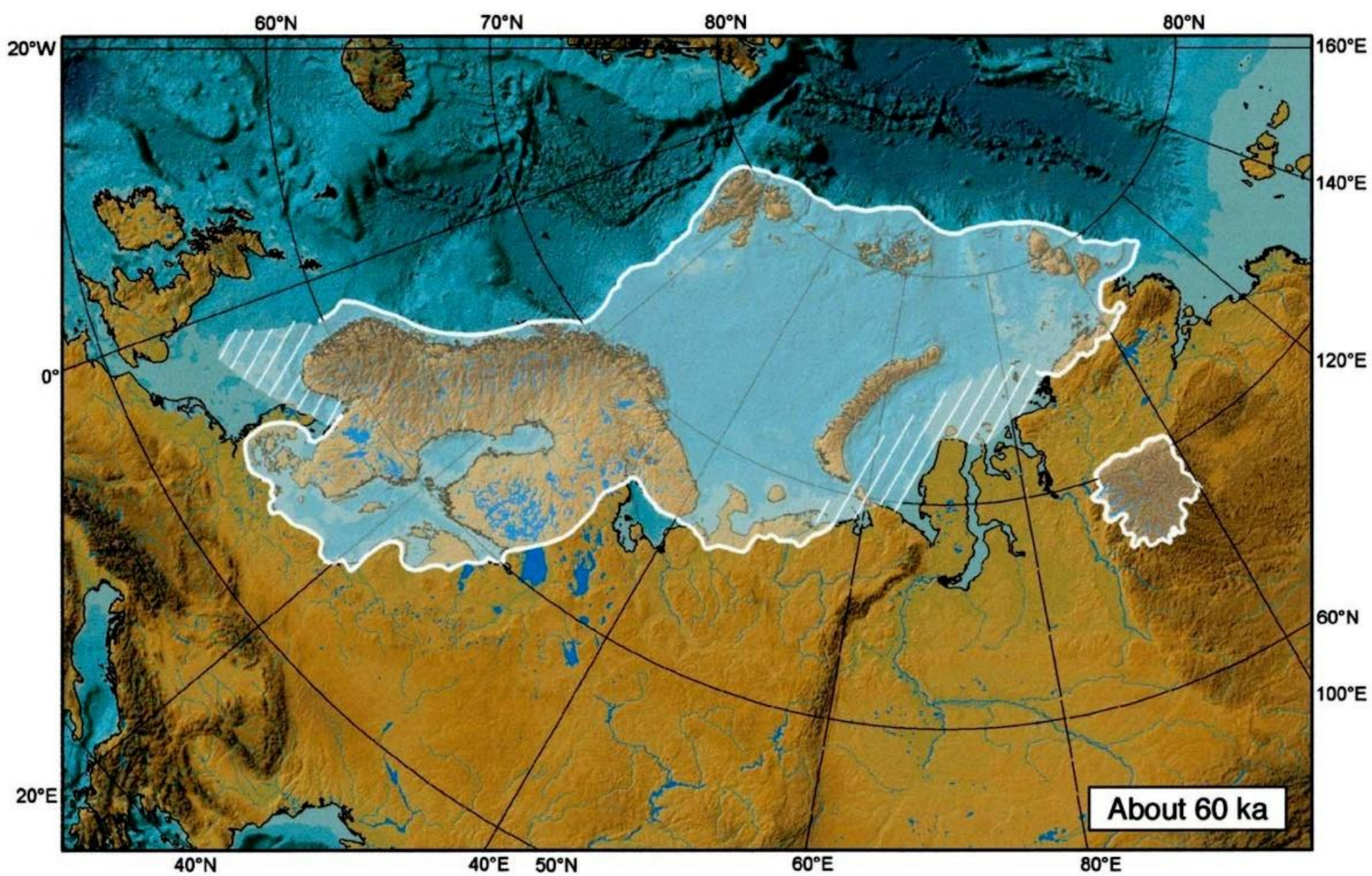
(před 20 tisíci let)



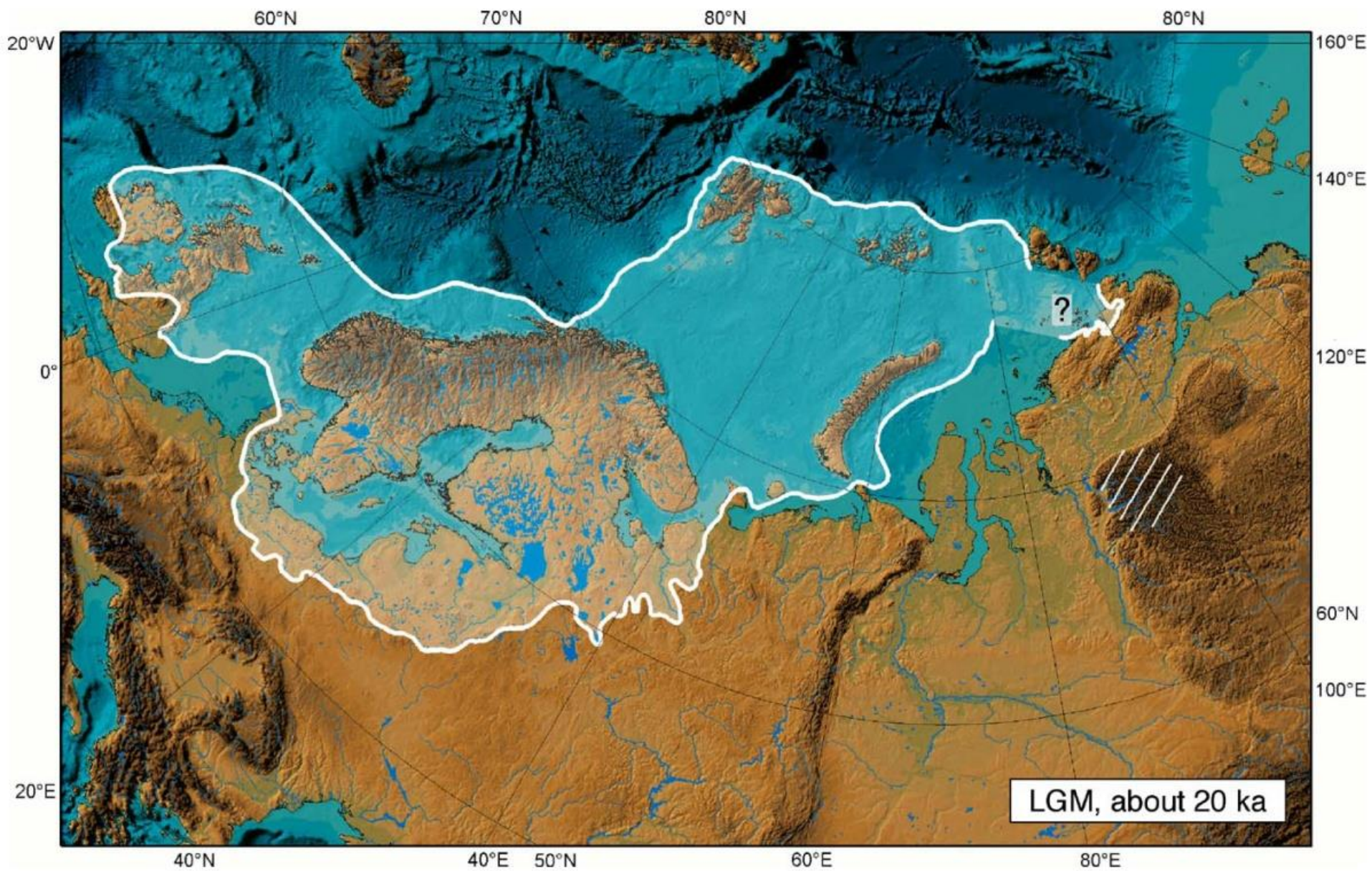
Maximální rozsah Eurosibiřského zalednění během sálského glaciálu



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

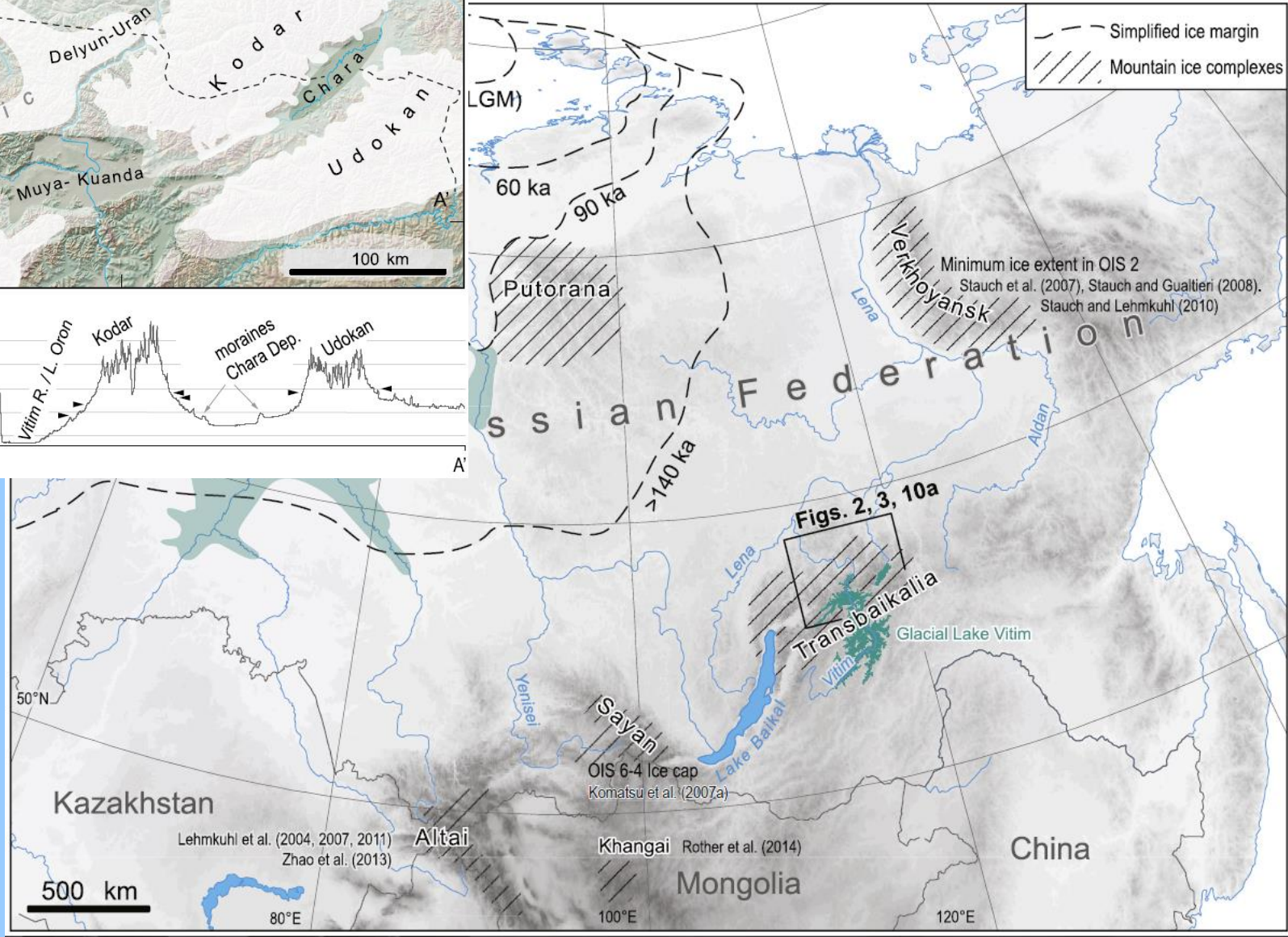
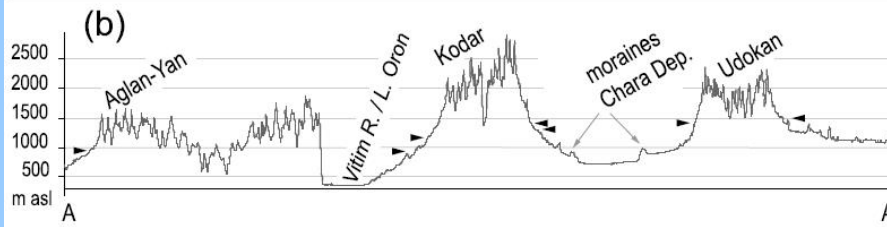
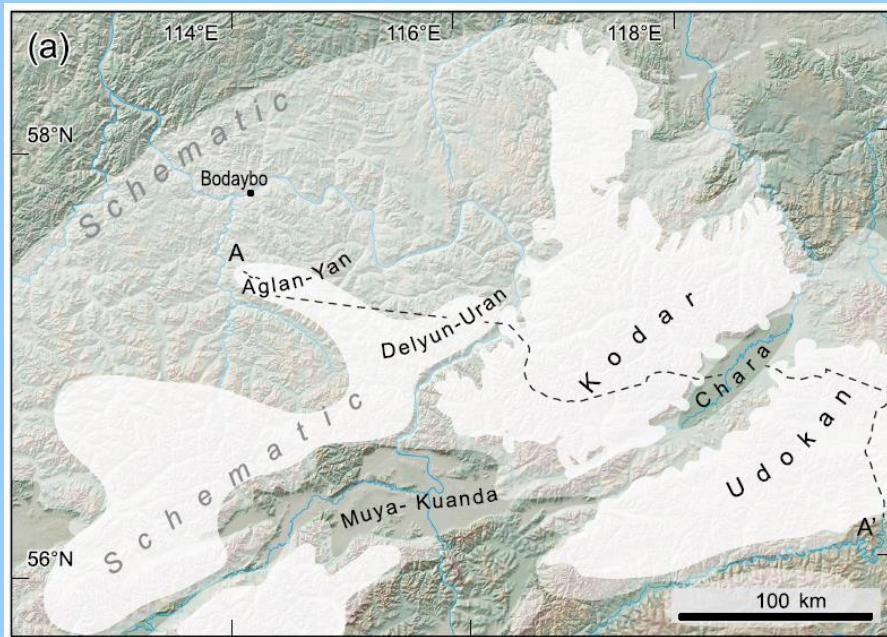


Rozsah Eurosibiřského zalednění během MIS 4



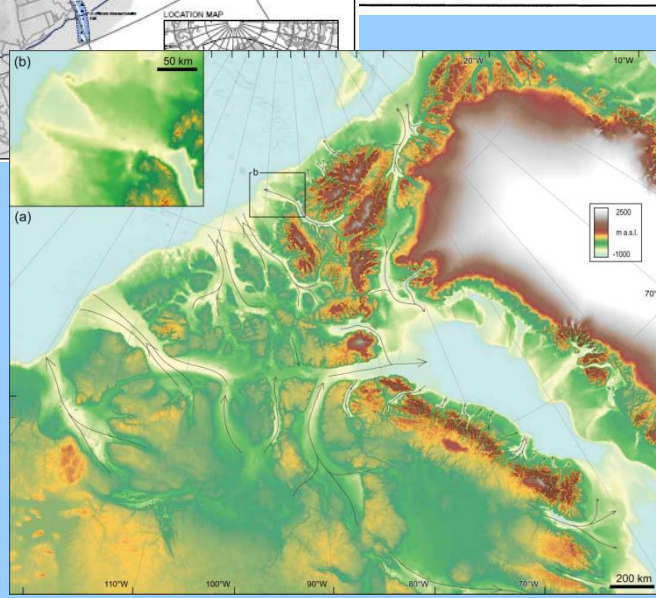
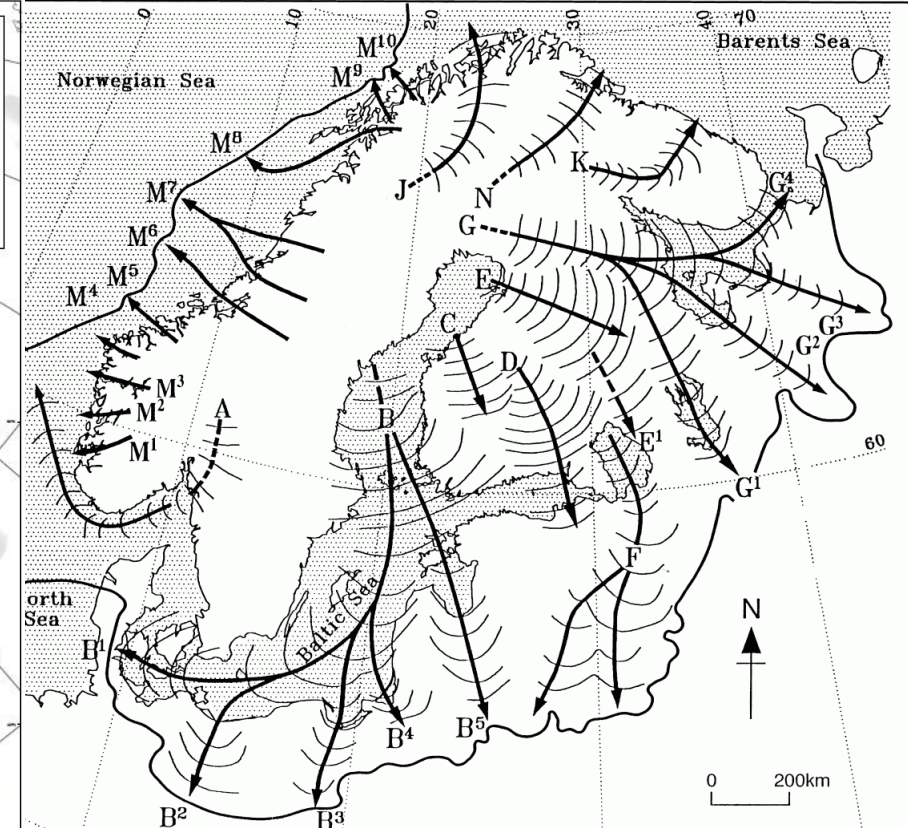
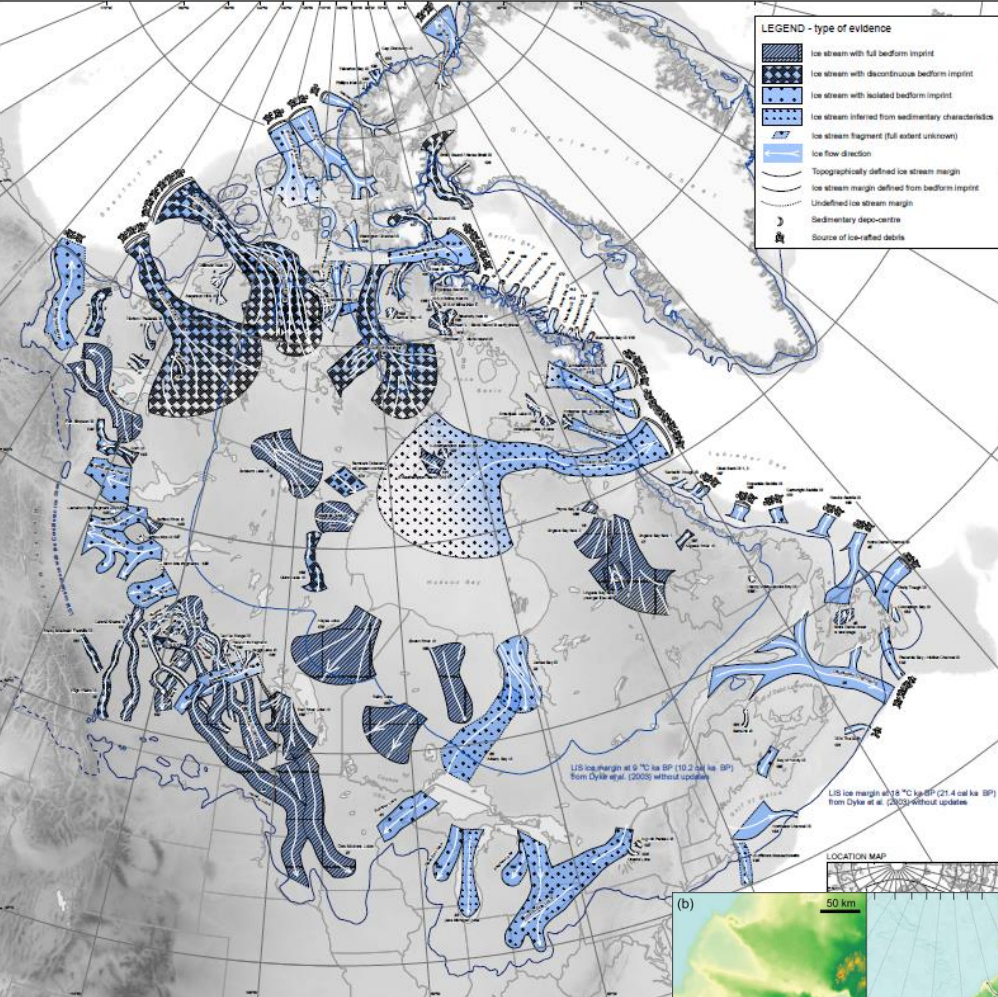
Rozsah Eurosibiřského zalednění během LGM (MIS 2)

Rozsah zalednění na Sibiři a v Mongolsku

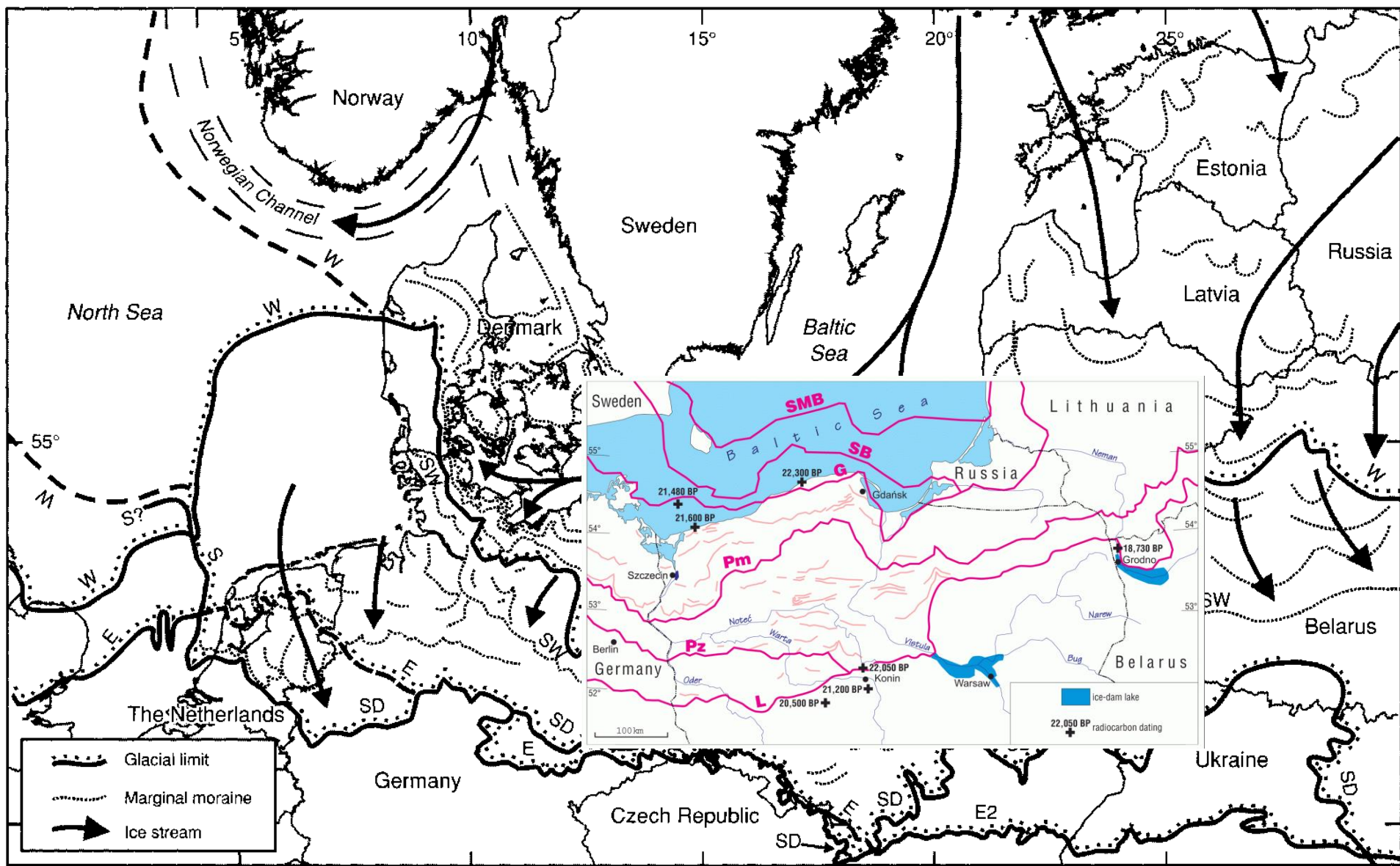


...takhle nějak to vypadalo během vrcholu poslední doby ledové...



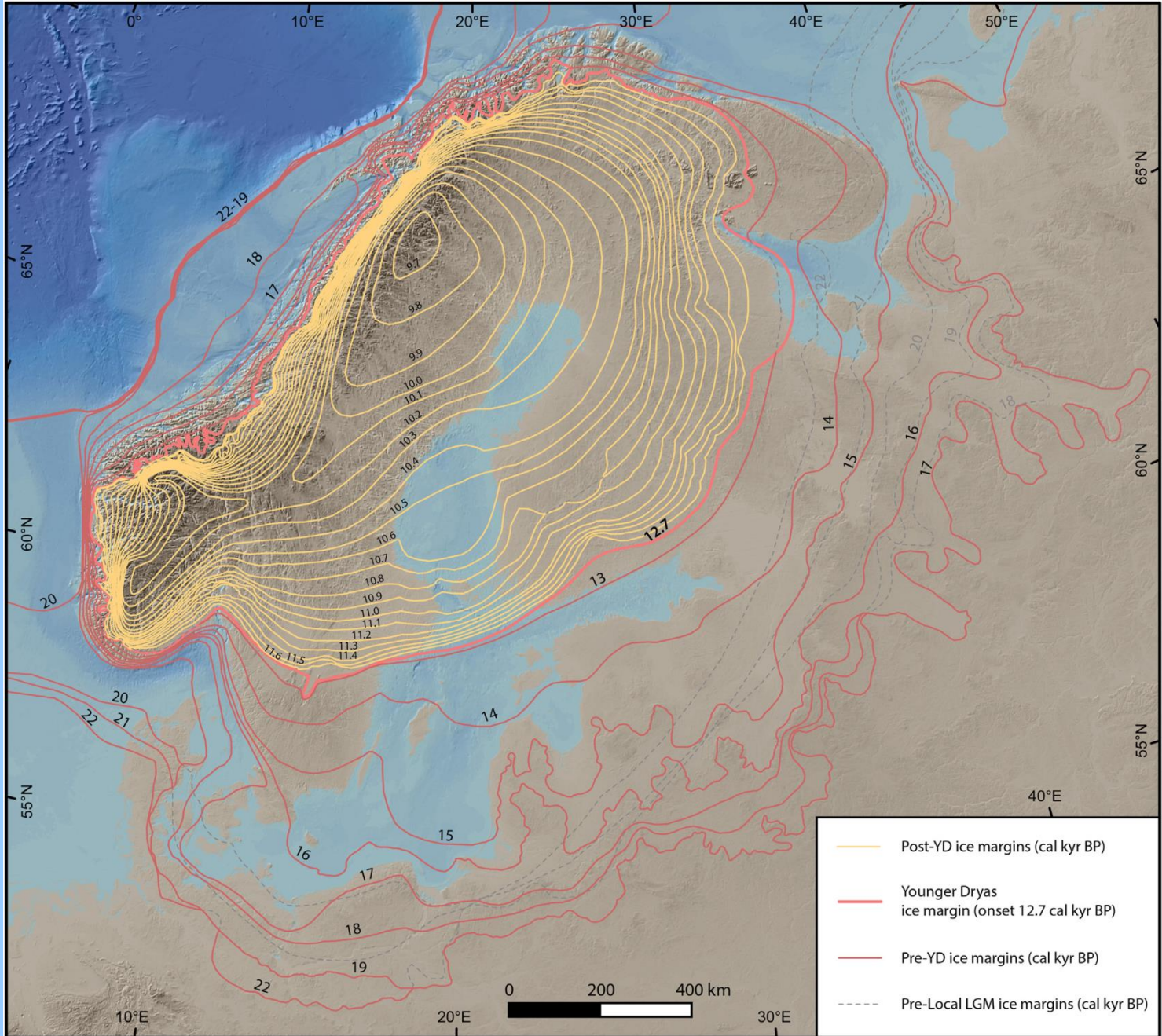


Hlavní ledovcové proudy severoevropského a severoamerického ledovcového štítu během LGM

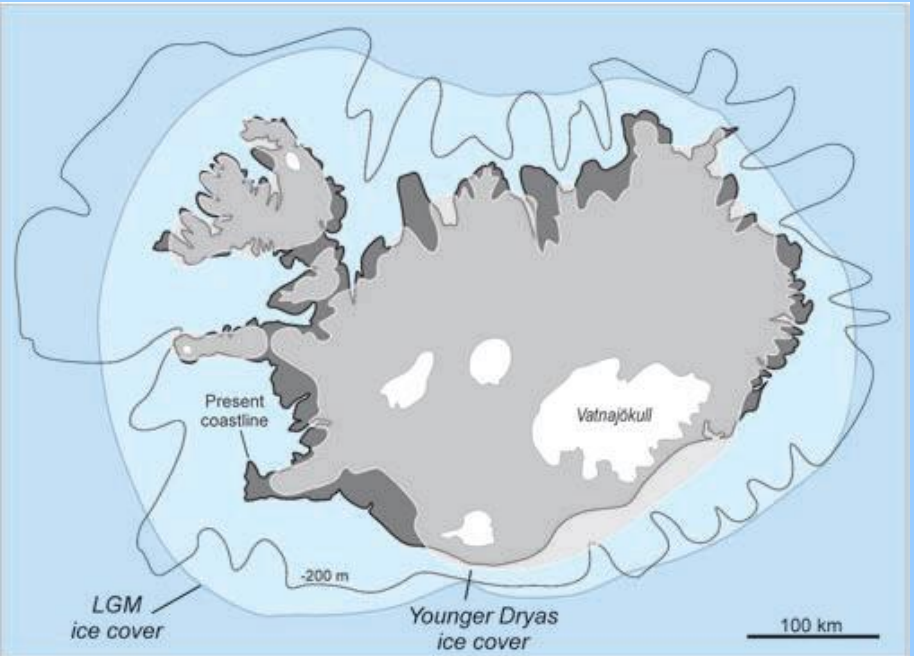
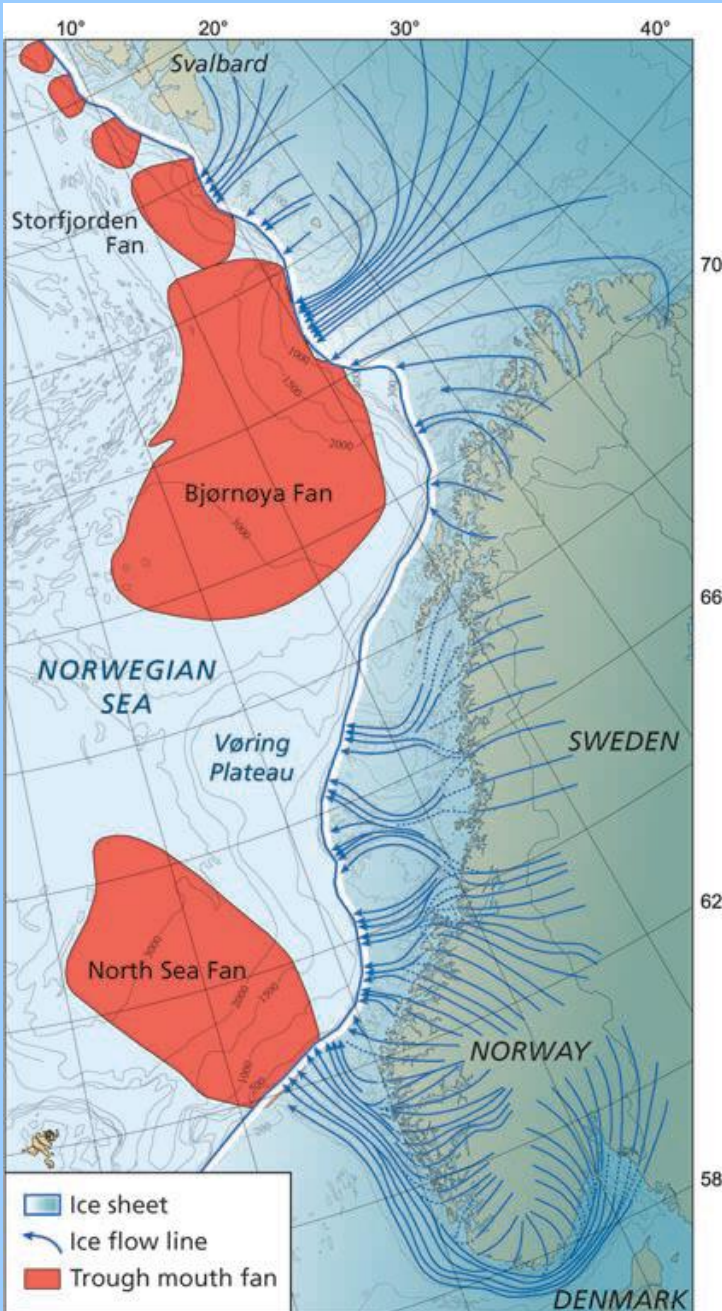
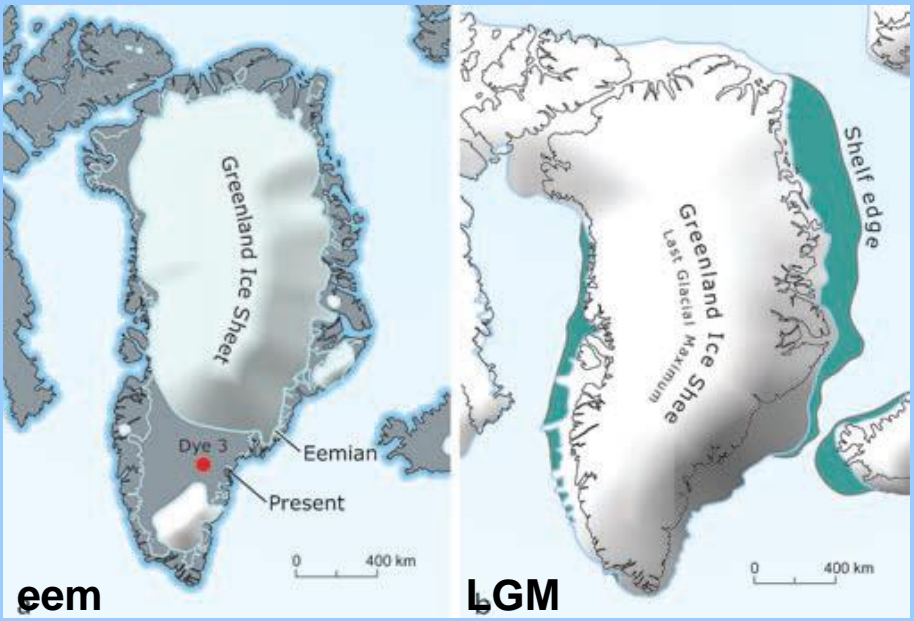


Maximální rozsahy jednotlivých zalednění v Evropě

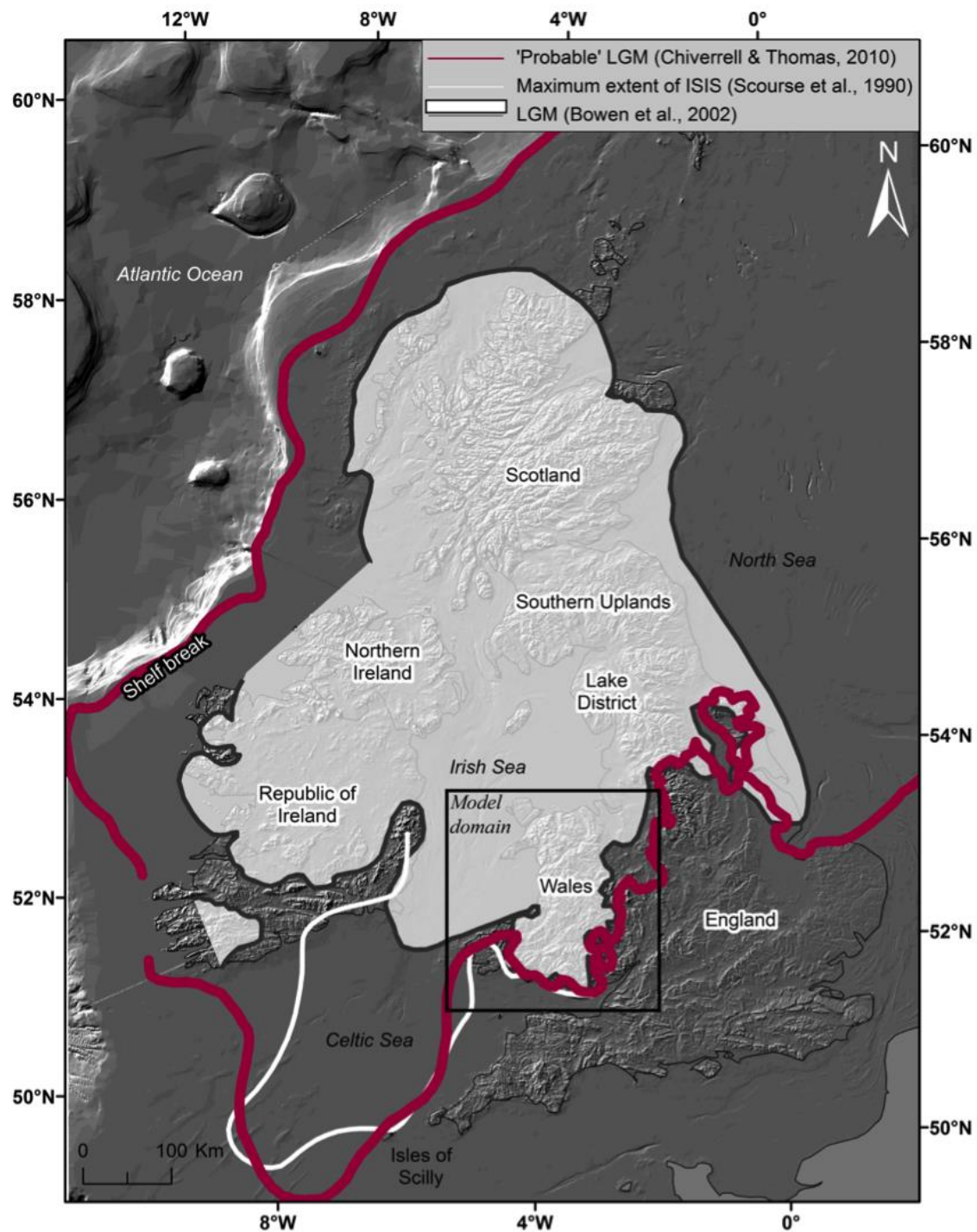
Deglaciace Severoevropského ledovcového štítu



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

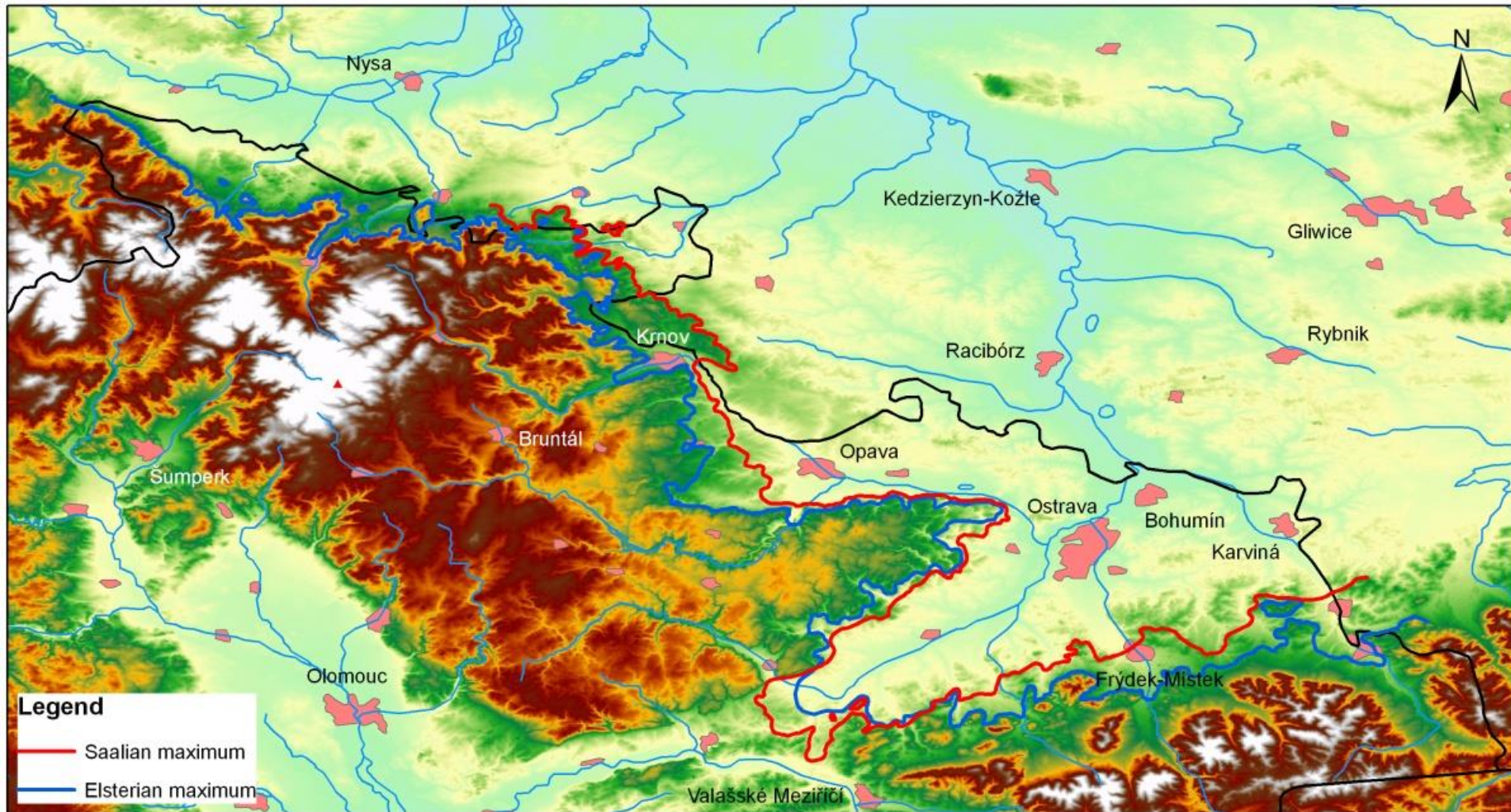


Maximální rozsah
devenského zalednění na
Britských ostrovech



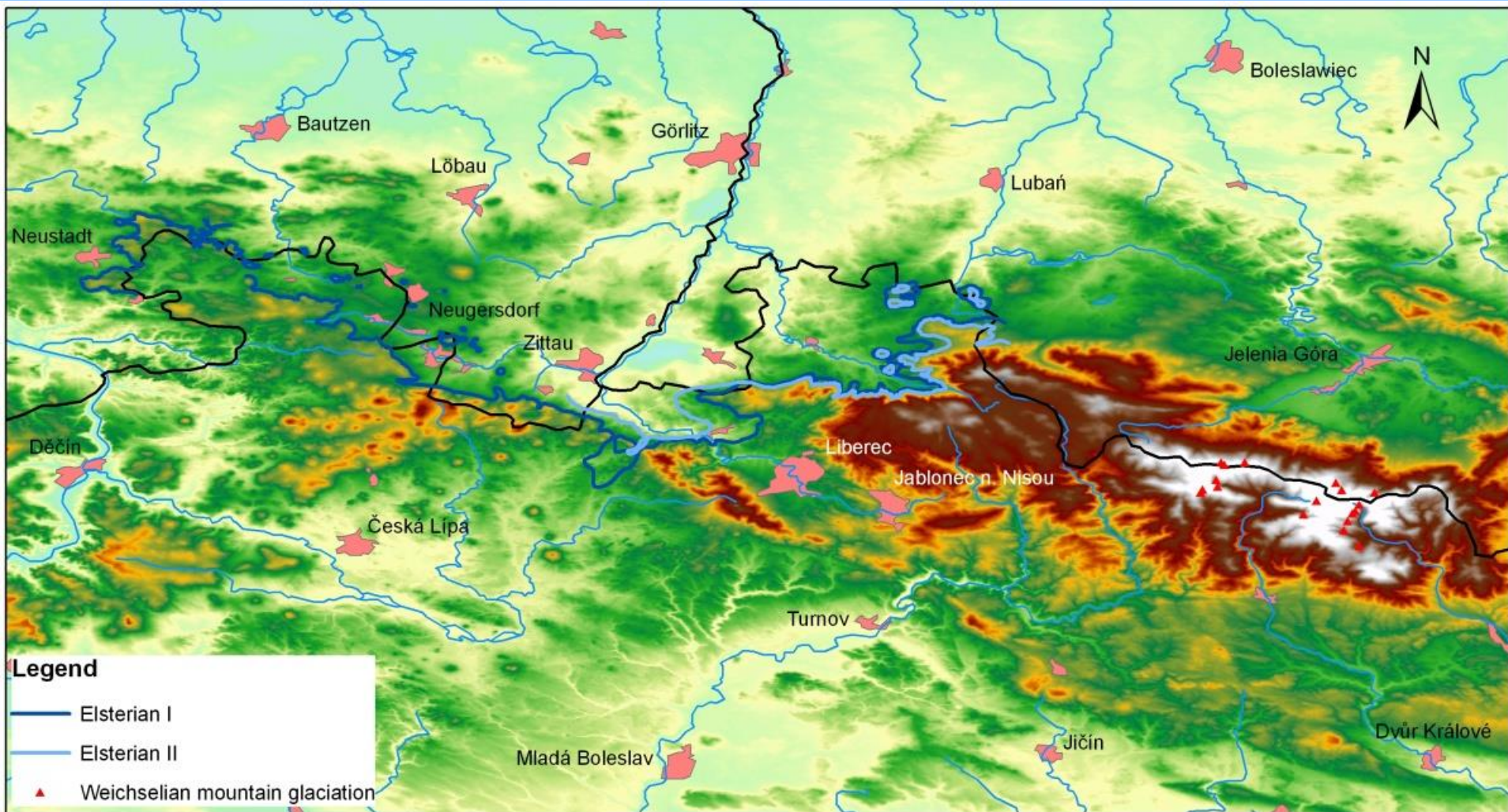
Maximální rozsah kontinentálních zalednění v Česku (Nývlt et al., 2011)

Maximální rozsah kontinentálního zalednění na Moravě a ve Slezsku

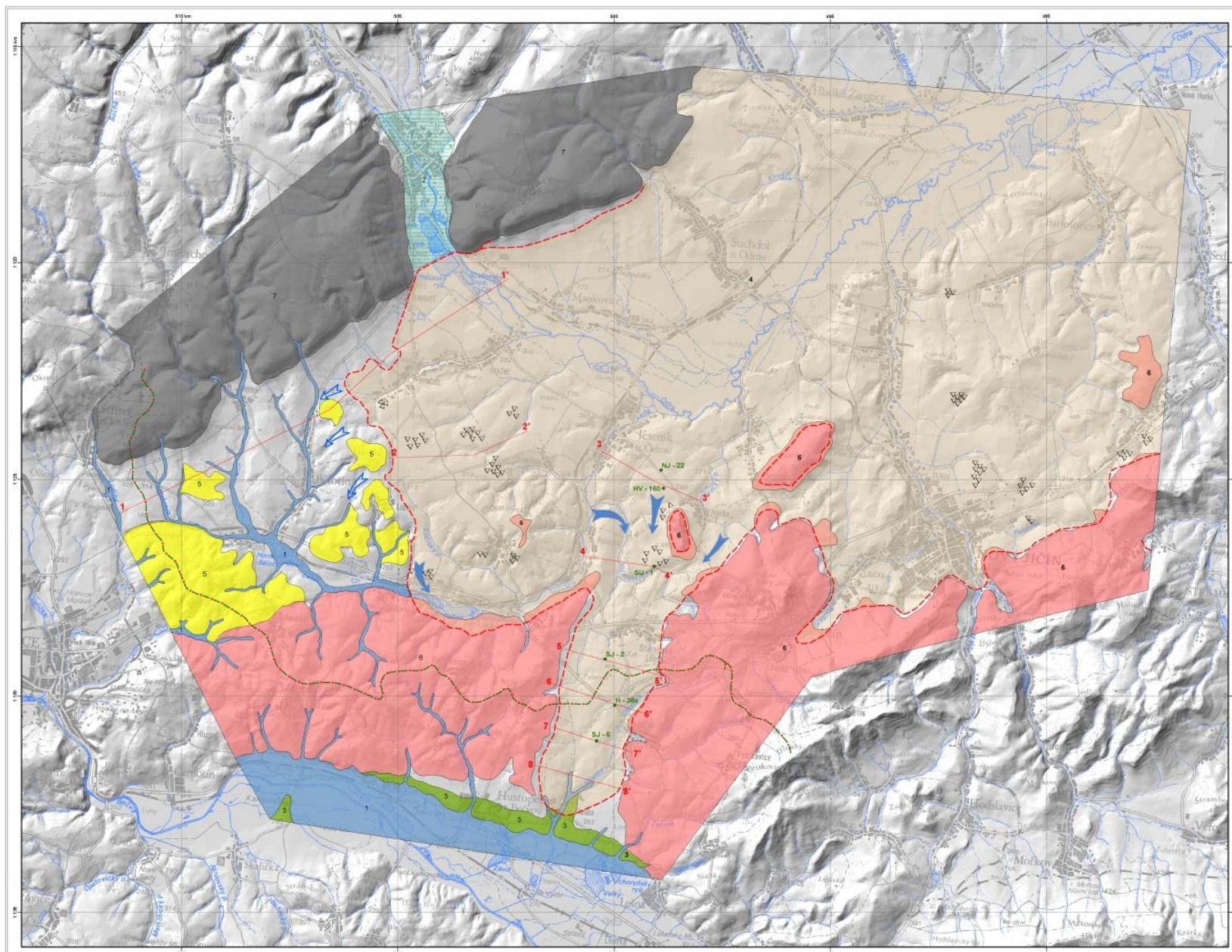


Maximální rozsah kontinentálních zalednění v Česku (Nývlt et al., 2011)

Maximální rozsah kontinentálního zalednění v severních Čechách



PALEOGEOGRAFICKÁ REKONSTRUKCE KONTINENTÁLNÍHO ZALEDNĚNÍ V MORAVSKÉ BRÁNĚ



- Legenda**
- 1 holocenní fluvijní 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
 prokázány směr odtoku tavných vod
 teoreticky možný, avšak neprokázaný odtok tavných vod
 hranice geologických jednotek
 rozsah kontinentálního zalednění
 hlavní evropské rozvody
 významné řeky
 geologický řez

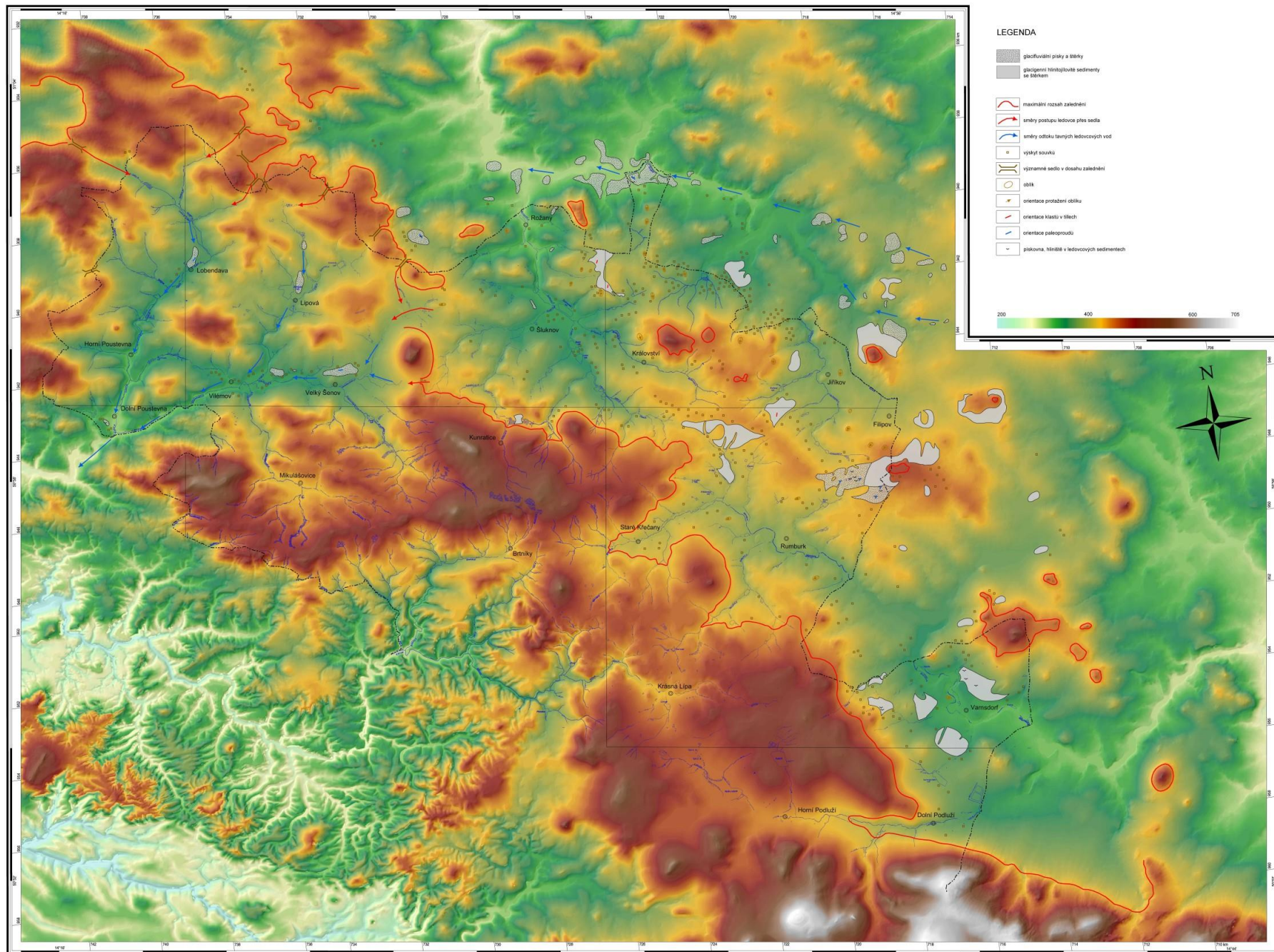
Autor: J. Týřáček
 Vedoucí projektu: D. Nytl
 Technický redaktor: M. Zemková
 Originál zpracování: autor a středisko GIS a DŘ ČGS
 1. vydání, 2007

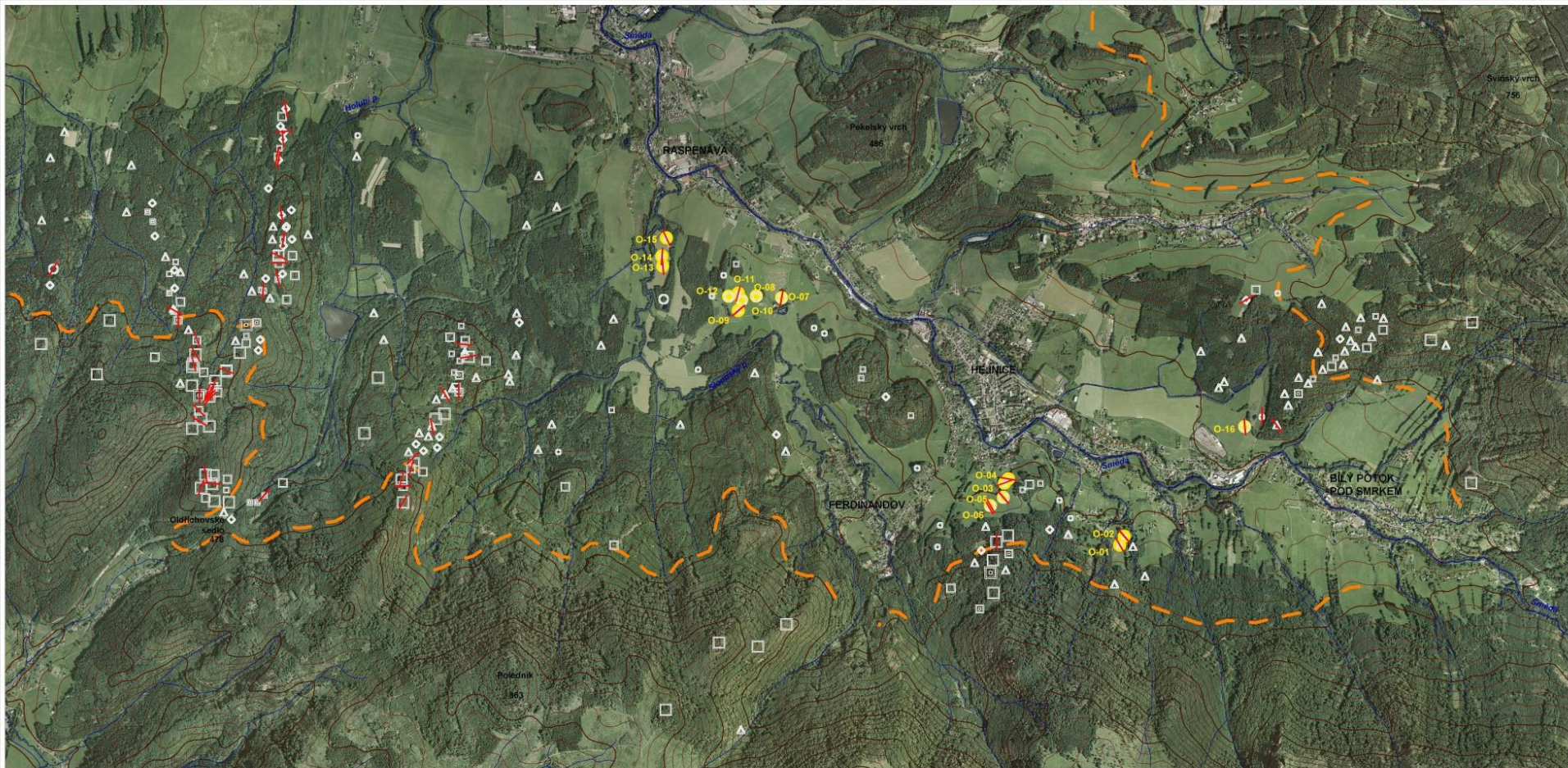
1 : 50 000



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 © České geologické služby
 Mapový podklad: © Český úřad zeměměřičský a katastrální

PALEOGEOGRAFICKÁ REKONSTRUKCE KONTINENTÁLNÍHO ZALEDNĚNÍ ŠLUKNOVSKÉ PAHORKATINY





LEGENDA

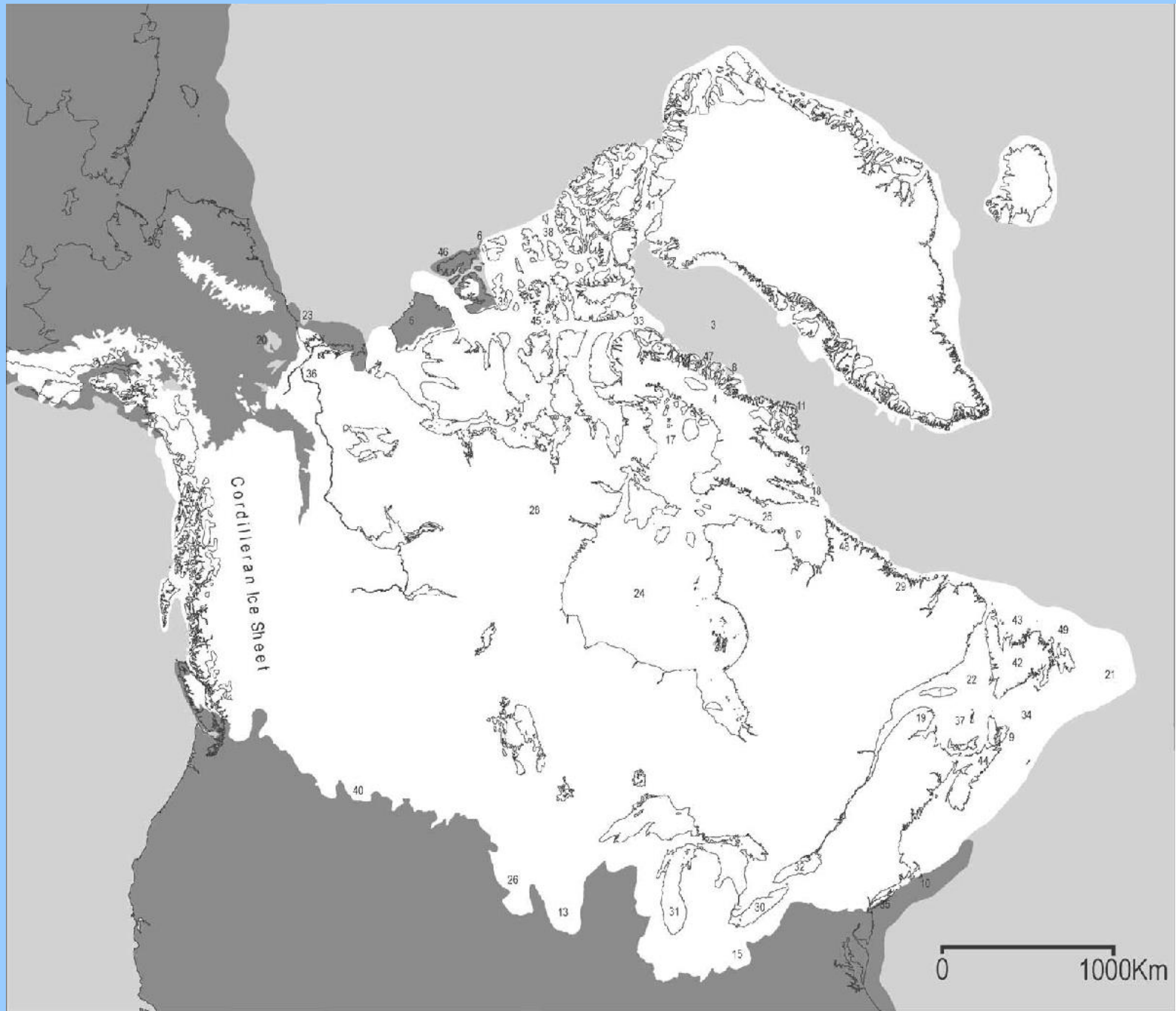
- VYSOKÉ TORY (VÝŠKA NAD 5 M)
- STŘEDNÍ TORY (VÝŠKA 3 AŽ 5 M)
- NÍZKÉ TORY (VÝŠKA DO 3 M)
- BALVANITÉ VÝCHOZY
- NÍZKÉ VÝCHOZY
- MRAZOVÉ SRUBY (VÝŠKA NAD 5 M)
- MRAZOVÉ SRUBY (VÝŠKA 3 AŽ 5 M)
- MRAZOVÉ SRUBY (VÝŠKA DO 3 M)
- MALÉ OBLÍKY (VÝŠKA DO 2 M)
- OBLÍKY (VÝŠKA NAD 2 M)

- 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

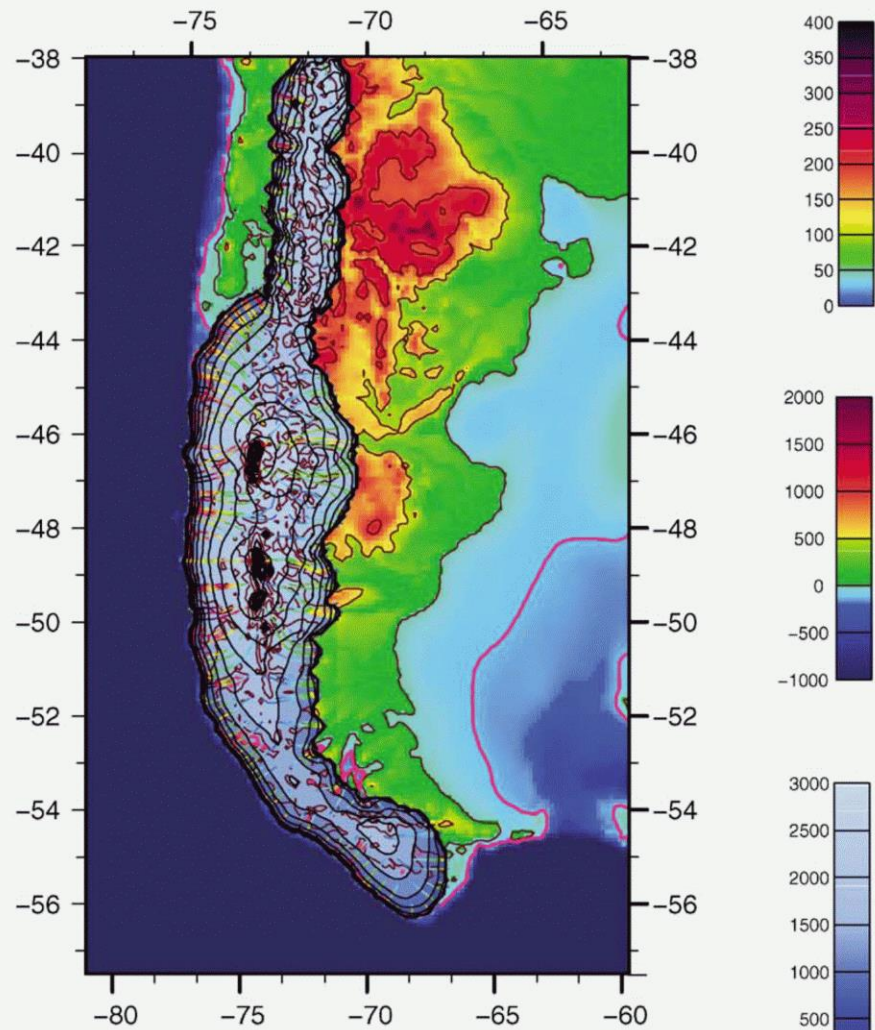


1 : 20 000

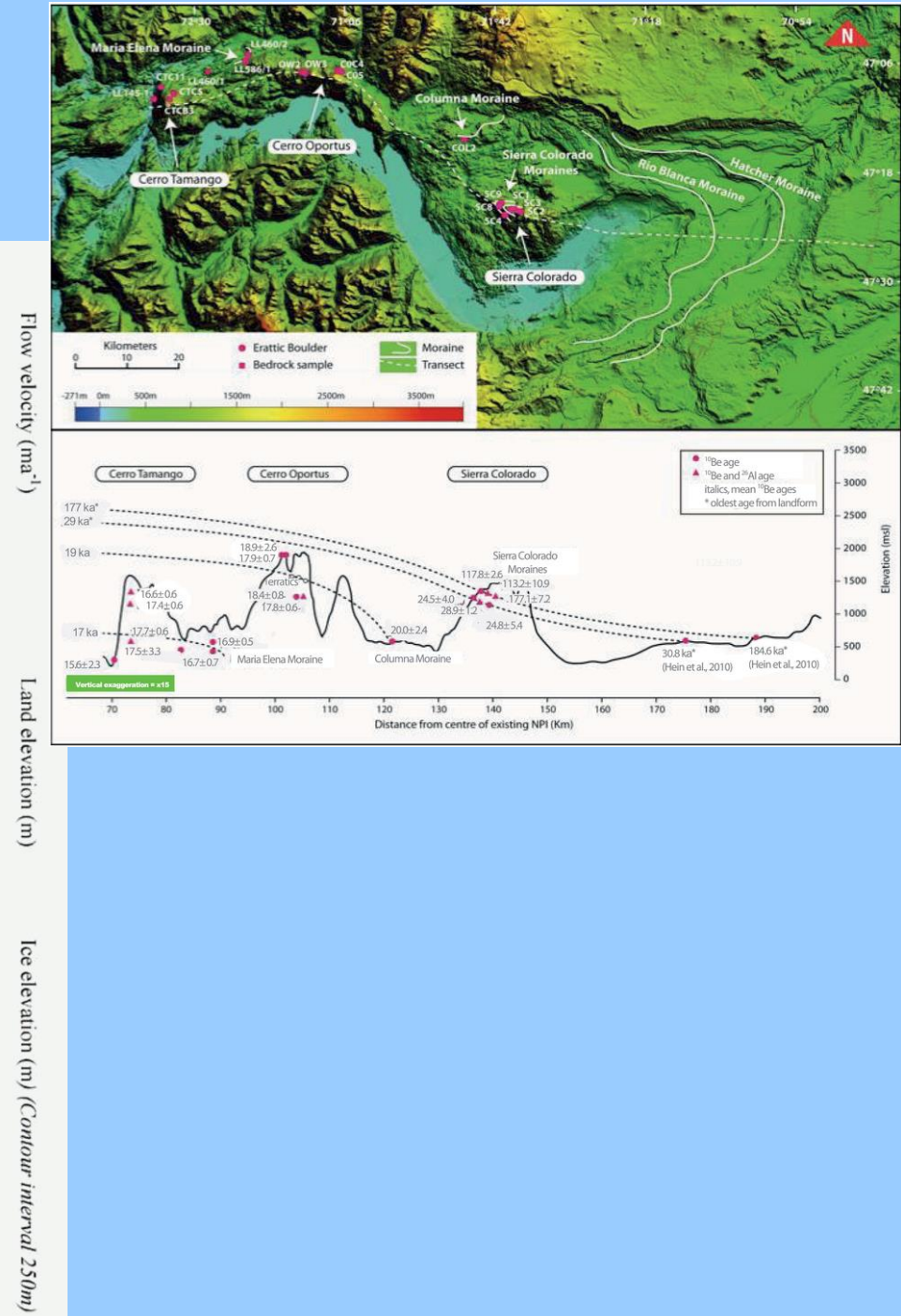
Maximální rozsah wisconsinského zalednění v Severní Americe



Maximální rozsah během LGM v oblasti Patagónského ledovcového štítu



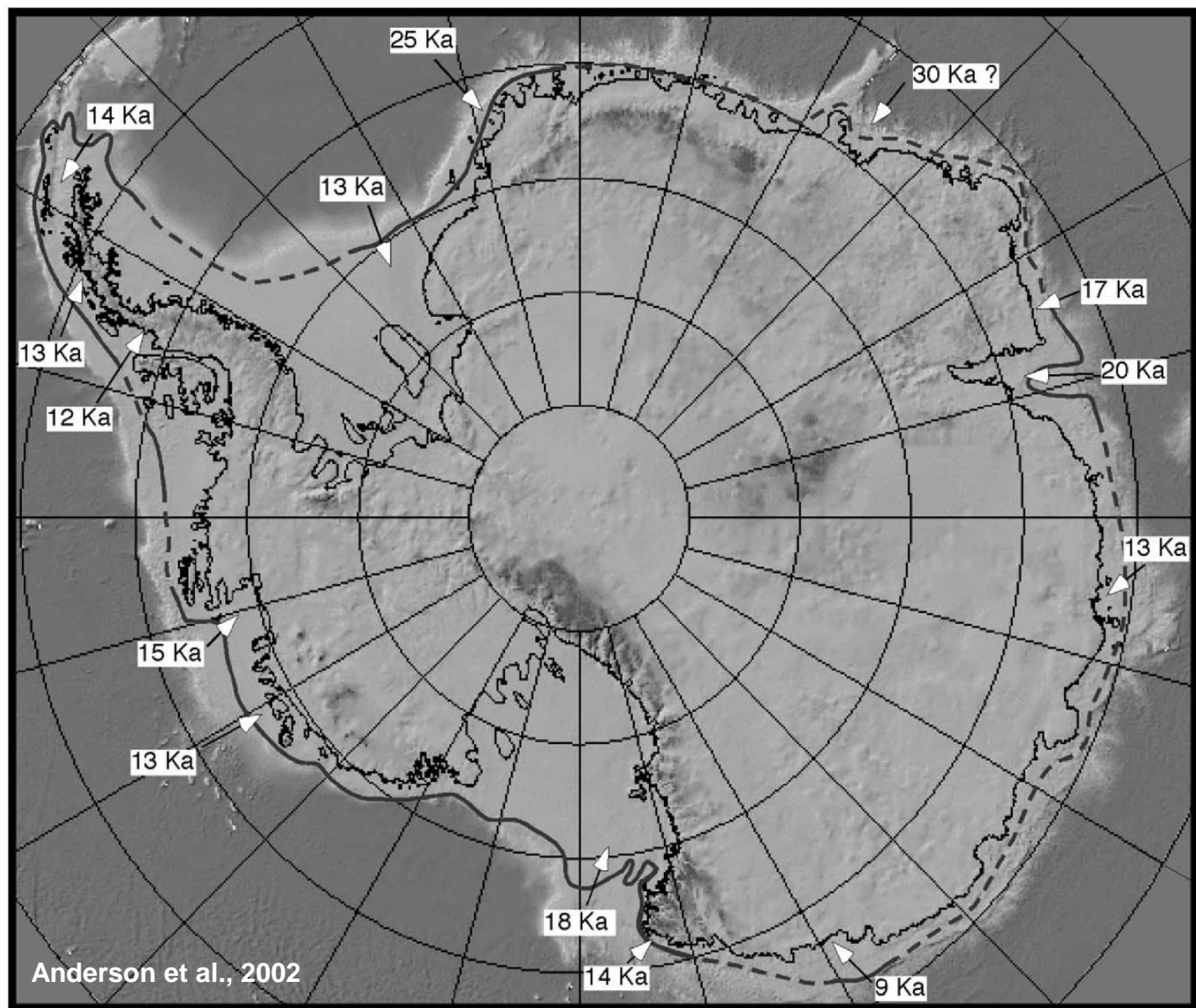
(a)



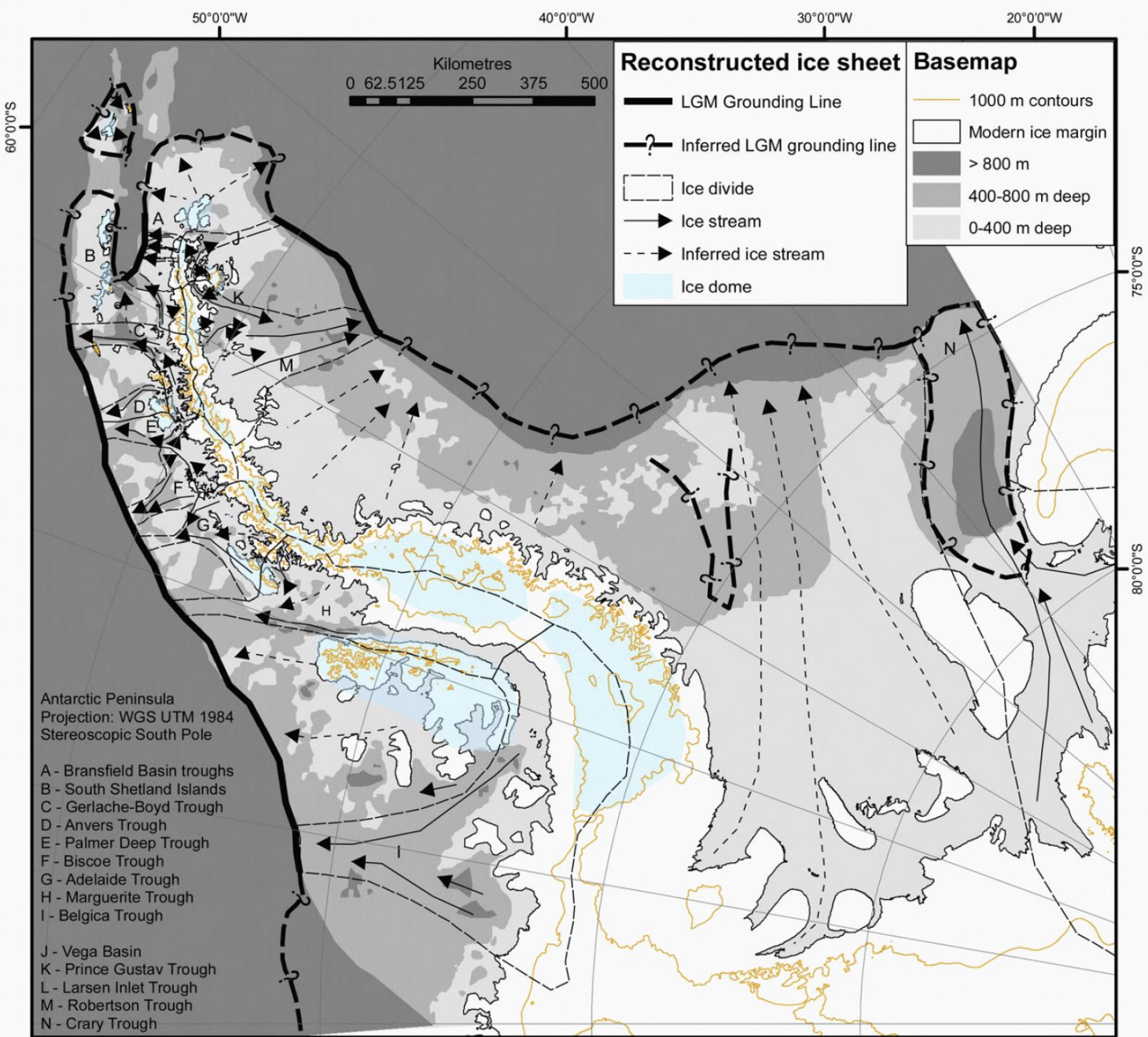
Rozsah Antarktického ledovcového štítu během LGM a počátek ústupu jeho okraje

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)

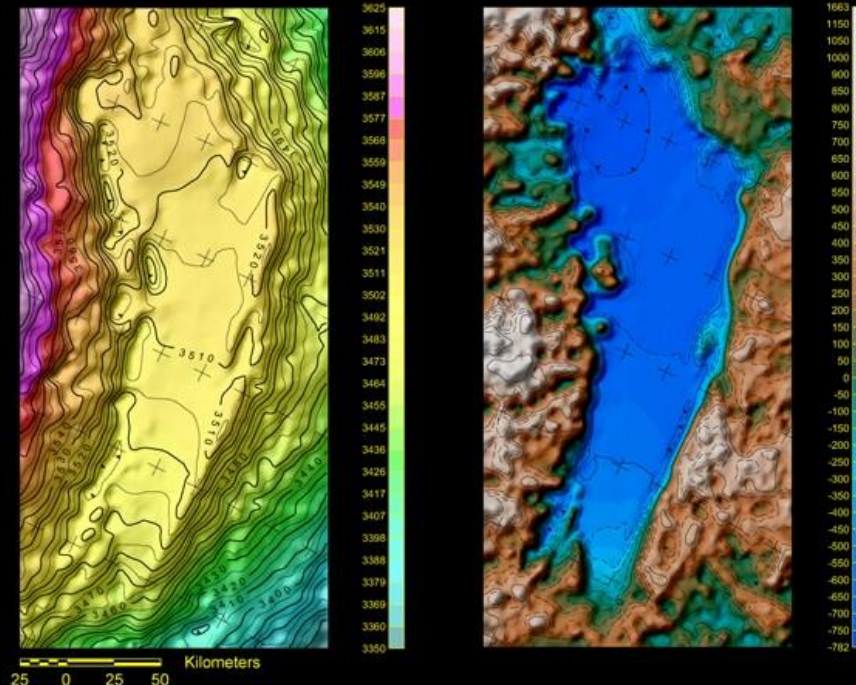
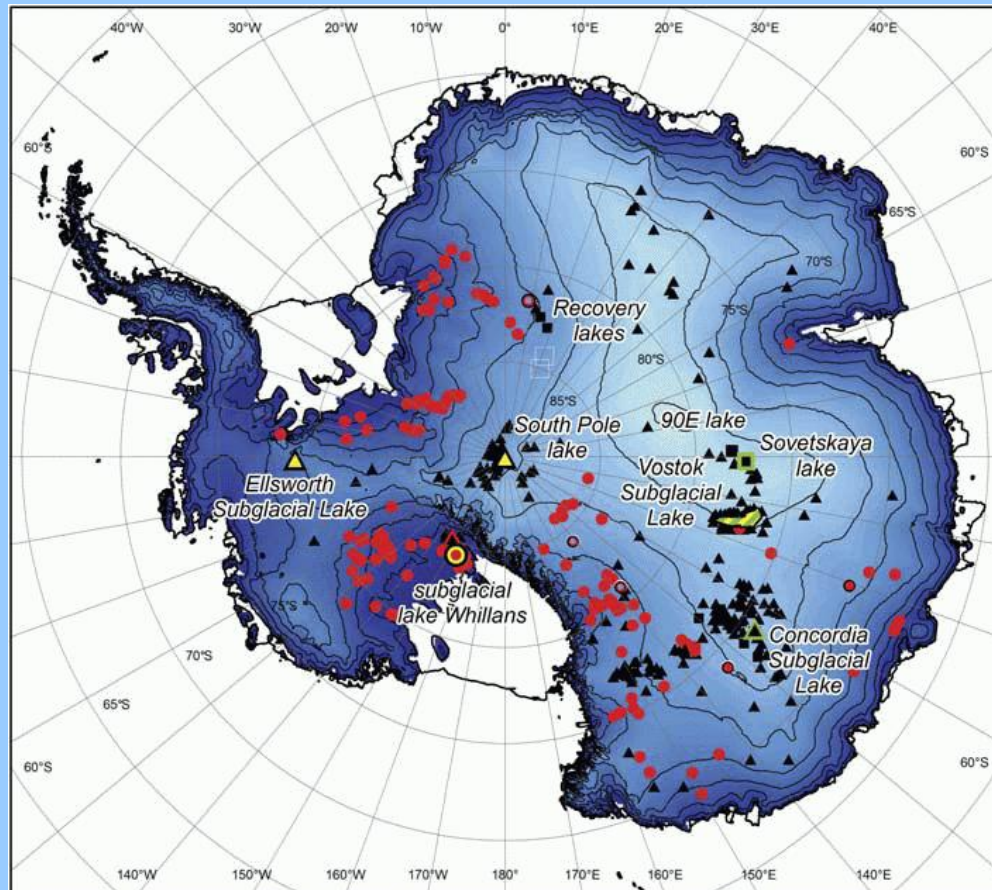


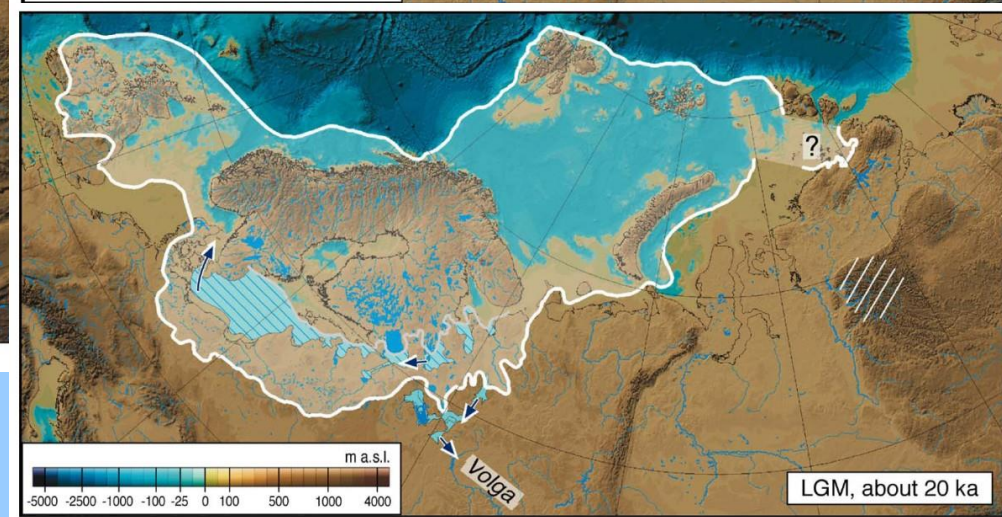
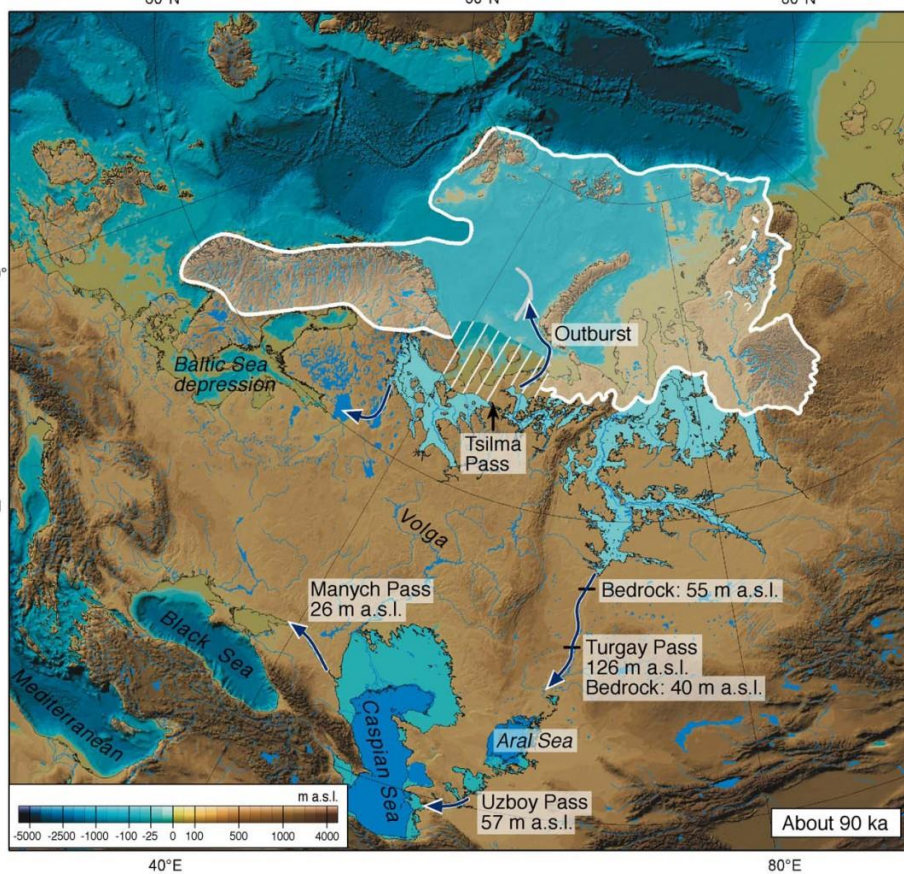
- jednotlivé ledovcové proudy stékaly z centrální části;
- grounding line se nacházela poblíž hrany kontinentálního šelfu;
- počátek ústupu APIS z vnějšího pevninského šelfu SZ Weddellova moře je datován na ~18–19 ka BP
- i na okolních ostrovech (např. JRI) ležely ledovcové čapky

Subglaciální a hrazená proglaciální jezera

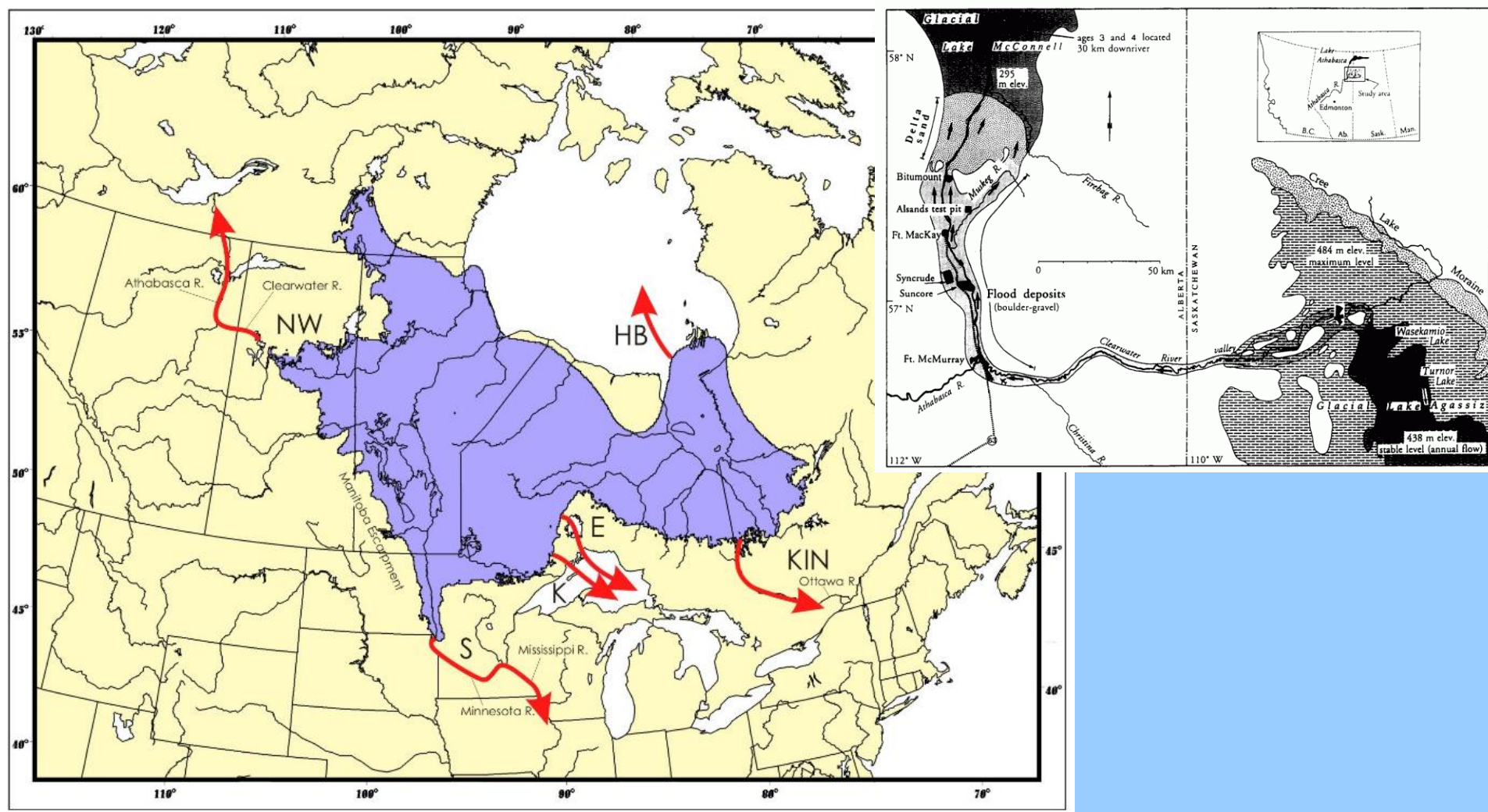
Dnes je např. z Antarktidy známo téměř **400 subglaciálních jezer**. Všechna se nacházejí poblíž rozledí. Obdobná jezera existovala během glaciálů pod Severoamerickým, Severoevropským i Západosibiřským ledovcovým štítem. Před čely kontinentálních ledovců se tvořila rozsáhlá ledovcem hrazená proglaciální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

Největším subglaciálním jezerem je **jezero Vostok s rozměry ~250 x 50 km a plochou 15.690 km²**. 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 km³.



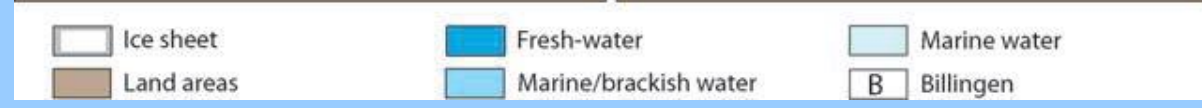
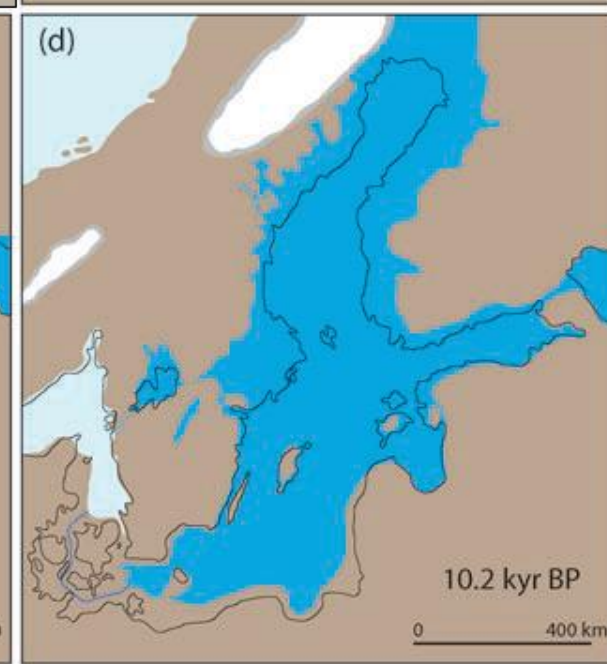
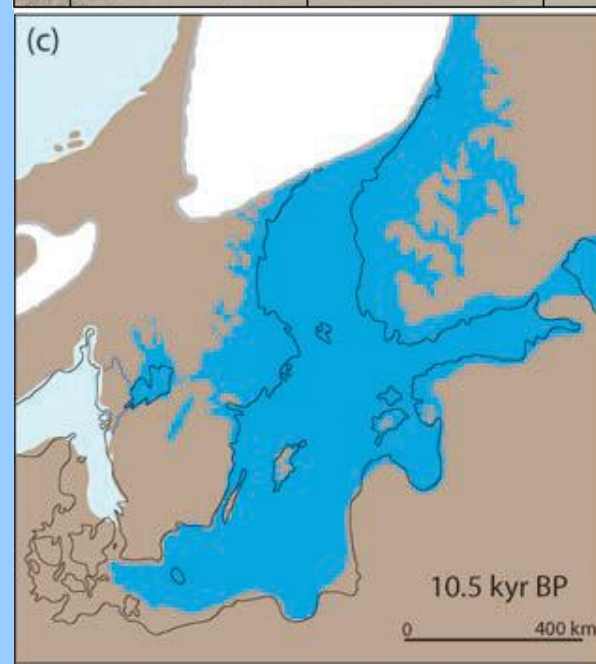
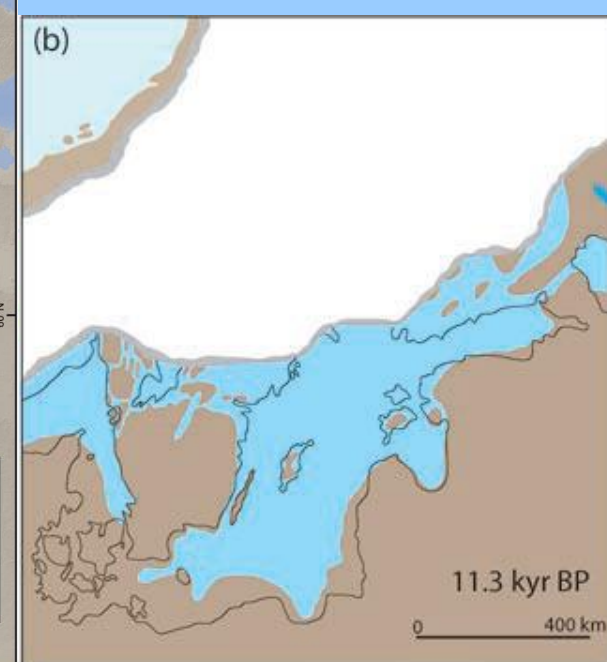
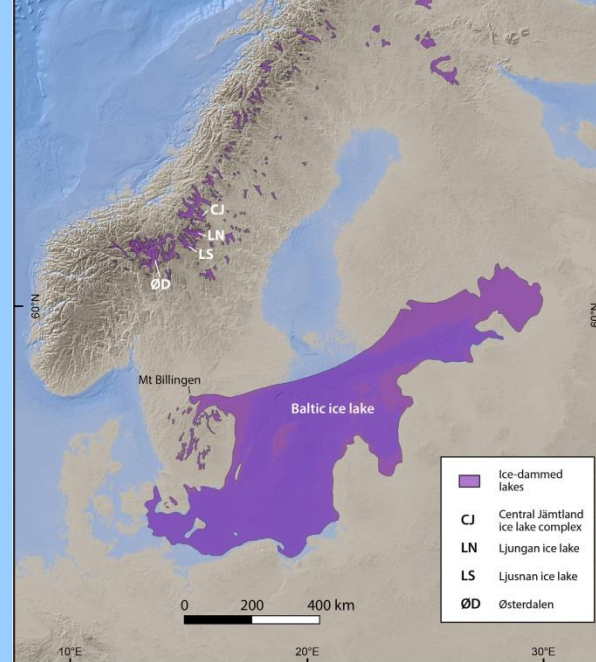


Vývoj systému **proglaciálních a subglaciálních jezer** vázaných na Euroasijský ledovcový štít během posledního glaciálu (90–20 ka BP)



Ledovcová jezera **Agassiz-Ojibway** (až 285.000 km²) a **McConnell** (až 215.000 km²) 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

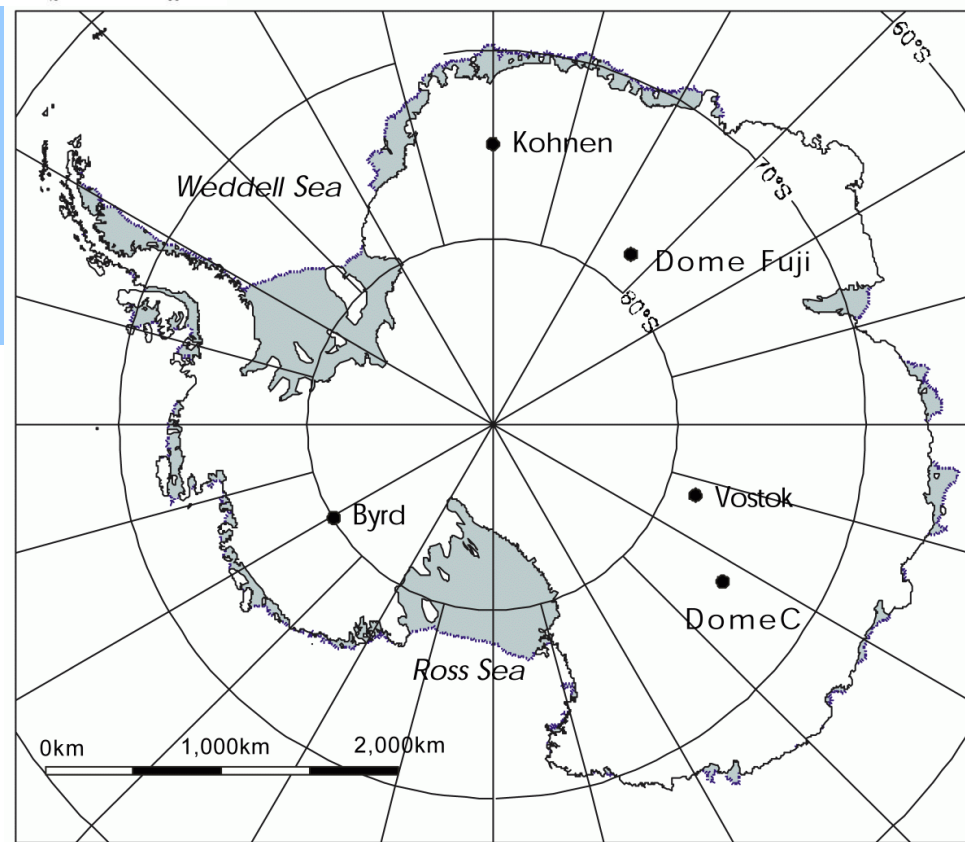
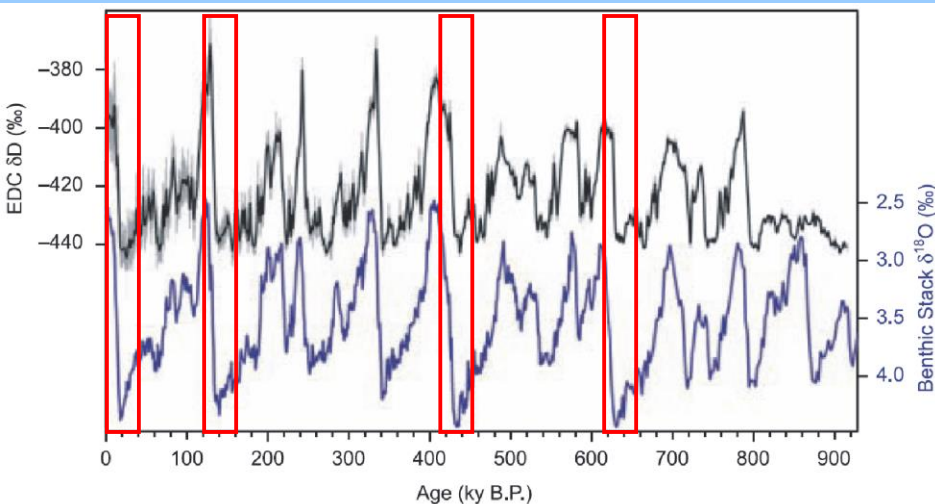
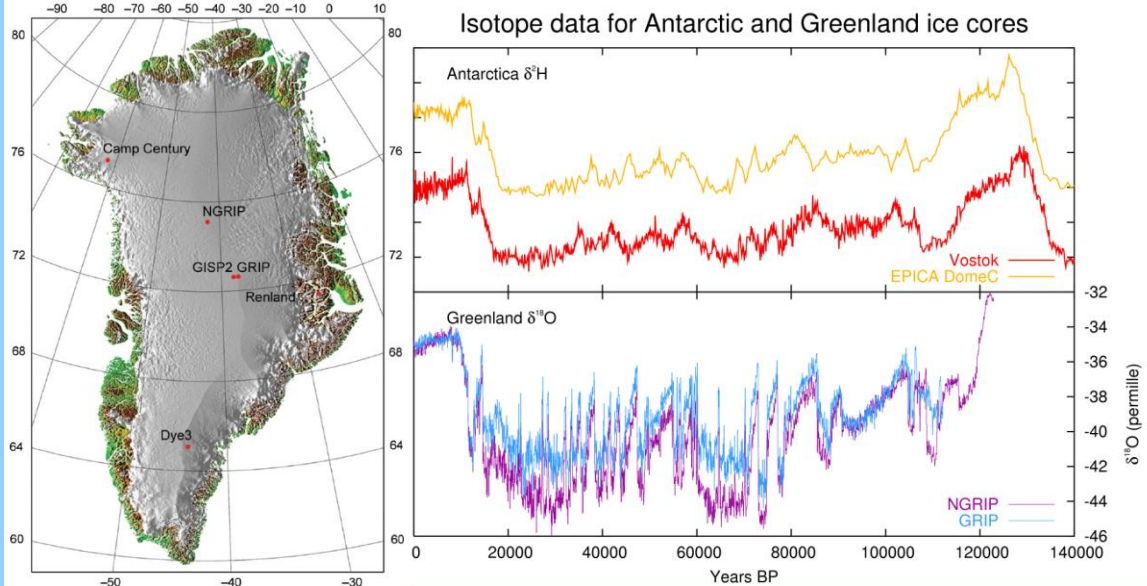


Vývoj zalednění – kvartér

Grónsko – GRIP, GISP2, NGRIP

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

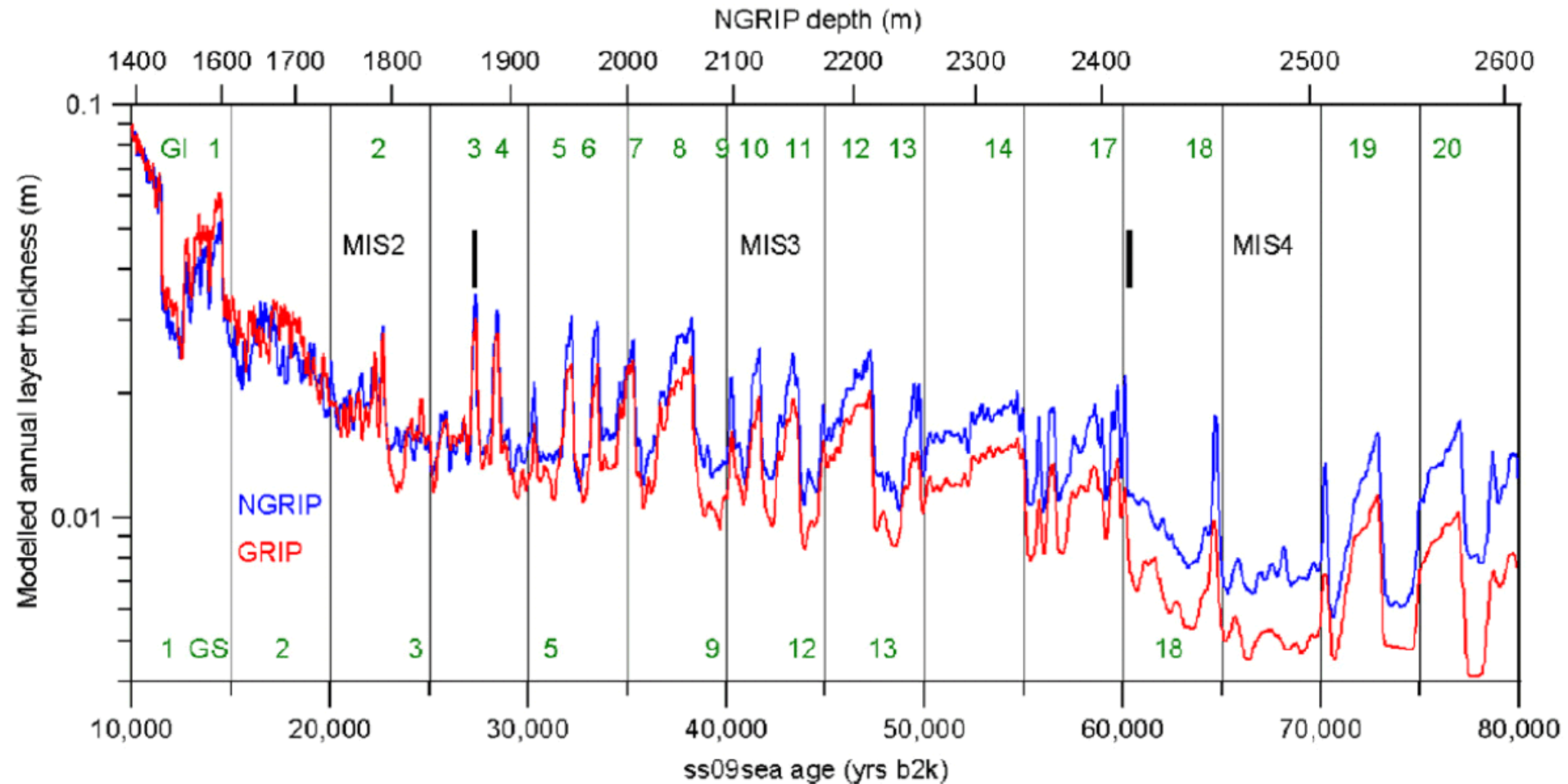
Hlavní globální zalednění:
MIS 2 (~20 ka BP), **6** (~140 ka BP),
12 (~435 ka BP), **16** (~630 ka BP)



Vývoj zalednění – poslední glaciálně-interglaciální cyklus

Grónsko (GRIP, NGRIP)

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



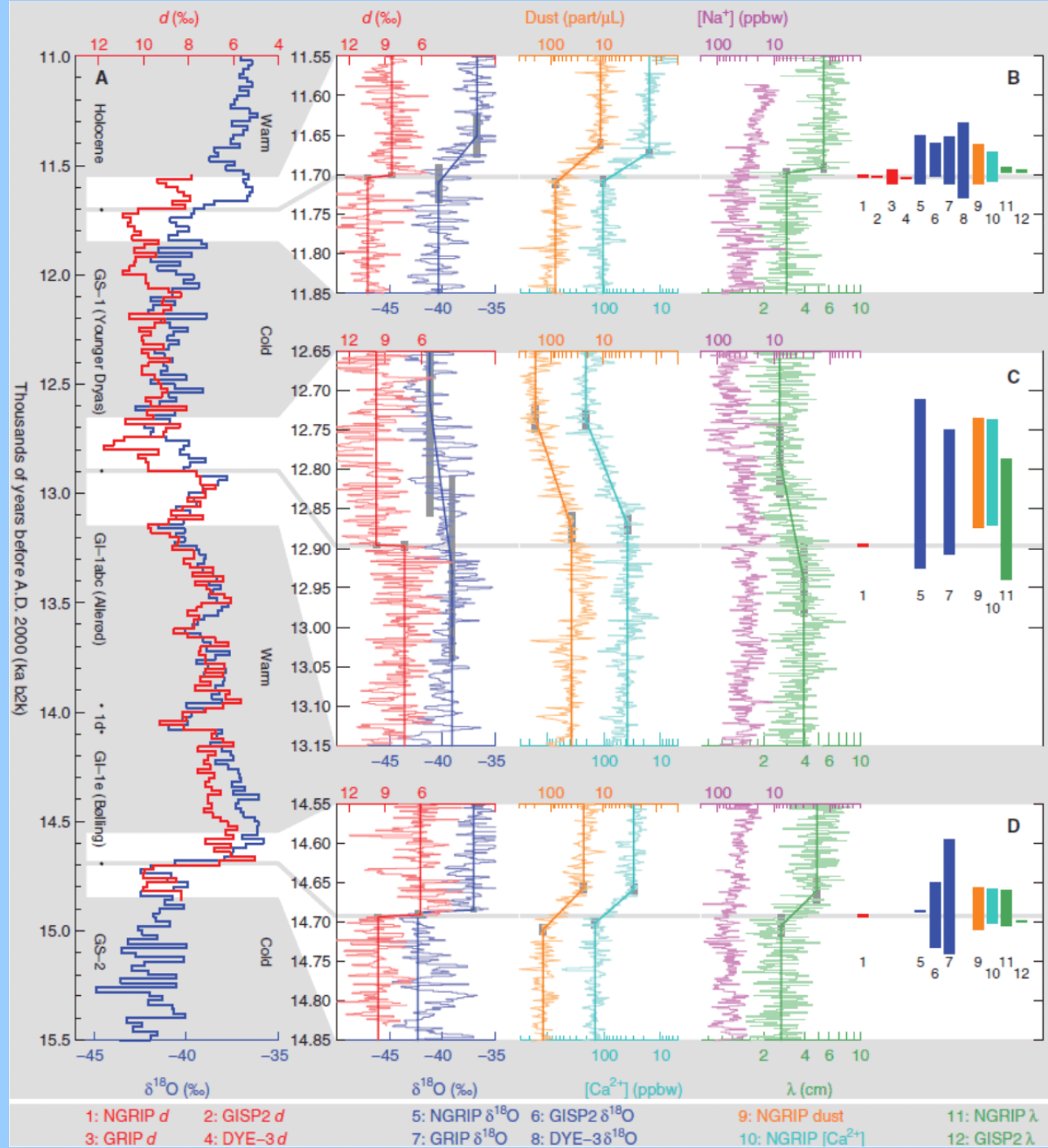
Grónsko (NGRIP)

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.

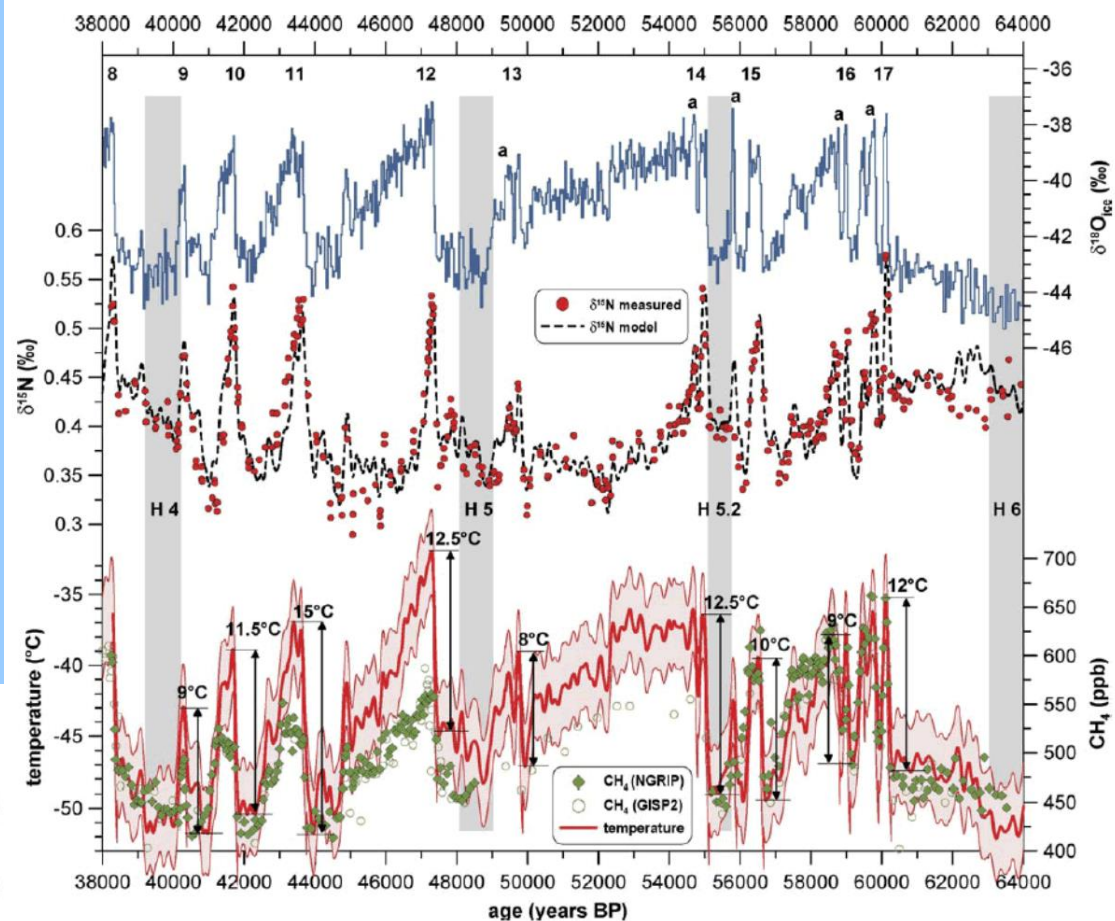
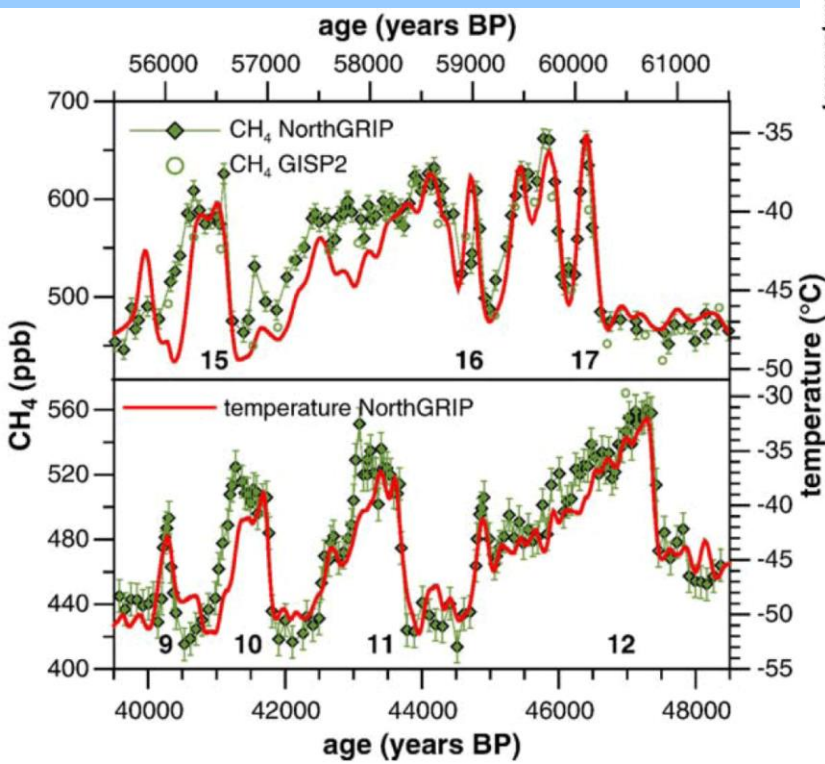


Grónsko (GISP2, NGRIP)

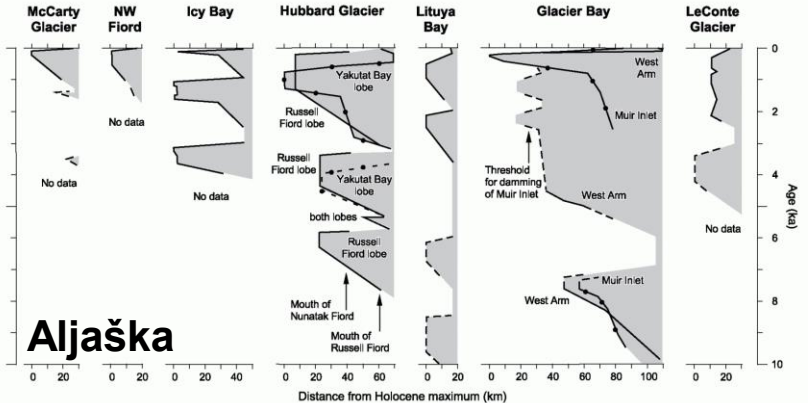
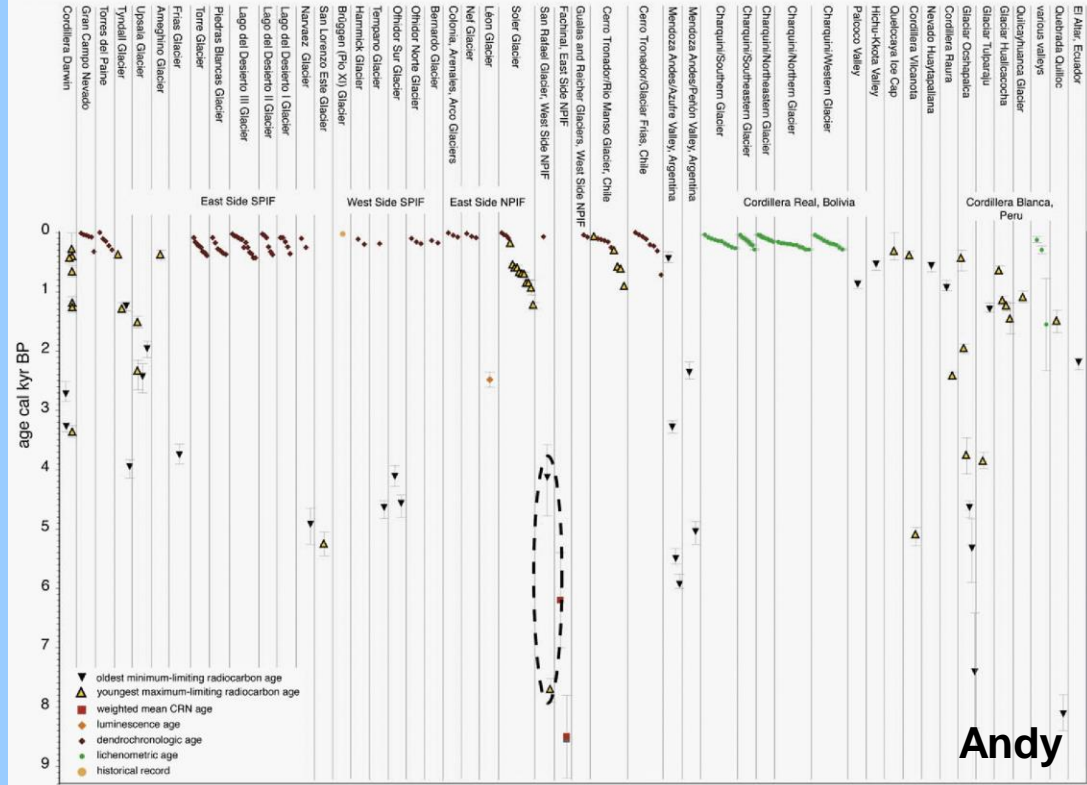
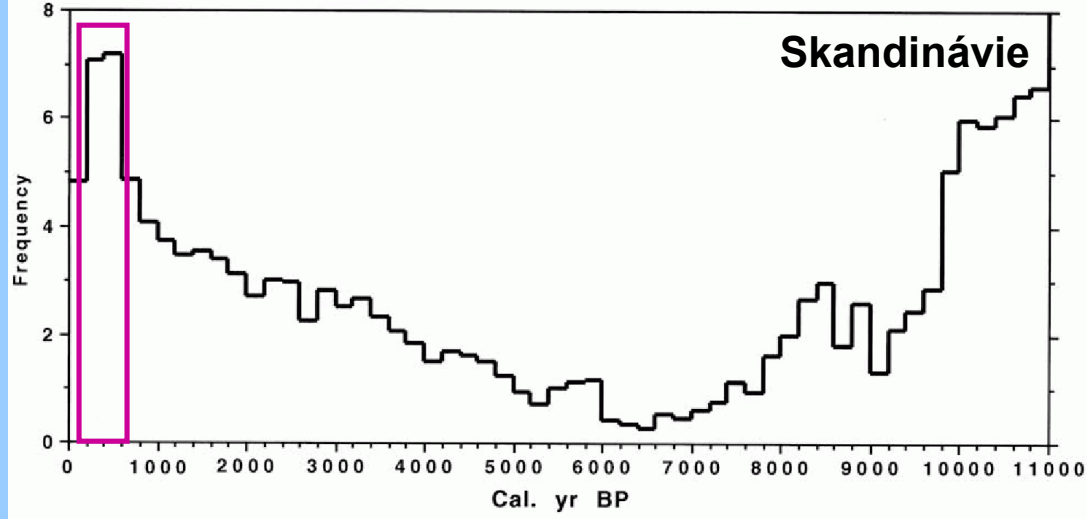
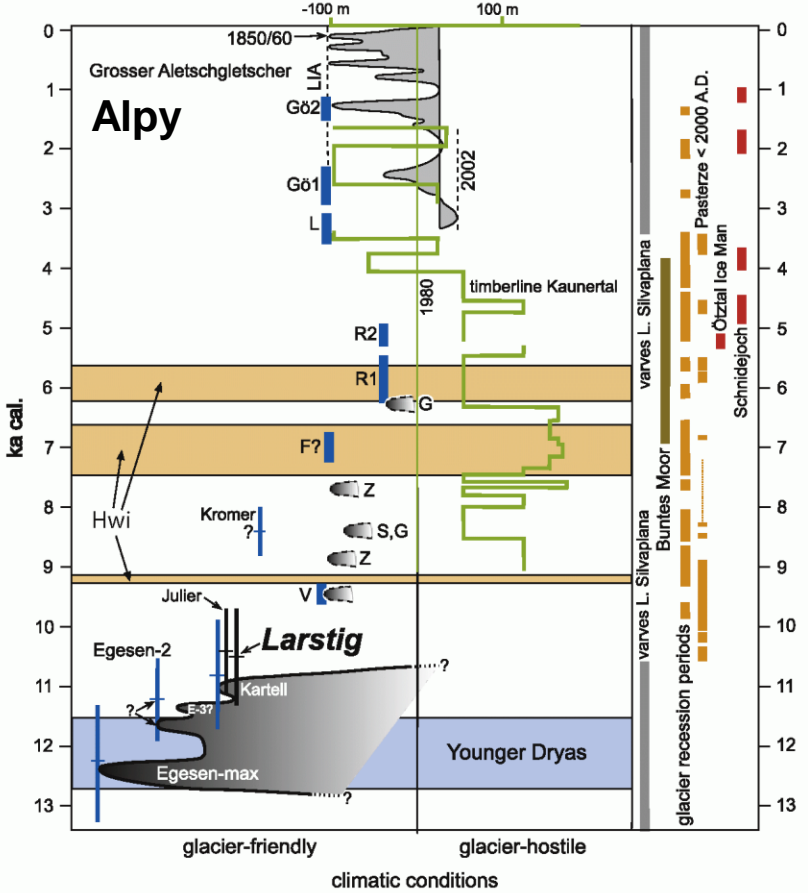
výpočet paleoteplot

CH₄ – 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.

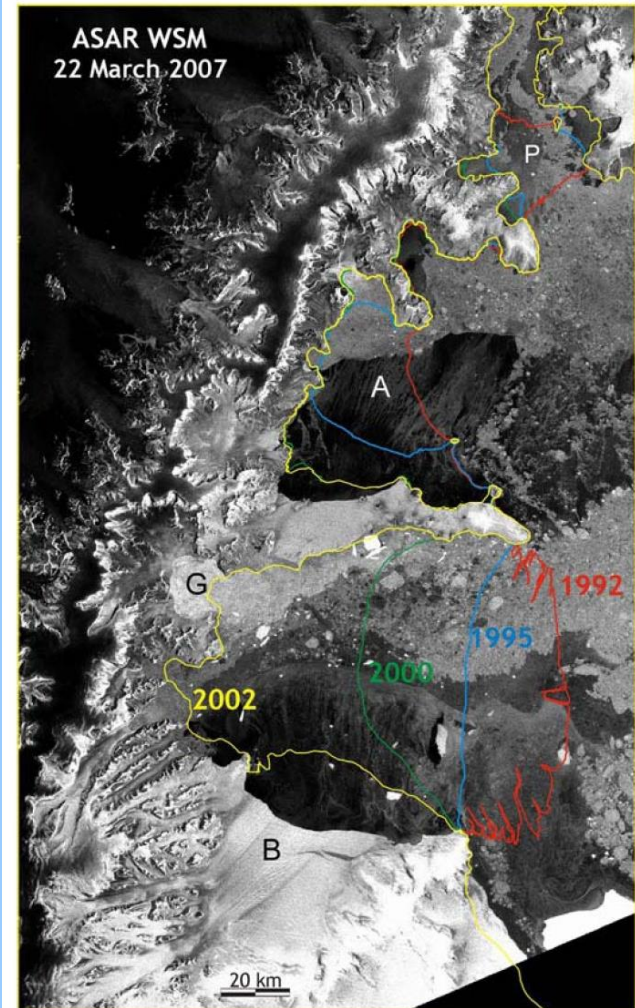
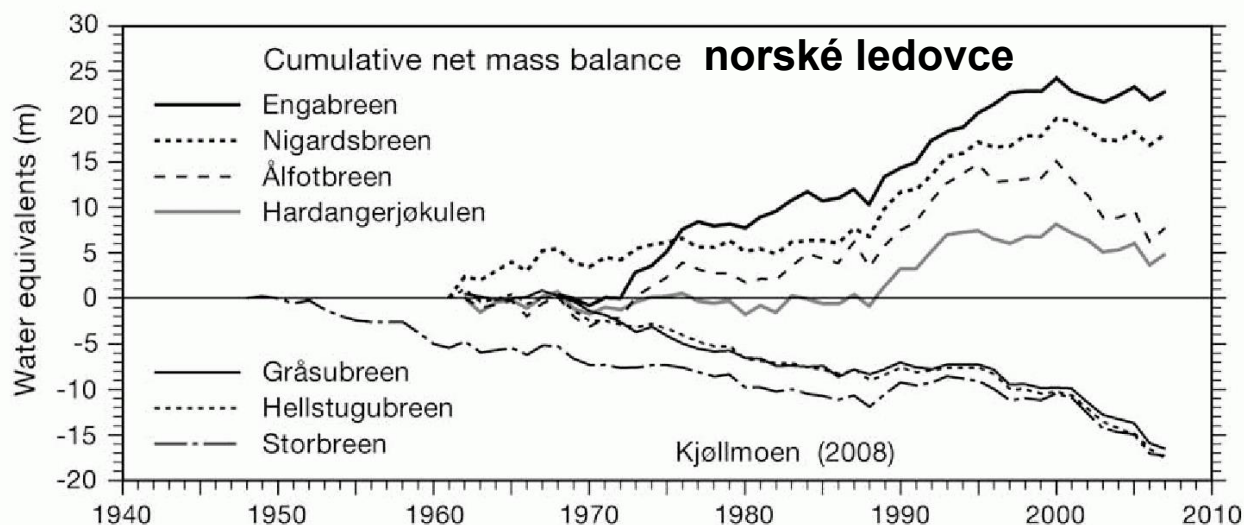


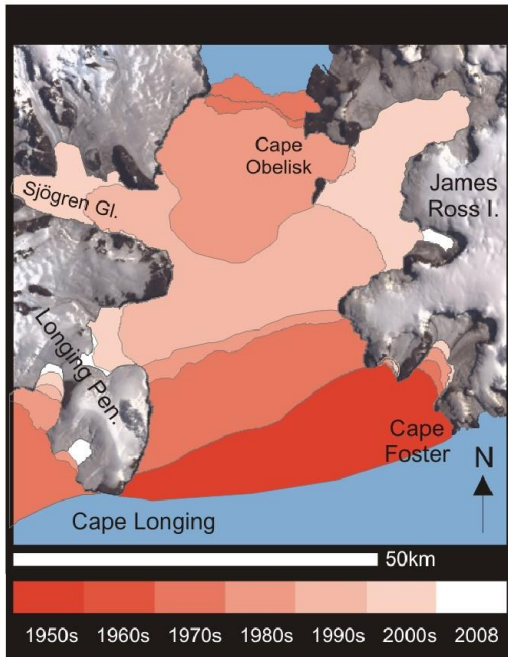
Figure 1. Envisat ASAR Wide Swath image of the northern Larsen Ice Shelf, 22 March 2007. Previous ice shelves: P – Prince Gustav Channel; A – Larsen A. B – remnant of Larsen B. G – bay of Hektor-Green-Evans glaciers. Red, blue, green, yellow line: Ice edge on 8 Dec. 1992, 30 Jan. 1995, 6 Oct. 2000, 18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

TABLE I. Decrease of Larsen B ice shelf area

Date	Area km ²	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

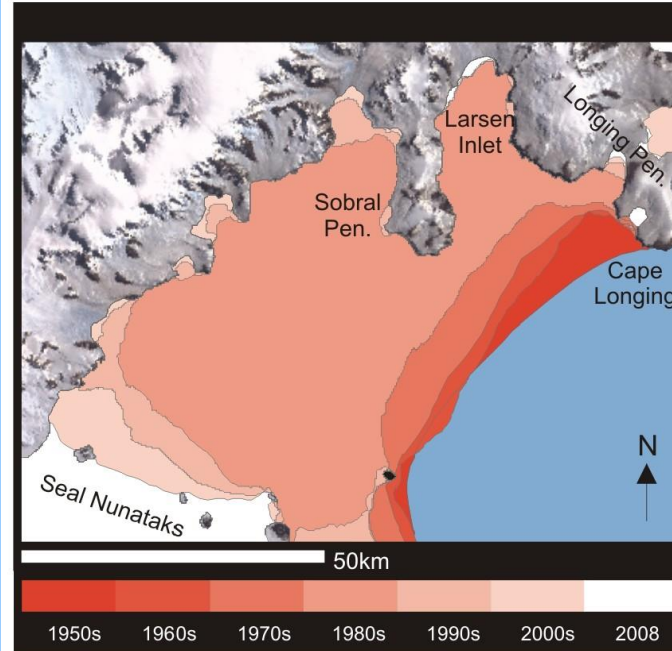
Prince Gustav Ice Shelf



ústup min. od 40.
let 20. století

rozpad v 1995

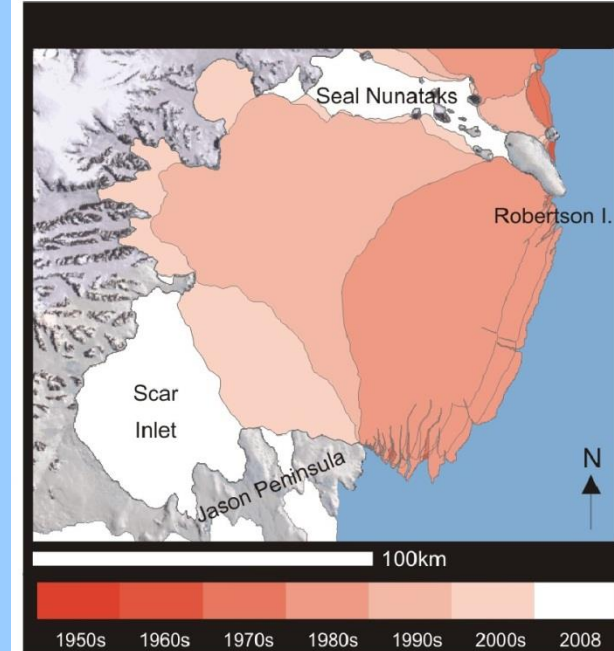
Larsen A Ice Shelf



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)

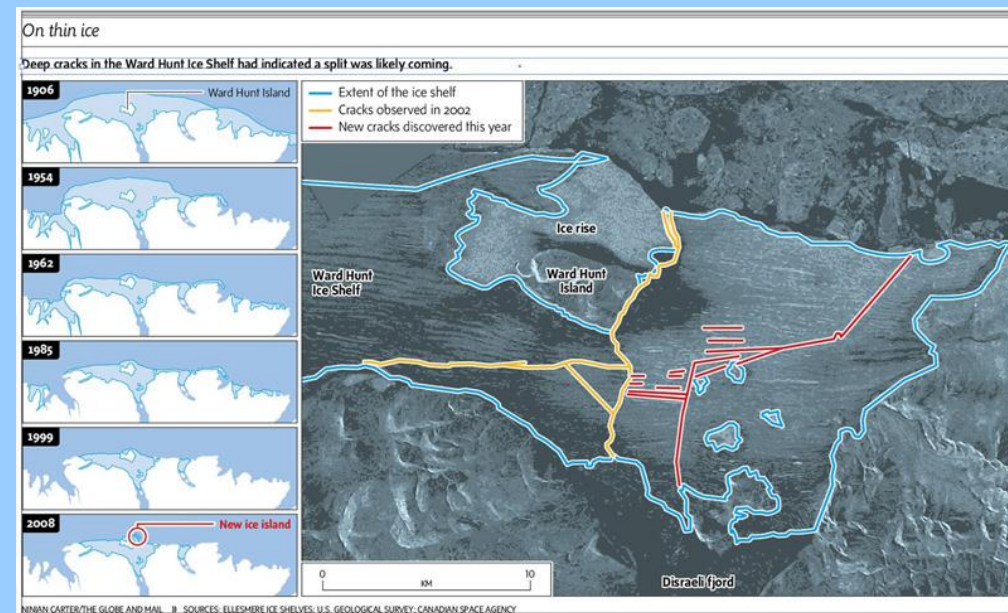
Aylesův šelfový ledovec se rozpadl 13.8.2005 oddělením ledové kry o ploše 66 km^2 .



Before breakup, 00:55 UTC

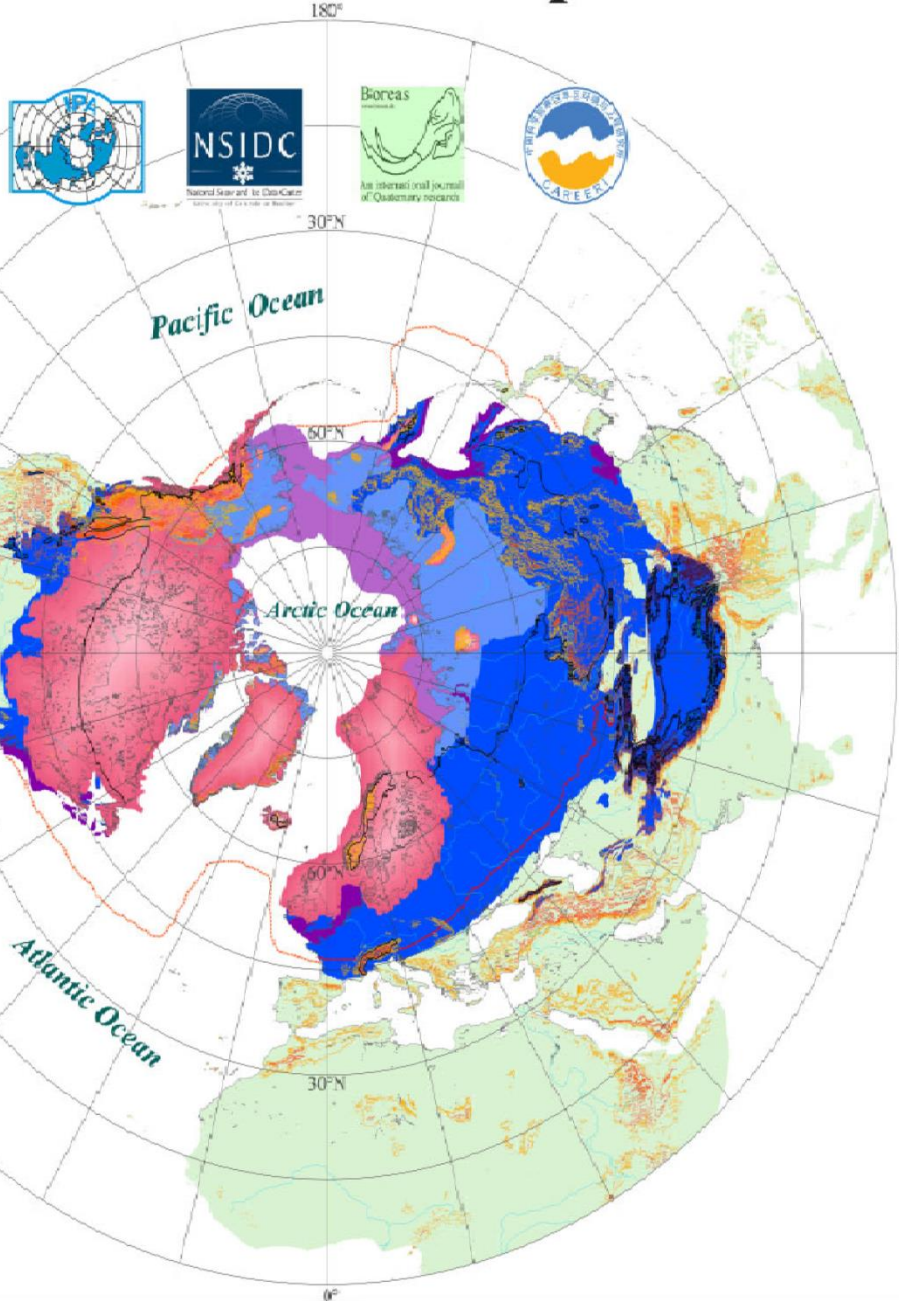


After breakup, 20:45 UTC

















Změny permafrostu během kvartéru (LPM – Last Permafrost Maximum)

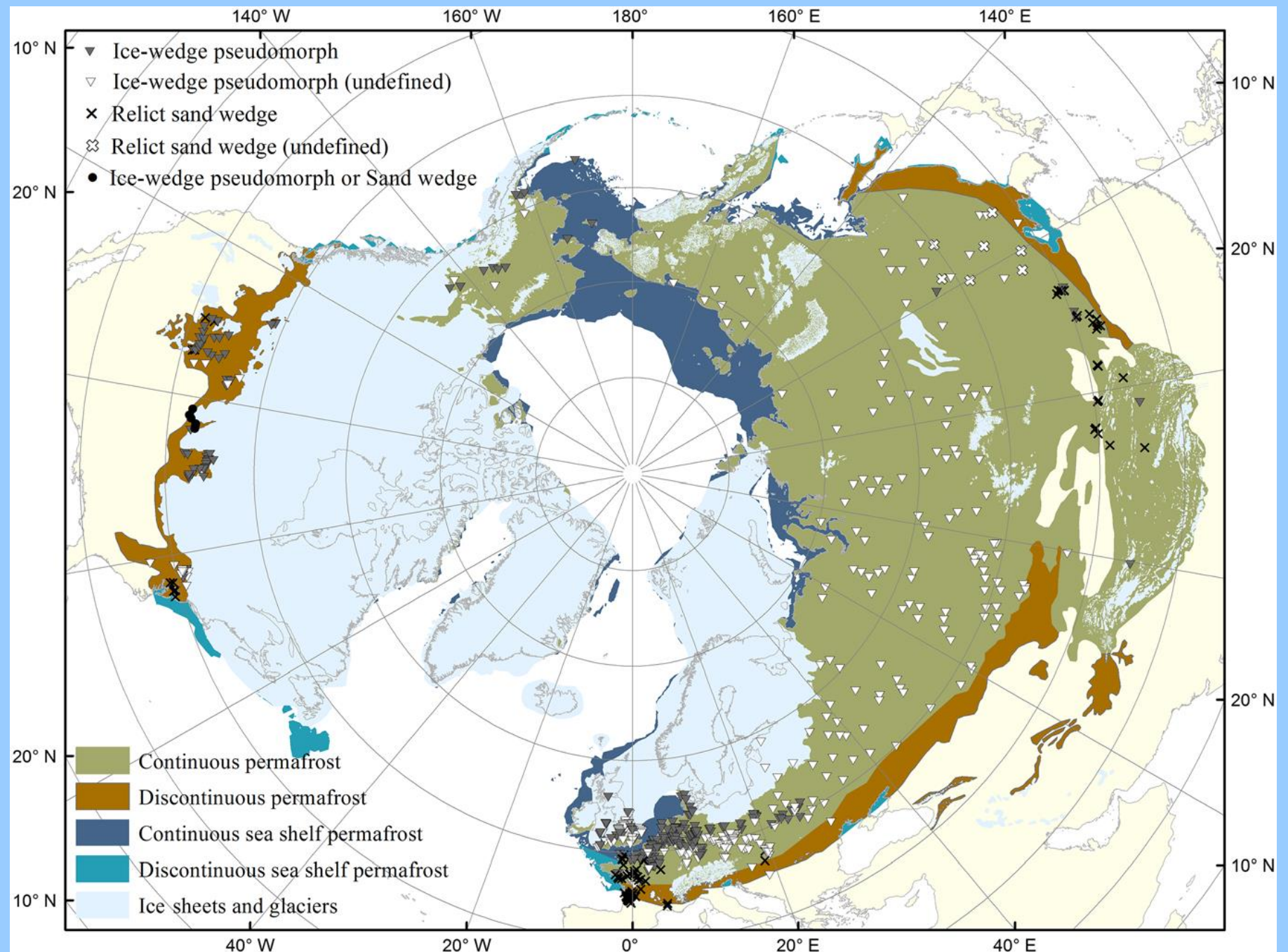
LPM Permafrost Map



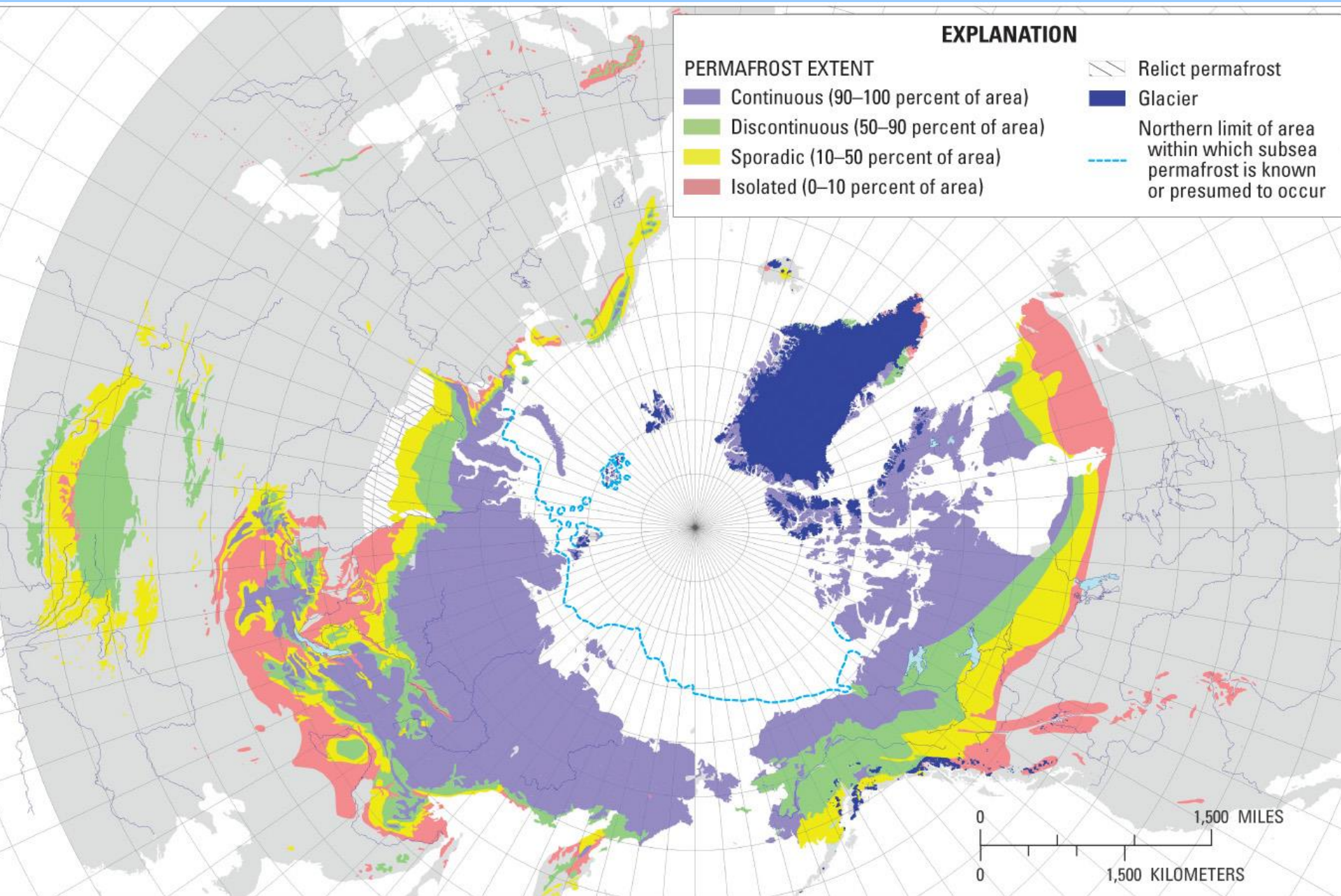
Extent of LPM permafrost:

-  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

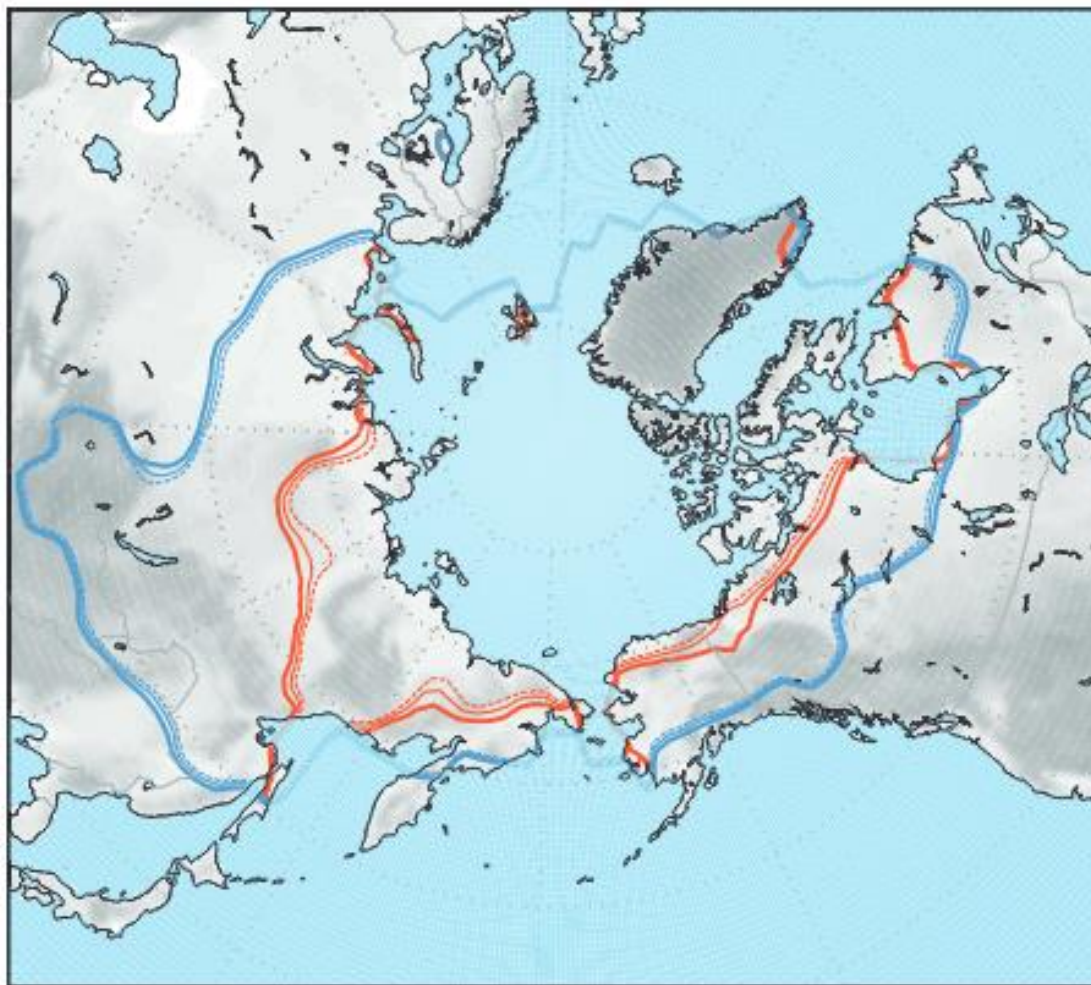
Změny permafrostu během kvartéru (LPM – Last Permafrost Maximum)



Změny permafrostu během kvartéru (současnost)



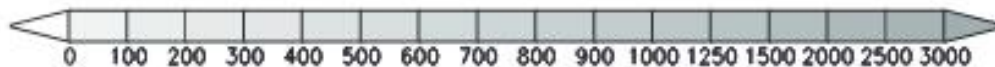
Změny permafrostu během kvartéru (modely budoucího vývoje)



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.
- Stroeven, A.P. et al. (2016): Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 147, 91–121.
- 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.
- Wright, A. & Siegert, M. (2012): A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. *Antarctic Science* 24, 659–664.